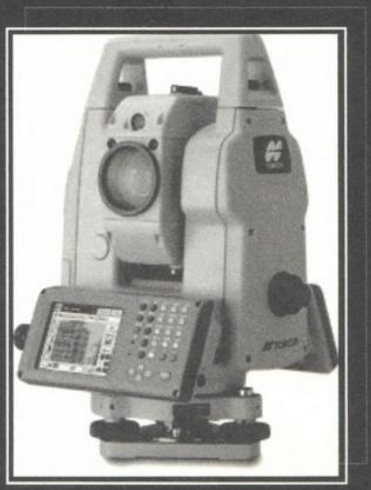
gaudeamus

В.Е. Дементьев

Учебное пособие для вузов

СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ



Учебное пособие
для вузов

В.Е. Дементьев

СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Москва
Академический Проект
2008

УДК 528
ББК 26.1
Д30

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Васютинский И.Ю. — доктор технических наук, профессор (МИИГАиК);
Визиров Ю.В. — профессор (МИИЖТ)

Дементьев В.Е.

Д30 Современная геодезическая техника и ее применение: Учебное пособие для вузов. — Изд. 2-е. — М.: Академический Проект, 2008. — 591 с. — (Фундаментальный учебник).

ISBN 978-5-8291-0997-4

В книге приведены сведения о принципе действия выпускаемых в настоящее время геодезических приборов.

Для понимания этого даны некоторые сведения из физики, радиотехники и оптики. Основное внимание уделено современным геодезическим приборам. Приводятся отдельные примеры эффективности использования тех или иных приборов для решения производственных и научных задач.

Точность измерений ограничивается в основном не инструментальной точностью электрооптических приборов, которая может быть очень высока, а влиянием внешних условий. Поэтому в гл. 8 анализируется влияние внешних условий на результаты измерений и приводятся различные методы определения рефракции. Особый интерес, по мнению автора, вызывают динамические методы измерений рефракции, которые позволяют определять интегральное значение рефракции на трассе в момент выполнения измерений, т. е. в реальном масштабе времени.

Книга рассчитана на студентов, аспирантов и преподавателей соответствующих дисциплин; геодезистов, маркшейдеров, разработчиков геодезических приборов, а также специалистов в области землеустройства и кадастра.

УДК 528
ББК 26.1

© Дементьев В.Е., 2006
© Оригинал-макет, оформление.
Академический Проект, 2008

ISBN 978-5-8291-0997-4

ПРЕДИСЛОВИЕ

На протяжении столетий для геодезических измерений в основном использовались только механические и, позже, оптические приборы. С развитием радиотехники были разработаны новые методы свето- и радиодальномерных измерений, на основе которых в 20 столетии созданы светодальномеры и радиодальномеры. Практическое широкое использование светодальномеров связано с созданием в 1952 г. Э. Бергстрандтом (Швеция) первого фазового дальномера, названного геодиметром [17].

В России создателями первого светодальномера являются В.А. Величко и В.П. Васильев, которые в 1953 г. разработали светодальномер на основе авторского свидетельства на изобретение Г.И. Трофимука, выданного в СССР в 1933 г. Первый радиодальномер, названный теллурометром, был создан Уодли в ЮАР в 1956 г. Этим радиодальномером можно было измерять расстояния до 60 км с ошибкой в несколько см. Несколько позднее (в 1960 г.) в нашей стране под руководством А.А. Генике был разработан первый отечественный геодезический радиодальномер — ВРД.

Использование светодальномеров и радиодальномеров позволило резко повысить производительность линейных измерений, которые были весьма трудоемкими и малопроизводительными, так как выполнялись до этого механическими мерными приборами.

В дальнейшем на основе новейших достижений науки и техники были созданы приборы, не только превосходящие во много раз по точности и производительности традиционные, но и позволяющие решать задачи, которые ранее не могли быть выполнены с такой точностью и скоростью. В первую очередь это относится к спутниковым и лазерным приборам. В основу работы большинства из этих приборов заложены ранее используемые принципы светодальномерных и радиодальномерных измерений.

С появлением компьютеров, плоттеров, сканеров, мощного программного обеспечения обработка результатов полевых измерений также стала во много раз эффективней.

Чтобы полнее использовать на практике новейшие научные и технические достижения в области геодезии, необходимо иметь информацию об этом. К сожалению, такая информация в основном разбросана по многочисленным статьям в журналах, на сайтах и в рекламных проспектах, поэтому ее довольно сложно систематизировать и представить общую картину с целью оптимального выбора средств измерений и обработки для конкретной поставленной работы.

В книге сделана попытка помочь решить эту задачу. Основное внимание уделяется типовым приборам, которые выпускают различные фирмы. Кроме того, приведены сведения о принципе действия современных геодезических приборов, а также об исследованиях и о некоторых разработках, выполненных за последние 20–30 лет, которые, возможно, могут быть использованы при создании новых приборов в будущем.

В гл. 1 приведены сведения из физики, радиотехники и оптики, необходимые для понимания принципа действия и устройства различных приборов.

В гл. 2 рассмотрены приборы для угловых и линейных измерений, включая механические мерные приборы, светодальномеры и интерферометры, а также оптические и цифровые теодолиты, пассивные и активные сканеры и электронные тахеометры. В гл. 3 содержатся сведения о приборах для нивелирования. В гл. 4 приведена информация о спутниковом геодезическом оборудовании. В гл. 5 рассматриваются типовые инженерно-геодезические задачи с применением новой геодезической техники. В гл. 6 и 7 — сведения о гравиметрах и приборах для ориентирования.

Как известно, из всех видов работ наиболее трудоемкими, сложными и дорогостоящими являются прецезионные геодезические измерения. В реальных условиях получаемая точность измерений ограничивается в основном не инструментальной точностью электрооптических приборов, которая может быть очень высока, а влиянием внешних условий на прохождение света. В связи с этим гл. 8 посвящена проблемам учета влияния внешних условий на результаты измерений, и в первую очередь определению рефракции как традиционными, так и новыми методами. Особое внимание в книге уделено динамическим методам определения рефракции, которые позволяют определять интегральное значение рефракции на трассе в момент выполнения измерений, т. е. в реальном масштабе времени, что особенно важно при создании и использовании высокоточных автоматизированных геодезических приборов.

Автор выражает признательность профессорам А.Б. Беликову, И.Ю. Васютинскому и Ю.В. Визирову за ценные замечания, способствующие улучшению структуры и содержания рукописи, а также заранее выражает благодарность всем читателям, которые найдут возможность прислать свои критические замечания по поводу данной книги.

ГЛАВА 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ФИЗИКИ, РАДИОТЕХНИКИ, ОПТИКИ

1.1. Электромагнитные волны. Общие свойства

Большинство современных геодезических приборов и инструментов использует электронику и оптику. Рассмотрим основные свойства электромагнитных волн (в частности, оптических), причем отметим наиболее важные из них с точки зрения их применения в геодезических приборах и системах.

Как известно, переменные электрическое и магнитное поля взаимосвязаны и возбуждают в пространстве электромагнитное поле. Это поле способно распространяться в пространстве в виде электромагнитной волны.

Рассмотрение электромагнитной волны удобнее всего начать с идеализированного случая гармонической волны постоянной частоты. Такая волна возникает при гармонических колебаниях тока в источнике излучения.

Пусть электрический ток в источнике меняется по гармоническому закону:

$$I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0). \qquad (1.1)$$

Здесь $I(t)$ – закон колебания тока во времени; t – текущее время; I_0 – амплитуда, φ_0 – начальная фаза, ω – круговая частота колебаний (рад/с), $\omega = 2\pi f$, где f – частота колебаний в Гц. Период таких колебаний:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \qquad (1.2)$$

Гармонический ток в источнике порождает электромагнитную волну в окружающем пространстве. Обозначим через E напряженность электрического поля, а через H – напряженность магнитного поля.

Допустив для простоты, что волна распространяется прямолинейно вдоль координаты X (рис. 1.1), получим соотношение для гармонического изменения амплитуды электрической напряженности $E(t)$ в некоторой точке X:

$$E(t, x) = E_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0), \qquad (1.3)$$

где E_0 – амплитуда колебаний, ω – круговая частота; t – время; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; φ_0 – начальная фаза колебаний; λ – длина волны.

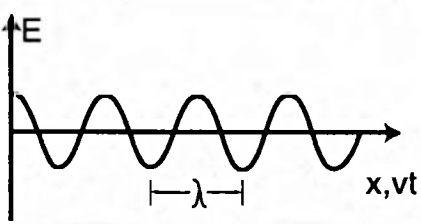


Рис. 1.1. Синусоидальная волна

Это уравнение называется уравнением бегущей волны для электрической напряженности E. Для магнитной напряженности уравнение записывается аналогичным образом.

Координату x постоянной фазы волны можно связать со скоростью распространения v волны в данной среде:

$$x = vt, \tag{1.4}$$

а длину волны λ — со скоростью распространения и частотой колебаний:

$$\lambda = \frac{2\pi v}{\omega}. \tag{1.5}$$

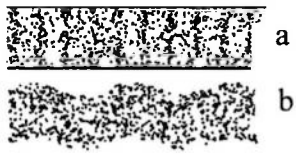


Рис. 1.2. Продольные (a) и поперечные (b) волны

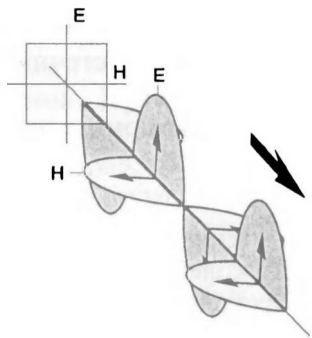


Рис. 1.3. Электромагнитная волна

Из курса физики механических упругих волн известно, что волны бывают продольные и поперечные (рис. 1.2, a, b).

Электромагнитная волна поперечна. Это значит, что колебания векторов электрической напряженности E и магнитной напряженности H происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны (рис. 1.3). Кроме того, в каждый момент времени в этой плоскости векторы E и H перпендикулярны друг другу.

По аналогии с механическими волнами логично было бы предположить, что распространение электромагнитной волны требует наличия некой среды переноса, заполненной частицами, за счет взаимодействия (соударений) которых и происходит волновой процесс. В 19 веке предполагалось наличие такой среды — эфира, и Максвелл выводил свои электромагнитные уравнения именно в предположении наличия эфира. Однако в 20 веке большинством физиков гипотеза об эфире была отвергнута, и предполагалось распространение электромагнитных волн «в пустоте».

Тем не менее с конца 20 — начала 21 века гипотеза эфирной среды реабилитирована и вновь возвращается в физику (см., например, работу В. Ацюковского [12]).

В зависимости от частоты (длины волны) электромагнитные волны разбиты на несколько условных диапазонов, классификация которых приведена в табл. 1.1.

Заметим, что все перечисленные в таблице диапазоны излучения отнесены к электромагнитным волнам, в том числе оптический диапазон волн, рентгеновское и гамма-излучение. Таково господствующее воззрение канонической физики 20 века. Однако есть аргументы в

пользу того, что природа световых волн отлична от природы электромагнитных волн.

На практике далеко не всегда излучение имеет одну строго фиксированную частоту; как правило, это смесь колебаний нескольких близких частот. Для упрощения обычно рассматриваются гармонические колебания с фиксированной частотой, кроме особо оговоренных случаев.

В однородной (изотропной) среде электромагнитные волны распространяются от источника по прямым линиям. Как правило, они распространяются по направлениям от источника, но мощность (интенсивность) источника в различных направлениях может быть различна. Такое свойство называется диаграммой направленности источника (зависимость интенсивности излучения от пространственного направления).

Обычно используются две идеализированные модели: сферическая волна, распространяющаяся от точечного источника, и плоская волна, распространяющаяся прямолинейно.

На рис. 1.4, а изображена сферическая волна, распространяющаяся от точечного источника.

Абсолютно плоской волны в открытом пространстве не существует, но достаточно хорошим ее приближением можно считать волну, распространяющуюся от точечного источника в малом телесном угле, на большом расстоянии от источника (рис. 1.4, б).

Для гармонической волны (излучение с фиксированной частотой) полезным является понятие волнового, или фазового, фронта. Это совокупность точек в пространстве, колеблющихся одновременно в одинаковой фазе. Вектор распространения волны направлен ортогонально к фазовому фронту. На рис. 1.4, а фазовый фронт представляет собой сферическую поверхность, на рис. 1.4, б — плоскость (почти плоскость). Чем более плоскую форму имеет фазовый фронт, тем больше оснований считать такую волну приблизительно плоской (например, на большом удалении от сферического источника, при малом телесном угле и при малой рассматриваемой дистанции прохождения волны). На практике такое приближение позволяет пользоваться моделями

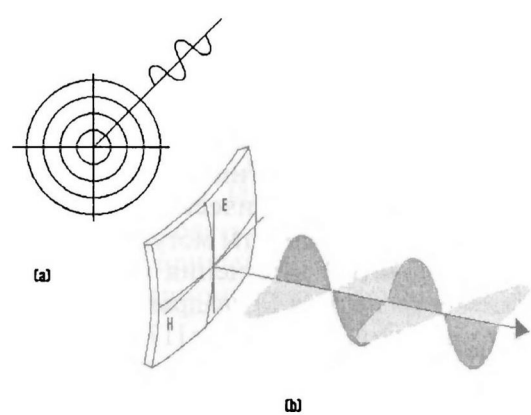


Рис. 1.4. Сферическая (а) и плоская волна (б)

распространения в виде «лучей», что применяется, например, в геометрической оптике.

Таблица 1.1

Диапазоны электромагнитных волн

Наименование диапазонов волн	Длины волн	Частоты
Радиоволны		
Волны инфразвуковых и звуковых частот	Более 100 км	Менее 3 кГц. Очень низкие частоты
Сверхдлинные волны, СДВ	10–100 км	30–3 кГц
Длинные волны, ДВ	1–10 км	300–30 кГц
Средние волны, СВ	100–1000 м	3–0,3 МГц
Короткие волны, КВ	10–100 м	30–3 МГц
Ультракороткие волны, УКВ		
Метровые волны, МВ	1–10 м	300–30 МГц
Дециметровые волны, ДМВ	1–10 дм	3000–300 МГц
Сантиметровые волны, СМВ	1–10 см	30–3 ГГц
Миллиметровые волны, ММВ	1–10 мм	300–30 ГГц
Субмиллиметровые	0,1–1 мм	3000–300 ГГц
Оптический диапазон волн		
Инфракрасное излучение, ИК	0,75 мкм – 0,1 мм	$4\cdot10^{14} - 3\cdot10^{12}$
Видимый свет	0,4–0,75 мкм	$4\cdot10^{14} - 7,5\cdot10^{14}$
Ультрафиолетовое излучение, УФ	0,1–0,4 мкм	$7,5\cdot10^{14} - 3\cdot10^{15}$
Рентгеновское излучение и гамма-излучение	менее 0,1 мкм	$3\cdot10^{15}$

В каждой точке пространства интерес представляют амплитуда колебаний электромагнитной волны и энергия. Рассмотрим для этих целей вектор E электрической напряженности E(t) (для магнитной напряженности результаты могут считаться аналогичными).

Мощность P излучения в любой точке пропорциональна осредненному (за период T) квадрату колебаний напряженности E(t), что для гармонической волны дает [17]:

$$P \sim \frac{1}{T}\int_0^T [E_0\cos(\omega t)]^2 dt = \frac{1}{2}E_0^2, \qquad (1.6)$$

Для гармонического колебания мощность пропорциональна квадрату амплитуды.

В реальности важна энергия (или мощность), собираемая приемным устройством с единицы поверхности (либо с единицы длины антенны). Например, для оптики характерны показатели потока и освещенности, основанные на подсчете энергии, приходящейся на единицу полезной площади приемника. В случае сферической волны (рис. 1.4) мощность распределяется по поверхности сферы. Следовательно, по мере удаления от источника удельная мощность волны убывает пропорционально квадрату расстояния. Такое убывание удельной мощности (энергии) волны не связано с какими-либо потерями от взаимодействия с веществом, а обусловлено лишь геометрией ее распространения. Для плоской волны этим эффектом пренебрегают.

Плоская волна, близкая к идеализированному представлению, существует, например, в волноводах либо в природных каналах распространения излучения, представляющих собой «естественный волновод».

При прохождении электромагнитной волны через вещество имеют место активные потери энергии, связанные с передачей энергии частицам вещества (поглощение, рассеяние). Приблизительная модель ослабления энергии волны при прохождении через вещество описывается формулой Бугера–Ламберта–Бера. В этой формуле обычно фигурирует интенсивность излучения I, которая в итоге пропорциональна мощности P или энергии, то есть квадрату амплитуды:

$$\frac{E_2^2}{E_1^2} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2}{I_1} = e^{-kd}. \qquad (1.7)$$

Здесь e – основание натуральных логарифмов; d – длина пробега волны в веществе (толщина проходимого слоя); k – удельный коэффициент ослабления энергии волны, зависящий от конкретного вещества и длины волны λ; E – амплитуда сигнала (электрическая напряженность); P – мощность; I – интенсивность. Индексы «1» и «2» соответствуют параметрам волны до входа в вещество и после прохождения слоя вещества.

Для электромагнитного поля справедлив принцип суперпозиции, то есть при суммировании в некой точке (x, y, z) пространства излучения от нескольких источников складываются. Иными словами, в каждой точке пространства мы можем суммировать мгновенные значения напряженности электромагнитных волн, пришедших от разных источников. Причем это справедливо как для гармонической, так и негармонической волны более общего вида:

$$E_{sum}(t, x, y, z) = E_1(t, x, y, z) + E_2(t, x, y, z) + E_3(t, x, y, z) + \ldots \quad (1.8)$$

Для частного случая гармонических волн одинаковой частоты (но, возможно, с различными амплитудами и фазами) такой принцип сум-

мирования колебаний особенно удобен, так как позволяет применять правила алгебраического сложения с использованием тригонометрических функций.

Отметим, что гармоническая волна строго определенной частоты называется монохроматической (этот термин пришел из оптики). Несколько гармонических волн одинаковой частоты, сохраняющих постоянную разность фаз, называются когерентными. Принцип сложения когерентных волн широко используется в технических устройствах и соответствующих расчетах.

На практике далеко не всегда приходится иметь дело с монохроматическими волнами. Например, в оптике белый свет содержит в себе колебания различных частот; модулированные радиоволны не являются строго монохроматическими. Но и в этом случае расчеты можно свести к операциям над гармоническими колебаниями, если воспользоваться математической абстракцией, именуемой гармоническим рядом Фурье (для непериодических сигналов – интегралом Фурье).

В основе такого представления (математического ряда Фурье) лежит формальное разложение произвольной периодической функции на элементарные составляющие – гармоники, представляющие собой тригонометрические функции, ортогональные одна другой на выбранном периоде. Самое простое представление ряда Фурье использует угловой аргумент в пределах от 0 до 2π радиан, то есть это «разложение на одной окружности». В более сложных случаях в качестве аргумента может выступать время или пространственная координата, перемасштабируемая к условному периоду 0–2π.

Ниже приведена одна из форм записи гармонического ряда Фурье (для периода 0–2π):

$$F(y) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(ny) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(ny), \qquad (1.9)$$

$$y = 0 \ldots 2\pi, \qquad (1.10)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} F(y)\cos(ny)\,dy; \quad n = 0, 1, 2, \ldots \qquad (1.11)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} F(y)\sin(ny)\,dy; \quad n = 1, 2, \ldots \qquad (1.12)$$

Распространены и другие формы ряда Фурье, например, сумма только синусоид или только косинусоид с использованием фаз в тригонометрических выражениях, а также комплексная форма записи. Все эти формы записи идентичны по сути.

Тригонометрические составляющие ряда называются гармониками, а коэффициенты a_n, b_n – их амплитудами. Для исследования электромагнитных волн такие гармоники имеют условно-физический

смысл: элементарные гармонические составляющие, из которых состоит суммарное колебание более сложной формы. Подчеркнем: «как бы состоит», ибо все-таки это некоторая условность, а не прямой физический факт.

Так, для нашего конкретного случая периодических колебаний, когда в качестве аргумента выступает время t, разложение произвольного сигнала F(t) в ряд Фурье делается следующим образом:

– выбирается период T рассматриваемого сигнала (или назначается, чтобы рассматриваемая функция формально считалась периодической): t = 0, ... , T;

– определяется круговая частота ω первой гармоники:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \qquad (1.13)$$

Тогда наш сигнал F(t) на интервале t = 0, ... T представляется в виде:

$$F(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t), \qquad (1.14)$$

где амплитуды гармоник находятся так:

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T F(t)\cos(n\omega t)dt; \quad n = 0, 1, 2 \ldots \qquad (1.15)$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T F(t)\sin(n\omega t)dt; \quad n = 1, 2 \ldots \qquad (1.16)$$

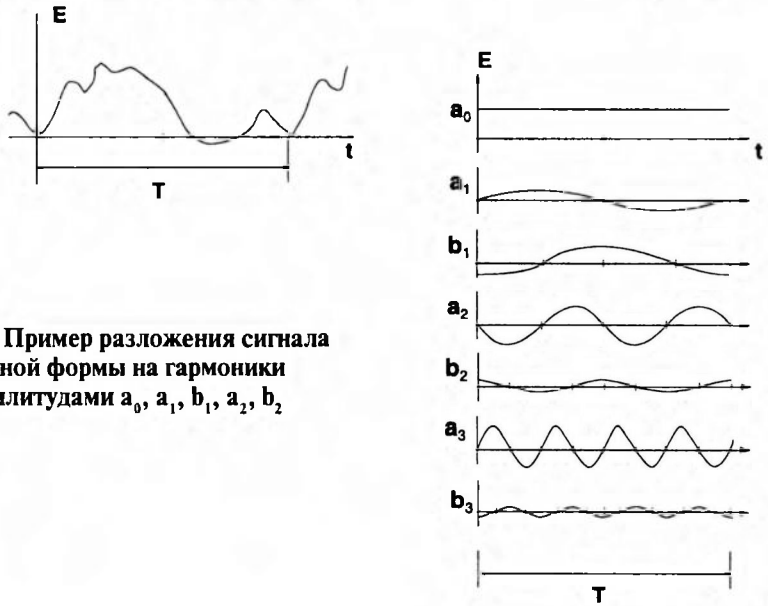


Рис. 1.5. Пример разложения сигнала сложной формы на гармоники с амплитудами a_0, a_1, b_1, a_2, b_2

На рис. 1.5 показан пример разложения сигнала сложной формы (который полагается периодическим) на сумму гармоник.

Гармоники складываются алгебраически для получения суммарного колебания сложной формы, а энергии (мощности) складываются арифметически как квадраты амплитуд отдельных гармоник (это следует из ортогональности тригонометрических функций ряда Фурье):

$$P_{sum} \sim \frac{1}{4} a_0^2 + a_1^2 + b_1^2 + a_2^2 + b_2^2 + \ldots \qquad (1.17)$$

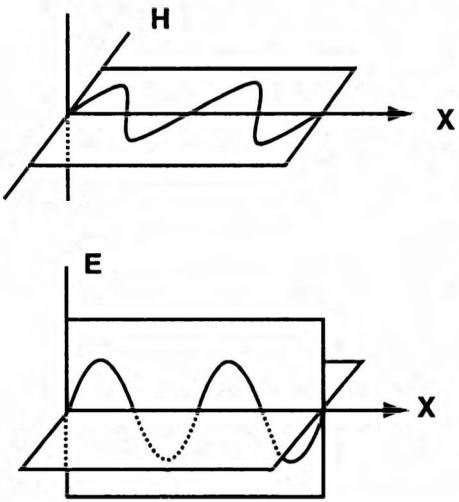


Рис. 1.6. Плоскополяризованная волна

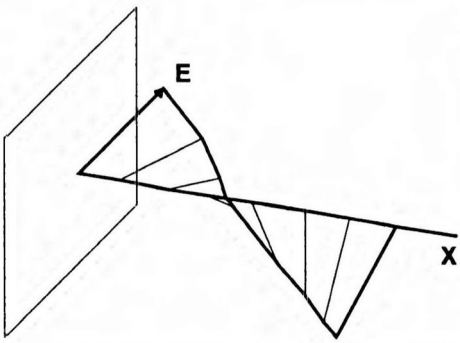


Рис. 1.7. Вращение плоскости поляризации

Представление сигнала в виде суммы гармоник используется при рассмотрении прохождения немонохромных волн через вещество, физические свойства которого различны для колебаний разных частот.

Важным свойством электромагнитных волн является поляризация. Поляризация трактуется как направление пары векторов E, H (электрической и магнитной напряженностей) в плоскости волнового фронта.

Плоская волна называется линейно поляризованной, если колебания вектора E (или H) происходят в одной плоскости (рис. 1.6).

Если же плоскость колебаний вектора E поворачивается по мере распространения волны, такая волна называется циркулярно поляризованной (или волной с эллиптической поляризацией). Рис. 1.7 иллюстрирует вращение плоскости вектора E.

Если амплитуда вектора E не меняется при его вращения, этот частный вид поляризации называется круговой. Если же при вращении меняется еще и амплитуда вектора E (и H тоже), то это эллиптическая поляризация. Формально эллиптическую поляризацию можно представить как мгновенную сумму двух гармонических колебаний – E_1 и E_2 (соответственно H_1, H_2), расположенных во взаимно

перпендикулярных плоскостях: эти колебания различны по амплитуде и имеют постоянный сдвиг фаз (вот нам и пригодилось сложение гармонических колебаний, рассмотренное выше).

Естественный свет является неполяризованным (или хаотически поляризованным), поскольку мгновенное направление вектора E в каждой точке меняется хаотически.

Из неполяризованных или эллиптически поляризованных колебаний можно выделить линейно поляризованное излучение, если на пути распространения волны поставить специальный фильтр-поляризатор. Такой фильтр пропустит волну с определенным направлением поляризации (рис. 1.8).

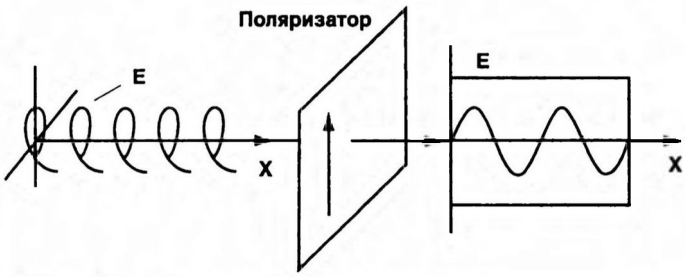


Рис. 1.8. Прохождение неполяризованного света через поляризатор

Таким образом, линейно поляризованным называется свет, у которого направления колебаний электрического и магнитного векторов в любой точке пространства остаются неизменными с течением времени. Поляризованным по кругу — свет, у которого электрический и магнитный векторы в любой точке пространства равномерно вращаются, а концы векторов описывают окружности. Эллиптически поляризованным — свет, у которого электрический и магнитный векторы в любой точке пространства вращаются, а концы векторов описывают эллипсы.

Как сказано выше, свойство света, характеризующееся пространственно-временной упорядоченностью ориентации магнитного и электрического векторов, называется поляризацией света.

По своей природе поляризованный свет является элементарным: монохроматический луч поляризованного света не разлагается на составляющие. Работа с поляризованным светом в ряде случаев проще, чем с естественным, у которого магнитный и электрический векторы хаотически меняют свое направление.

Плоскостью поляризации называется плоскость, проходящая через электрический вектор и направление распространения электромагнитной волны.

Естественный свет, отраженный от гладко полированной поверхности диэлектрика, частично или полностью поляризован. Д. Брюстер установил (1815 г.) закон поляризации света при отражении. При его

падении на поверхность среды под углом i, когда tg i = n (n – показатель преломления среды), отраженный свет полностью поляризован, при этом угол между отраженным и преломленным лучами равен 90°. Поляризация при отражении всегда сопровождается наличием преломленного луча.

Угол i падения луча, при котором имеет место полная поляризация отраженного луча, называется *углом полной поляризации,* или углом Брюстера. Угол Брюстера различен для разных участков спектра, так как показатель преломления среды зависит от длины волны.

Если линейно-поляризованный свет поляризован перпендикулярно к плоскости падения и падает на оптически прозрачную среду (например, стекло) под углом полной поляризации, то свет проходит среду с минимальными потерями. Это явление используется в газоразрядных трубках лазеров, где для уменьшения потерь на отражение, связанных с многократным прохождением лучом света разделов «стекло–воздух» в оптическом резонаторе, «окна» устанавливаются под углом Брюстера, называемые *окна Брюстера* (см. п. 1.5). При этом выходящий из лазера свет линейно поляризован, что очень удобно при использовании лазеров в светодальномерах.

На поверхности металлов, даже очень хорошо отполированных, поляризации света нет; падающая волна распадается на отраженную и проникающую внутрь – в металл. Величина прошедшей через металл световой энергии исчезающе мала, поглощенная часть энергии превращается в теплоту. Можно считать, что в металле нет преломленной волны, а следовательно, и отраженная волна (для естественного света) не может быть поляризована, так как поляризация возникает от неодинакового распределения компонентов электрического вектора между отраженными и преломленными волнами. Если на металл падает плоская линейно-поляризованная волна света, то в отличие от прозрачного диэлектрика, при отражении от которого происходит поворот плоскости поляризации, отраженные составляющие электрического и магнитного векторов приобретают относительную разность фаз Δ, и в общем случае свет будет эллиптически поляризован. Отраженная волна останется линейно-поляризованной, если разность фаз $\Delta = 0$ или $\Delta = \pi$, что будет иметь место при падении линейно-поляризованного света по нормали к отражающей поверхности металла. Это явление используется в отражателях для светодальномеров.

Оптические устройства, преобразующие проходящий через них естественный свет в поляризованный, называют поляризаторами. Поляризатор разделяет первоначальный пучок естественного света на две компоненты: обыкновенный и необыкновенный лучи, имеющие разную скорость распространения и колебания во взаимно-перпендикулярных направлениях. Поляризатор пропускает один из лучей и поглощает или отклоняет другой.

Для поляризаторов, основанных на двойном лучепреломлении, применяют двойные или одинарные призмы из исландского шпата или кварца. В двойных призмах (Франка—Риттера, Николя, Гласа—Томпсона и др.) обыкновенный луч претерпевает на поверхности раздела между призмами полное внутреннее отражение и отводится в сторону. Необыкновенный же луч проходит сквозь обе призмы и становится линейно поляризованным. Плоскостью поляризации обычно считается плоскость, проходящая через оптическую ось кристалла и направление колебаний необыкновенного луча.

Поляризационные призмы обладают высоким коэффициентом пропускания и почти полностью поляризуют свет. Их недостатки: малая входная площадь призмы и сравнительно малый (до 15°) апертурный угол поляризации. В связи с этим призмы нужно устанавливать в параллельном световом потоке, что не всегда удобно в конструктивном отношении.

В некоторых узлах геодезических приборов применяют поляризационные пластинки из двулучепреломляющих кристаллов с разностью хода между обыкновенным и необыкновенным лучами в $\lambda/4$ и $\lambda/2$ длины волны, называемые соответственно четвертьволновыми и полуволновыми пластинками. Их изготавливают из кварца, слюды, селенита и др. Необходимая разность хода лучей достигается подбором толщины пластинки. Так, пластинка из кварца, соответствующая $\lambda/4$ для желтого света, должна иметь толщину около 15 мкм, а из слюды — около 36 мкм. Изготовлять и эксплуатировать такие тонкие пластинки неудобно, поэтому на практике используют четвертьволновые пластинки, дающие разность хода лучей $(N+1/4)\lambda$, где N — целое число.

Если на пластинку в $\lambda/4$ поляризованный свет падает по нормали линейно так, что главная оптическая ось пластинки и плоскость поляризации падающего луча составляют между собой угол 45°, то свет, вышедший из пластинки, становится поляризованным по кругу. Наоборот, эта же пластинка может превратить свет, поляризованный по кругу, в линейно поляризованный. Если через четвертьволновую пластинку пропустить дважды (в прямом и обратном направлениях) один и тот же поляризованный свет, то плоскость поляризации светового потока повернется на 90°.

Для получения поляризованного света в геодезической технике используют поляроиды, представляющие собой слой (или срез) однообразно ориентированных кристаллов, обладающих дихроизмом, т. е. явлением различного поглощения лучей с различным направлением поляризации, нанесенных на прозрачную основу. Дихроизмом обладают многие вещества, и среди них — йодистый хинин (геропатит), названный по имени английского химика Геропата (1850 г.). Геропатит — это мельчайшие кристаллы, имеющие форму иголок, причем ось наибольшего поглощения света в них совпадает с осью иглы. Для полу-

чения поляроида массу геропатита наносят на подогретую до состояния размягчения поливиниловую пленку, а затем быстро растягивают ее в длину в 3–5 раз. При растяжении игольчатые кристаллы геропатита самоориентируются в направлении растяжения пленки. Высушенная пленка заклеивается между двумя защитными стеклами, предохраняющими ее от влаги.

Кроме геропатитовых поляроидов известны и другие, состоящие из дихроичных молекул, «выстроенных» в ряд. Преимущество поляроидов: удобная форма; большие размеры (до 300 мм в диаметре); больший, чем у призм, апертурный угол поляризации и дешевизна изготовления. Недостатки: несколько большее, чем у призм, поглощение света и неодинаковая степень поляризации в пределах видимой области спектра. Такие поляроиды не выдерживают нагревание более 80 °С.

Пропускная способность поляризующих устройств для естественного света не превышает 50 %. С учетом поглощения в поляризаторе (как темном фильтре) и отражения на разделах стекло–воздух пропускная способность поляризующих призм из исландского шпата составляет 42–46 %, а поляроидов — 32–40 %.

В измерительных приборах гармоническая волна часто модулируется колебаниями другой (более низкой) частоты. Термин «модуляция» означает, что параметры основной волны (амплитуда, частота или фаза) меняются в соответствии с модулирующим сигналом более низкой частоты. В общем случае модулирующий сигнал не обязательно гармонический. Основной сигнал при этом называется несущим.

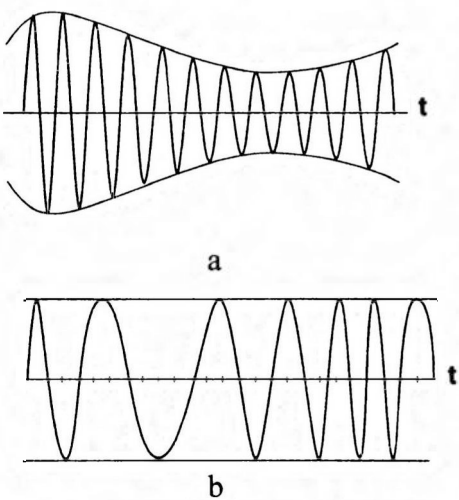


Рис. 1.9. Амплитудная (a) и частотная (b) модуляция

Если модулирующий сигнал воздействует на амплитуду несущего, имеет место амплитудная модуляция (рис. 1.9, a). Если модулирующий сигнал воздействует на частоту или фазу несущего, имеет место частотная или фазовая модуляция (рис. 1.9, b). На практике довольно трудно отличить фазовую модуляцию от частотной. Указанные виды модуляции схематически изображены на рис. 1.9.

Часто для измерения расстояния используется разность фаз когерентных волн, отразившихся от разных объектов. Поскольку разность фаз связана с «разностью хода» сопоставляемых волн, т. е. с разностью проходимых электро-

магнитной волной (в частности, светом) расстояний, то по ней можно судить о линейных расстояниях. Саму разность фаз можно выявить с помощью интерферометров – приборов, регистрирующих картину сложения разнофазных когерентных колебаний. Колебания с высокой частотой пригодны для интерферометрических измерений малых расстояний (сопоставимых с длиной волны), а колебания низкой частоты применяются для измерения больших расстояний. В случаях, когда в качестве несущей волны используется колебание с высокой частотой, а измерить требуется расстояния, значительно превышающие длину волны несущей, применяется модуляция несущей волны низкочастотными колебаниями, и затем сопоставляются низкочастотные колебания, выделяемые из принятого сигнала специальными детекторами.

1.2. Распространение радиоволн

Законы распространения электромагнитных колебаний тесно связаны с электрическими и магнитными свойствами среды, которые характеризуются диэлектрической проницаемостью, измеряемой в фарадах на метр (Ф/м), магнитной проницаемостью, измеряемой в генри на метр (Г/м), и удельной электрической проводимостью, измеряемой в сименсах на метр (См/м).

Если бы Земля была идеальным проводником и ее поверхность представляла собой плоскость, а атмосфера, в которой распространяются электромагнитные волны, была идеальным диэлектриком, то распространение электромагнитных волн проходило бы без поглощения, так как идеальный проводник без потерь отражает электромагнитную волну, а в идеальном диэлектрике отсутствует поглощение.

В реальных условиях в приземном слое атмосферы распространение электромагнитных волн отличается от идеального. Электрические параметры земной атмосферы и поверхности Земли изменяются случайным образом не только в каждой точке пространства, но и во времени. Поверхность Земли имеет сложную форму и характеризуется чрезвычайным разнообразием физических свойств. Участки суши с различным рельефом и разнообразным растительным покровом, водные пространства, населенные пункты и искусственные сооружения характеризуются различными электрическими параметрами, по-разному влияющими на распространение электромагнитных волн.

В общем случае электрические параметры зависят как от свойств среды, так и от длины волны взаимодействующих со средой электромагнитных колебаний.

Так, для длинных волн (радиоволны) почвы по электрическим параметрам приближаются к идеальному проводнику. Поэтому длинные волны отражаются от земли без заметного поглощения. При уменьшении длины волны проводимость почвы уменьшается, и почва по своим свойствам приближается к диэлектрику. Поэтому короткие волны, рас-

пространяющиеся вблизи поверхности Земли, заметно поглощаются уже на расстоянии нескольких десятков километров. Поглощение радиоволн сильнее над влажной почвой и над морем. Однако поглощение становится существенным лишь при распространении радиоволн над поверхностью Земли на расстоянии длины волны. При прохождении на больших расстояниях от поверхности радиоволны практически не испытывают поглощения.

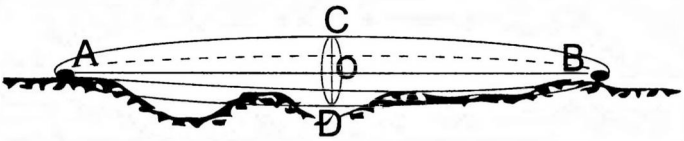


Рис. 1.10. Область распространения радиоволн

Угловая расходимость радиоволн во многом зависит от диаграммы направленности антенны. При этом существенную роль играет лишь некоторая ограниченная область, внутри которой распространяются волны, наиболее эффективно действующие на приемное устройство. Эта область заключена внутри эллипсоида вращения с фокусами в точках A и B, в которых расположены приемная и передающая антенны. Малая полуось эллипсоида (рис. 1.10) имеет длину порядка

$$1/2\sqrt{\lambda/D},$$

где D – расстояние между точками A и B, а λ – длина волны.

Влияние Земли сказывается лишь тогда, когда часть земной поверхности оказывается внутри этого эллипса, что имеет место, как правило, при распространении длинных и средних волн. При этом значительное влияние на распространение оказывают участки, непосредственно прилегающие к передающему и приемному устройствам.

Радиоволны, падая на поверхность Земли, вызывают в почве (или воде) колебания электрических зарядов (электронов, ионов), вследствие чего возникают вторичные волны той же частоты. Амплитуда и фаза вторичной волны зависят от соотношения вынужденной и собственной частоты колебаний заряженных частиц данной среды.

При сложении падающей и вторичной волн образуется результирующая волна, параметры которой будут отличаться от параметров падающей волны.

Так как почва и вода являются полупроводящими средами, то фронт волны у поверхности загибается в сторону Земли.

При распространении на большие расстояния необходимо также учитывать дифракцию радиоволн вокруг сферической поверхности Земли. Явление дифракции заключается в том, что радиоволна за счет наложения колебаний вторичной волны огибает встречающиеся препятствия и сферическую поверхность Земли. Во всех случаях дифракция сопровождается потерей энергии колебаний, которая убывает с

расстоянием по экспоненциальному закону, т. е. гораздо быстрее, чем при распространении над плоской поверхностью.

Поглощение энергии и дифракция имеют место также при прохождении радиоволн в залесненной местности, где препятствием являются деревья, а также вблизи искусственных сооружений. В этом случае короткие волны будут испытывать в большей степени поглощение, а длинные – дифракцию. При встрече электромагнитных волн с земной или водной поверхностью происходит отражение и преломление волны. Для всех электромагнитных волн, падающих на плоскую отражающую поверхность, можно использовать законы геометрической оптики:

$$\varphi = \varphi_1,$$

$$\sin\varphi/\sin\phi = n/n_1, \qquad (1.18)$$

где φ – угол падения; φ_1 – угол отражения; ϕ – угол преломления; n_1 и n – показатели преломления сред.

Характер отражения волн зависит от неровностей отражающей поверхности.

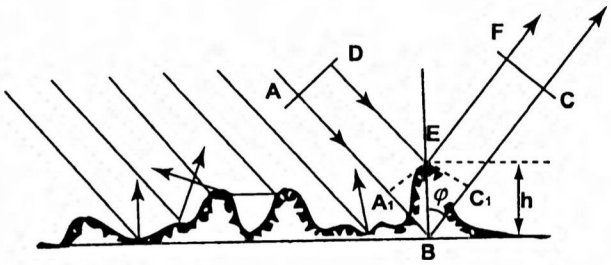


Рис. 1.11. Диффузное отражение электромагнитных волн

При этом различают зеркальное и диффузное отражение. Понятия «гладкая» или «шероховатая» поверхность определяются соотношением длины волны и высоты неровностей, а также углом падения. Так, холмистую поверхность с высотами рельефа порядка нескольких сотен метров для сверхдлинных волн можно считать гладкой, а для коротких волн чистое поле, покрытое травой, является шероховатым. Волны, отражаясь от шероховатой поверхности, испытывают диффузное отражение. В этом случае колебания отражаются во всех направлениях (рис. 1.11). Разность геометрических путей для луча ABC, отраженного нижним уровнем препятствия, и луча DEF, отраженного от верхней точки E препятствия, равна $A_1BC_1 = 2h \cdot \cos\varphi$, а разность фаз колебаний на линии FC (фронт отраженной волны), перпендикулярной фронту AD падающей волны, будет:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} A_1BC_1 = \frac{4\pi h\cos\varphi}{\lambda}. \qquad (1.19)$$

При зеркальном отражении радиоволны достигают антенны двумя путями: по прямой AB (рис. 1.12) и в результате отражения от некоторой точки C по ломаной ACB.

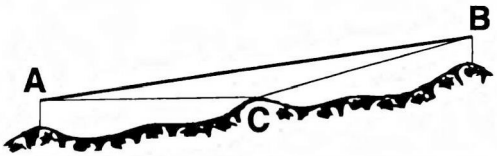


Рис. 1.12. Зеркальное отражение электромагнитной волны

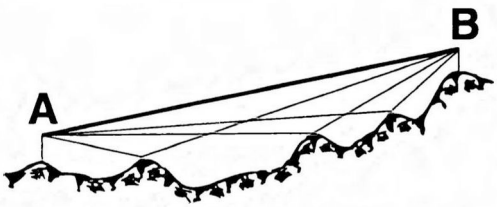


Рис. 1.13. Зеркальное отражение электромагнитной волны от нескольких точек трассы

На трассах со сложным рельефом будет происходить отражение от нескольких точек трассы (рис. 1.13).

При диффузном отражении волны достигают приемника различными путями. Однако суммарное искажение при диффузном отражении бывает небольшим вследствие случайного характера в распределении фаз отраженных колебаний и их незначительных амплитуд.

Как уже отмечалось ранее, при прохождении в атмосфере наблюдается ослабление энергии электромагнитных колебаний, определяющее дальность действия приборов.

Заметное ослабление испытывают дециметровые и более короткие волны и, в особенности, световые. Основной причиной ослабления электромагнитных колебаний является поглощение и рассеяние их гидрометеорами (дождь, снег, туман, град, облака). Поглощение возникает из-за тепловых потерь, возникающих в капельках воды за счет наведения в них токов проводимости. Рассеяние обусловлено излучением капельками вторичных колебаний, часть энергии которых направлена навстречу распространяющимся основным колебаниям. Миллиметровые и световые колебания кроме того испытывают добавочное рассеяние и поглощение молекулами водяного пара и кислорода. Наибольшее поглощение происходит тогда, когда частота электромагнитных колебаний совпадает с собственной частотой молекул (селективное поглощение). Твердые частицы, взвешенные в воздухе, также вызывают значительное рассеяние коротковолнового излучения. Рассеяние происходит также и на неоднородностях атмосферы.

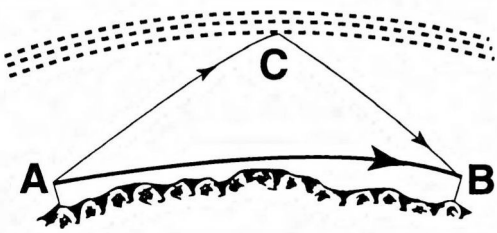


Рис. 1.14. Поверхностные электромагнитные волны

Длинные электромагнитные волны при распространении в атмосфере могут проходить над поверхностью Земли по кратчайшему расстоянию AB (рис. 1.14). Это так называемые поверхностные волны. Кроме того, они могут испытывать отражение от верхних ионизированных слоев атмосферы,

находящихся на высоте более 60 км (пространственные волны). Так как ионосфера обладает заметной электрической проводимостью, то в ней изменяются направление и скорость распространения электромагнитных колебаний, что и вызывает преломление и отражение попадающих в нее электромагнитных волн.

Наличие ионизированного слоя приводит к тому, что волны длиннее 10 м не могут выйти за пределы земной атмосферы, тогда как для более коротких радиоволн и волн оптического диапазона ионосфера является прозрачной средой.

Электрические параметры ионосферы зависят от высоты, времени года и суток, а также от солнечной активности. При этом образуются слои, ионная концентрация в которых возрастает по мере увеличения высоты слоя. В результате однократного или многократного отражения от ионосферы увеличивается дальность распространения радиоволн. В тех точках, где одновременно принимаются прямая и отраженная волны, происходит искажение амплитуды и фазы колебаний поверхностной волны. Отражение приводит к потере мощности колебаний и искажению формы импульсов. Так как ионизированные слои атмосферы имеют неопределенные параметры, то учет искажений довольно сложен.

Длинные радиоволны вследствие дифракции огибают Землю и отражаются от относительно устойчивых слоев атмосферы, что обеспечивает постоянство условий распространения. Поэтому они распространяются далеко за пределы прямой видимости (до 3000 км и более). Недостатком этого диапазона является высокий уровень атмосферных помех.

Средние волны испытывают резкие суточные колебания напряженности в месте приема. В дневное время преобладает поверхностная волна, которая частично огибает земную поверхность, но вследствие значительного поглощения полупроводящей поверхностью Земли дальность ее распространения не превышает 1000 км. В ночное время усиливаются отраженные от ионосферы волны, фаза колебаний которых все время меняется вследствие флуктуаций ионосферной электронной концентрации.

Короткие волны распространяются на дальние расстояния главным образом за счет переотражения ионосферой, так как поверхностная волна вследствие значительного поглощения земной поверхностью быстро затухает. Поле таких волн неустойчиво из-за изменений в ионосфере, приводящих к замиранию сигналов. Для этого диапазона характерно наличие зоны молчания на некотором расстоянии от передатчика, где уверенный прием невозможен. Это объясняется невозможностью попадания в точку приема отраженной волны и быстрым затуханием поверхностной волны.

Заметное отражение от ионосферы наблюдается только для ультракоротких волн в диапазоне длиннее 4–5 м. Более короткие волны не отражаются от ионосферы, и их распространение почти прямолинейно. Незначительное огибание поверхности Земли обусловлено рефракцией радиоволн в атмосфере и в меньшей степени (только метровые волны) – дифракцией.

Волны светового диапазона распространяются почти прямолинейно. В приземном слое атмосферы их путь искривляется за счет влияния рефракции. Кроме того, световые волны испытывают поглощение и рассеяние (см. гл. 8). В этом диапазоне достигается наибольшая точность геодезических наземных измерений. В настоящее время во многих геодезических приборах в качестве источников излучения используются лазеры, расходимость излучения которых очень мала. Непосредственное влияние поверхности земли в этом случае не сказывается, так как световой пучок проходит от нее на значительном (по сравнению с длиной волны) расстоянии.

1.3. Скорость света. Основные законы распространения света

Свет представляет собой электромагнитное излучение оптического диапазона [17]. Скорость света в соответствии с теорией Максвелла (1831–1879), зависит от свойств среды, в которой он распространяется. Излучение света сопровождается переносом энергии. По современной классификации оптический диапазон занимает полосу частот $3 \cdot 10^{15}$ – $3 \cdot 10^{12}$ Гц, что соответствует длинам волн 0,1–100 мкм. Видимый диапазон ограничен полосой частот $4 \cdot 10^{14}$ – $7{,}5 \cdot 10^{14}$ Гц, что соответствует приблизительно диапазону длин волн 0,40–0,75 мкм.

Современное представление о свойствах и природе света исходит из предположения о единстве его волновых и квантовых свойств. Основоположником волновой теории света является Х. Гюйгенс (1629–1695). Согласно его теории, свет рассматривается как волновое движение, распространяющееся в особой упругой среде – эфире. Каждая точка эфира, до которой доходит световая волна, становится самостоятельным центром возбуждения вторичных элементарных световых волн.

Основоположник корпускулярной природы света – И. Ньютон (1643–1727). По его теории, свет представляет собой поток мельчайших частиц – корпускул, испускаемых источником света прямолинейно во все стороны.

Квантовая природа света была сформулирована М. Планком (1858–1947), развита далее А. Эйнштейном (1879–1955) и другими учеными. Согласно этой теории, основанной на прерывистости всех процессов, излучение и поглощение световой энергии может происходить только определенными порциями – квантами, кратными некоторому

значению hν, постоянному для данной частоты излучения. По М. Планку, энергия, содержащаяся в одном кванте, определяется как $E = h\nu$, где $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с (постоянная Планка); ν – частота колебаний света, Гц.

В 1905 г. А. Эйнштейн, развивая теорию Планка, изложил фотонную теорию, согласно которой световое излучение рассматривается как поток фотонов, являющихся частицами материи, обладающими энергией и импульсом (количеством движения). Соединение корпускулярных и волновых свойств света позволило Эйнштейну объяснить такие несовместимые для того времени явления, как интерференция света, фотоэффект и другие сложные явления физической оптики. Этот взгляд на природу света оправдывает применение на практике как квантовой, так и волновой (электромагнитной) теории света в зависимости от того, какие свойства преобладают в используемом световом явлении. Полное раскрытие двойственного характера природы света – задача современной науки.

Значителен вклад русских ученых в формирование взглядов на природу и свойства света. В 1889 г. А.Г. Столетов (1839–1896) открыл фотоэлектрический эффект, сущность которого состоит в том, что некоторые вещества при облучении их светом излучают электроны. А.Г. Столетовым впервые в мире был создан фотоэлемент – прибор для преобразования световой энергии в электрическую. В наше время немыслимо развитие таких отраслей науки и техники, как автоматика, телемеханика, телевидение и других, без использования фотоэффекта.

Большое значение имеет открытие П.Н. Лебедевым (1866–1912) светового давления, что имело огромное значение для подтверждения электромагнитной теории света. Работы П.Н. Лебедева доказали наличие у электромагнитных волн не только энергии, но и импульса и массы, и послужили исходным пунктом для установления соотношения между массой и энергией.

Существенное практическое значение имеют работы С.И. Вавилова (1891–1951) в области люминесцентного свечения.

Академики Н.Г. Басов и А.М. Прохоров – создатели первого молекулярного квантового генератора на аммиаке (1954). Их работа явилась основой для осуществления принципов квантового усиления и генерации электромагнитных волн оптического диапазона, что привело к созданию лазера на рубине (1960), газового лазера (1961) и, наконец, полупроводникового лазера (1962).

При использовании электромагнитных волн в геодезии, в частности для измерения расстояний по времени и скорости распространения света, большое значение имеет знание скорости в воздушной среде в момент измерений. Скорость света в свободном пространстве (вакууме) $c = 299\,792\,458$ м/с.

В физике для характеристики скорости пользуются термином «фазовая скорость», имея в виду скорость, с которой передается фаза колебаний от одной точки пространства к другой. Фазовая скорость в вакууме не зависит от частоты колебаний; при распространении же колебаний в среде – зависит от частоты (длины волны). Это свойство электромагнитных волн, называемое дисперсией, особенно резко выражено у световых волн. Скорость света в воздухе уменьшается с уменьшением длины волны. Так как при измерениях иногда пользуются смешанным по спектральному составу световым потоком, то вычисляют так называемую групповую скорость света (м/с):

$$v = c/n, \qquad (1.20)$$

где n – показатель преломления воздуха для групповой скорости света.

В зависимости от состояния воздушной среды при решении геодезических задач показатель преломления определяют из выражения:

$$n = 1 + \frac{(n_{0,760} - 1)P}{(1 + \alpha t)760} - \frac{55 \cdot 10^{-9}}{1 + \alpha t} e, \qquad (1.21)$$

где $n_{0,760}$ – показатель преломления для групповой скорости света при температуре воздуха t = 0 °С, давлении P = 760 мм рт. ст. и влажности e = 0 мм рт. ст.; $\alpha = 1/273$ – объемный коэффициент расширения воздуха.

В зависимости от длины волны света

$$n_{0,760} = 1 + [2876{,}04 + (48{,}86/\lambda_\nu^2) + (0{,}68/\lambda_\nu^4)]10^{-7}, \qquad (1.22)$$

где λ_ν – длина волны света, соответствующая максимуму спектральной чувствительности приемника излучения (мкм).

Волновые свойства света широко используются в геодезии при решении задач методами интерференции, дифракции, двойного лучепреломления и поляризации.

При объяснении основных законов распространения света используют понятия светящейся точки и светового луча. Светящейся точкой называют геометрическую точку, являющуюся источником световых колебаний. Световым лучом называют линию, по которой распространяется свет от источника. Раздел оптики, изучающий распространение света, пользуясь приведенными понятиями светящейся точки и светового луча, называют геометрической оптикой.

Геометрическая оптика базируется на следующих законах распространения света:

1) в однородной прозрачной среде свет распространяется прямолинейно;
2) лучи света распространяются независимо друг от друга;
3) лучи света могут отражаться, т. е. изменять первоначальное направление на обратное, на границе раздела двух сред. Отражение может быть правильным (зеркальным), если неровности на границе раздела двух сред меньше длины волны падающего света;

в этом случае виден сам источник света, а граница раздела не видна; угол i_1 падения луча равен по абсолютной величине углу i_2 отражения и противоположен по знаку. Отражение может быть неправильным (диффузным), если неровности граница раздела сред больше длины волны света. При диффузном отражении видна граница раздела, а источник света не виден. Угол падения и угол отражения при этом не равны друг другу и распределяются по закону случайных величин;

4) лучи света могут преломляться, т. е. изменять направление распространения на границе раздела двух сред, скорость распространения в которых различна. При этом отношение синуса угла падения $\sin i_1$ к синусу угла преломления $\sin i_2$ для данных двух сред есть величина постоянная и равная отношению показателей преломления n_1 и n_2. Для этих двух сред

$$\sin i_1/\sin i_2 = n_2/n_1. \qquad (1.23)$$

Показатели преломления сред обратно пропорциональны длинам волн в этих средах:

$$\lambda_1/\lambda_2 = n_2/n_1. \qquad (1.24)$$

Преломленный свет сохраняет ту же частоту колебаний, что и падающий. Среда с большим показателем преломления считается оптически более плотной.

Явление отражения сопровождается частичным, а иногда и полным внутренним отражением от границы раздела двух сред. Если луч переходит из среды оптически более плотной n в среду оптически менее плотную n_1', то угол преломления i′ будет больше угла падения i. Увеличивая угол падения i, можно получить такое значение угла преломления, при котором преломленный луч будет скользить вдоль поверхности раздела двух сред, образуя угол преломления $i' = 90°$. Тогда:

$$\sin i' = 1; \sin i = n'/n. \qquad (1.25)$$

Угол i′, определяемый соотношением (1.25), называют углом полного внутреннего отражения; преломление прекращается и остается лишь отраженный луч. При этом отражение происходит под углом, равным углу падения. Явление полного внутреннего отражения замечательно тем, что отраженный луч несет в себе полную энергию падающего луча. Поэтому полное внутреннее отражение широко используется в оптических геодезических приборах.

1.4. Интерференция и дифракция света

Интерференция – явление, возникающее при сложении двух и более световых волн и проявляющееся в том, что интенсивность результирующего колебания в зависимости от разности фаз складывающихся колебаний может быть больше или меньше суммы их интенсивностей. Это явление обусловлено волновой природой света.

Интерференция возникает в том случае, когда существует постоянное и неизменяющееся по времени (когерентное) соотношение между фазами световых колебаний. При этом периоды световых колебаний постоянны, а все изменения фазы, происходящие в одном источнике света, совершаются и в других. При интерференции происходит перераспределение световой энергии между различными точками, так как усиление света в одних точках пространства сопровождается ослаблением в других. Поэтому часто на практике для создания интерференции используют так называемую схему Юнга [19].

Пусть Q (рис. 1.15) – источник света, освещающий в диафрагме два точечных отверстия A_1 и A_2. В соответствии с принципом Гюйгенса каждое из отверстий, до которых дошла сферическая световая волна, можно рассматривать в качестве самостоятельного источника света, независимо излучающего вторичную сферическую световую волну. Поскольку расстояния L_1, L_2 и A_1A_2 неизменны, то вторичные световые волны когерентны, т. е. их колебания сдвинуты по фазе относительно друг друга на постоянную величину. Такие колебания будут интерферировать, и в плоскости экрана можно наблюдать интерференционную картину в виде чередующихся темных и светлых концентрических колец.

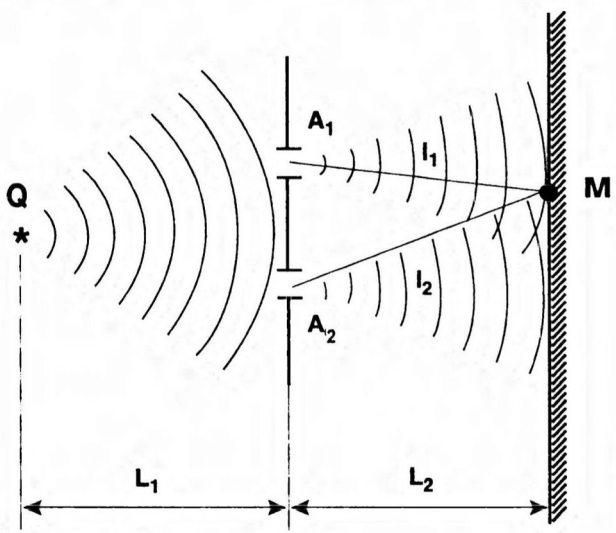


Рис. 1.15. Интерференция световых волн

Темные кольца соответствуют разности хода лучей для точки М на нечетное количество полуволн:

$$\Delta_T = l_2 - l_1 = (2n + 1)(\lambda/2), \qquad (1.26)$$

где l_1, l_2 – расстояния от точечных отверстий до точки М; n – целое число; λ – длина волны света.

Светлые кольца соответствуют разности хода лучей на четное количество полуволн:

$$\Delta_C = l_2 - l_1 = 2n(\lambda/2). \qquad (1.27)$$

Расстояние между серединами двух светлых или темных полос на экране называют *шириной полосы интерференции*. В общем случае это

величина переменная, зависящая от расстояния L_2 и удаления от центра интерференционной картины.

Наиболее ярким будет центральное пятно, называемое *нулевым максимумом*, менее ярким – первое, далее – второе и последующие кольца – максимумы первого, второго и т. д. порядков.

Дифракция света – явление отклонения световых лучей от прямолинейного направления при прохождении ими среды с резкими оптическими неоднородностями, а также при всяком ограничении световых пучков препятствиями. Дифракция обусловлена волновыми свойствами света.

При прохождении света сквозь щели и отверстия, а также при освещении точечным источником света непрозрачных препятствий, размеры которых соизмеримы с длиной волны света, на экране, установленном позади отверстий или препятствий, вместо четко разграниченных областей света и тени будет наблюдаться система максимумов и минимумов освещенности. Эти же явления возникают при прохождении света сквозь среду с резко выраженными неоднородностями показателя преломления. Наблюдаемая на экране система максимумов и минимумов обусловлена интерференцией дифрагирующих лучей.

Для объяснения явления дифракции света обычно применяется метод Френеля разделения фронта световой волны на зоны. Фронтом называют геометрическое место точек, до которых в данный момент дошла световая волна в одинаковой фазе колебаний.

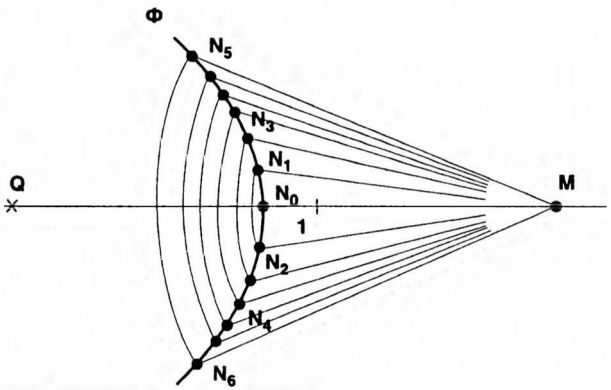


Рис. 1.16. Дифракция света

Пусть от точечного источника света Q (рис. 1.16) в однородной среде распространяется сферическая монохроматическая волна. Кривая Ф – положение, занимаемое фронтом волны в некоторый момент времени; М – произвольная точка перед фронтом волны. При прямолинейном распространении света по направлению QN_0M достаточно было бы поставить на пути луча в точке 1 малый экран, чтобы в точке М наблюдалась полная темнота. Но в точку М приходят и интерферируют волны не только от точки N_0, но и от всех других точек фронта, которые, по Френелю, рассматриваются как самостоятельные источники излучения. Проведем ряд сфер с центром в точке М радиусами, равными соответственно

$MN_1 = MN_0 + (1/2)\lambda$,
$MN_2 = MN_0 + 2(1/2)\lambda$,
$MN_3 = MN_0 + 3(1/2)\lambda$,
.....

Волны, приходящие в точку М от каждой четной зоны (рис. 1.16), сдвинуты на половину длины волны по отношению к волнам от каждой нечетной зоны. Колебания от каждой пары (четной и нечетной) смежных зон находятся в противоположных фазах, и поэтому суммарная амплитуда колебания, даваемая парой, равна разности амплитуд колебаний от каждой из зон в отдельности. Суммарная амплитуда А световой волны, приходящей в точку М от всех зон, равна разности двух сумм:

$$A = \sum A_ч - \sum A_н,$$

где $A_ч$ и $A_н$ – сумма амплитуд четных и нечетных зон.

При отклонении точки М от створа линии QN_0 изменяются условия интерференции и меняется суммарное значение амплитуды А. В случае, изображенном на рис. 1.16, дифракционная картина состоит из чередующихся светлых и темных концентрических колец.

Дифракционная картина зависит от длины волны, огибающей препятствия. Если использовать немонохроматический свет (белый), то дифракционные максимумы интенсивности для различной длины волны пространственно разойдутся, и возникнут дифракционные спектры.

Явления интерференции, и дифракции используются в инженерной геодезии для компарирования длины мерных приборов и разбивки створов при установке технологического оборудования в проектное положение.

1.5. Оптические детали, фотоприемники и устройства памяти, применяемые в геодезических приборах

Совокупность оптических деталей, установленных в положение, заданное расчетом и конструкцией, составляет оптическую систему прибора. В геодезических приборах используют следующие оптические детали: линзы, зеркала, призмы, клинья, светофильтры, дифракционные решетки и др.

Линзы. Линзами называют детали из оптически прозрачных материалов, ограниченных двумя преломляющими поверхностями, из которых хотя бы одна является поверхностью тела вращения. По преломляющему действию линзы делятся на положительные (собирательные) и отрицательные (рассеивающие). В свою очередь собирательные линзы делятся на двояковыпуклые и плосковыпуклые, а рассеивающие – на двояковогнутые, плосковогнутые и вогнутовыпуклые. Прямую, соединяющую центры сферических поверхностей линз, называют оптической осью. Радиус кривизны преломляющей поверхности, толщина и показатель преломления линзы определяют ее оптические свойства.

Величину, обратную заднему фокусному расстоянию, называют оптической силой линзы и определяют из выражения $\phi = 1/f$. Единицей оптической силы является *диоптрия* – оптическая сила линзы с фокусным расстоянием, равным 1 м.

В тех случаях, когда необходимо получить изображение в виде линии или полоски, а также равномерное бесструктурное изображение, применяют цилиндрические линзы (рис. 1.17), обладающие в двух взаимно перпендикулярных сечениях различными оптическими свойствами.

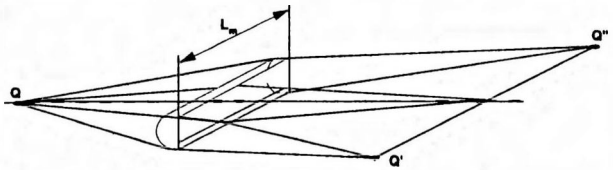


Рис. 1.17. Развертывание изображения точечного источника света в полосу с помощью цилиндрической линзы

Пусть свет от точечного источника Q, расположенного на конечном расстоянии, падает на линзу. Длина изображения Q′Q″ зависит от длины линзы Lm и линейного увеличения. Полоса Q′Q″ практически криволинейна и обращена выпуклостью к линзе. Если цилиндрическую линзу установить перед плоскостью предмета, то можно получить оптическое сопряжение предметов, расположенных на разных расстояниях друг от друга в разных сечениях. Положительная цилиндрическая линза, установленная вблизи плоскости изображения, вызывает ее сужение, а отрицательная – расширение.

Цилиндрические линзы применяют для развертки светового пучка в горизонтальной или вертикальной плоскости, а в некоторых светодальномерах – для устранения влияния фазовости поля на результаты измерений.

Аксиконы. Аксиконы представляют собой линзу, имеющую одну поверхность в виде плоскости, а другую – конической формы (рис. 1.18). Если поместить перед аксиконом точечный источник света Q, то лучи 2, выходящие под одним и тем же углом к оптической оси, будут одинаково преломляться и сойдутся на оптической оси в одной точке 3, где создадут слабое изображение. Лучи, выходящие от источника света под более острым углом, создадут изображение 1 на оптической оси, расположенное ближе к аксикону, а под менее острым углом – дальше от аксикона. Таким образом, на каком бы расстоянии от аксикона не

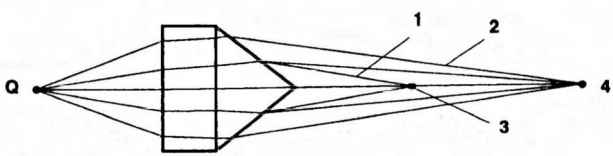


Рис. 1.18. Схема аксикона
1, 2 – лучи, идущие под разными углами к оптической оси аксикона; 3, 4 – изображения точечного источника Q, создаваемые аксиконом

был размещен источник света, позади него будет создан ряд светящихся изображений в виде линии. При использовании ярких источников света (лазеров) аксиконом можно задать световую линию, например, при измерениях створа; в зрительных трубах аксиконом можно получить изображение яркого источника света в плоскости перекрестия сетки нитей без всякой фокусировки. Аксикон устраняет ошибки, возникающие из-за различных дефектов в направляющих устройствах для перемещения фокусирующего компонента.

Призмы. Изменение направления оси системы при переходе от пространства предмета к пространству изображений, поступательное смещение оси системы, оборачивание изображений и целый ряд других задач требуют применения в оптической системе призм и зеркал. На рис. 1.19 изображена прямоугольная призма Дове со срезанной нерабочей частью. Лучи света S_1 и S_2, параллельные гипотенузной грани BC, преломляются на катетных гранях, отражаются от гипотенузной и выходят из призмы, не меняя первоначального направления. Если луч не параллелен грани BC (луч S_3), то он выйдет из призмы под углом преломления, равным углу падения луча на входной грани.

В оборачивающих системах, называемых призмами Порро, ход пучка не сохраняется в одной и той же плоскости (рис. 1.20). Система призм Порро I рода состоит из двух прямоугольных призм 1 и 2 с двумя отражениями, развернутых относительно друг друга на 90°. Такую систему используют для смещения оси луча по высоте и в горизонтальной плоскости.

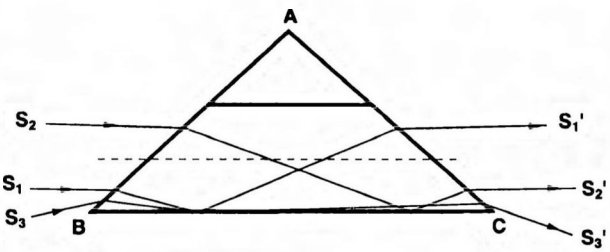


Рис. 1.19. Призма Дове

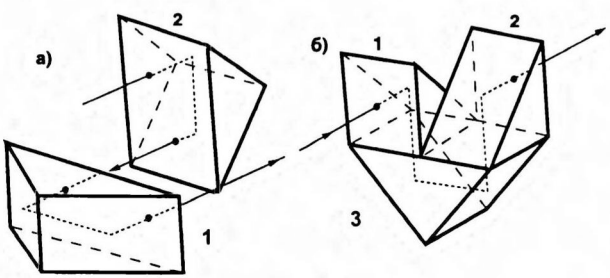


Рис. 1.20. Системы призм Порро
а – I рода; б – I I рода

Систему призм Порро II рода можно рассматривать как систему из четырех призм с одним отражением в каждой, или же как систему из трех призм, в которой две призмы — первая 1 и последняя 2 — имеют одно отражение, а средняя 3 — прямоугольная — два отражения.

Систему используют большей частью для отклонения оптической оси в горизонтальной плоскости.

В совокупности с объективом она дает прямое изображение. Призмы системы Порро применяют в зрительных тубах с прямым изображением.

Трипельпризма. Трипельпризма (уголковый отражатель) – четырехгранная стеклянная пирамида, на три грани которой, составляющие друг с другом прямые углы, нанесены зеркальные отражательные покрытия (рис. 1.21). Основное свойство таких призм заключается в том, что падающий на входную грань пучок световых лучей после отражения от зеркальных граней выходит из призмы параллельно падающему лучу, но в противоположном направлении.

Это свойство сохраняется и в том случае, если входная грань недостаточно точно ориентирована по отношению к источнику света, т.е. падение луча отличается от нормального на несколько градусов.



Рис. 1.21. Трипельпризма

Обычно грани призмы металлизируют, что устраняет деполяризацию света, возникающую при полном внутреннем отражении. Отражательная способность металлизированных трипельпризм составляет 60–65 %.

Расходимость отраженного пучка возрастает из-за дифракции и неточного изготовления трипельпризмы:

$$\theta_{отр} = \theta_0 + \theta_\delta + \theta_и,$$

где θ_0 – расходимость пучка на входе в трипельпризму; θ_δ и $\theta_и$ – составляющие угла расходимости отраженного пучка, обусловленные дифракцией и неточностью изготовления. Величину θ_δ можно определить из выражения:

$$\theta_\delta = \lambda/d\cos\beta,$$

где λ – длина волны падающего излучения; d – линейный размер входной грани одной трипельпризмы; β – угол между лучом и нормалью к отражателю.

Расходимость пучка из-за неточности изготовления трипельпризмы обычно увеличивается на 20–30″, но при тщательном их изготовлении эта величина может составлять 2–5″.

Трипельпризмы применяются в геодезических работах при выполнении светодальномерных измерений.

Клинья. Призму с малым преломляющим углом называют оптическим клином. Луч, проходящий через клин в плоскости главного

сечения, отклоняется клином к его основанию. Клинья применяют для получения и измерения малых углов отклонения луча. Систему из двух клиньев называют компенсатором и применяют в оптических теодолитах и точных нивелирах.

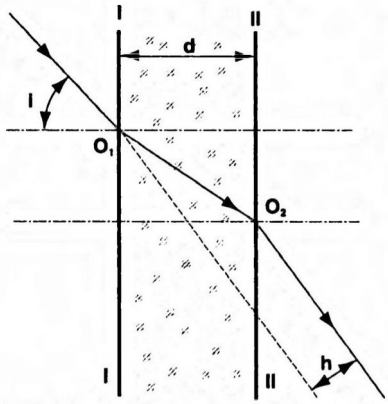


Рис. 1.22. Ход лучей в плоскопараллельной пластинке

Пластины плоскопараллельные. Прозрачное тело, ограниченное двумя параллельными гранями, называют плоскопараллельной пластиной (рис. 1.22). В оптической системе она располагается плоскими гранями перпендикулярно к оптической оси линзы.

Пучок света, падающий на грань плоскопараллельной пластинки под углом i, изменяет свое направление дважды: сначала преломившись на грани I-I (в точке O_1), а затем – на грани II-II (в точке O_2). В однородной среде такая пластинка сместит пучок света относительно первоначального направления на величину h параллельно ему. Величина смещения пучка зависит от толщины d пластинки и угла падения i.

Плоскопараллельная пластинка не искажает изображения, если находится на пути параллельных лучей. В сходящемся пучке пластинка вызывает аберрации. Плоскопараллельные пластинки применяют в точных нивелирах и оптических дальномерах.

Светопровод (рис. 1.23, а, б). Светопровод – стеклянный пруток круглого, прямоугольного или другого сечения с полированной боковой поверхностью и торцами. Для обеспечения полного внутреннего отражения светового пучка светопроводы изготавливают из материала, имеющего показатель преломления n_c, и покрывают оболочкой, имеющей показатель преломления n_0. Критический угол полного внутреннего отражения:

$$\delta_{max} = \arcsin n_0/n_c.$$

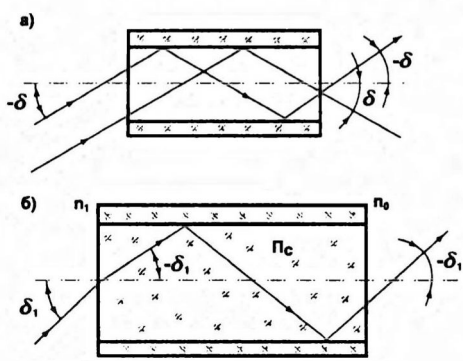


Рис. 1.23. Светопровод в виде цилиндрической трубки (а) и ход лучей в волокне с оболочкой (б)

На боковой поверхности светопровода происходит полное внутреннее отражение лучей, идущих внутри светопровода. Луч, падающий под углом δ_1 к оси, вый-

дет из светопровода под тем же углом, если число отражений четное, т. е. параллельно падающему лучу.

Если число отражений нечетное, то абсолютное значение угла будет такое же, а знак изменится на противоположный.

В настоящее время созданы светопроводы с малым коэффициентом затухания. Их применяют в геодезических приборах для передачи светового потока от лазера в зрительную трубу теодолита или нивелира.

Светофильтры. Плоскопараллельный слой какой-либо среды, обладающий избирательным пропусканием света, называется *светофильтром.* Светофильтры бывают из окрашенного в массе стекла, из окрашенных пластмасс, желатиновые, жидкие, газовые, поляризационные и интерференционные. Они изменяют как яркостные, так и цветовые соотношения между видимыми объектами, уменьшают хроматическую аберрацию. Светофильтры используют в светодальномерах для выделения полезного светового сигнала на фоне световых помех, создаваемых Солнцем или яркими источниками света.

Пластины зонные. Если между источником света и наблюдателем поместить поверхность произвольной формы и создать на ней прозрачные полосы, выбрав границы прозрачных зон таким образом, чтобы для точек, расположенных внутри этих зон, суммы расстояний до источника и наблюдателя отличались между собой на целое число длин волн (см. рис. 1.24), то в точке наблюдения в силу сложения амплитуд колебаний будет видно яркое изображение источника света. Зонная пластина может создавать изображение подобно линзе или зеркалу.

Для получения изображения хорошего качества оптические пути лучей должны отличаться от целого числа волн не более чем на $(1/4)\lambda$. Разность хода между волнами, пришедшими от двух соседних прозрачных зон, в обычной зонной пластине должна составлять длину волны света.

Если источник Q (рис. 1.25) расположен далеко от зонной пластины (параллельные лучи света), то яркое пятно света сформируется на расстоянии $f = r_n/n\lambda$ (r_n — радиус n-й зоны), где находится один из фокусов. При использовании источника, расположенного вблизи зонной пластины (расходящийся световой поток), соотношение между расстояниями L_1 и L_2 аналогично соотношению для линз и составляет $1/f = 1/L_1 + 1/L_2$.

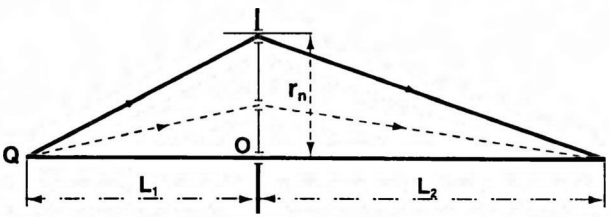


Рис. 1.24. Определение соотношения между расстоянием от источника света и изображением до зонной пластины. r_n — радиус n-й зоны

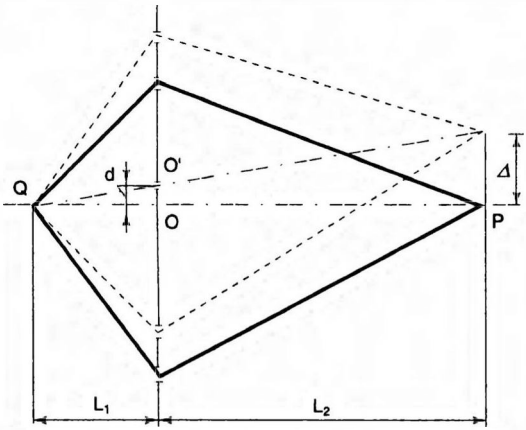


Рис. 1.25. Смещение изображения источника света при смещении зонной пластины в направлении, перпендикулярном линии створа

Зонная пластина имеет свойство формировать на расстоянии L_2 изображение точечного источника света Q строго симметрично относительно линии QO, соединяющей источник и ось симметрии зонной пластины.

Если переместить зонную пластину в направлении, нормальном к линии створа QO на величину $d = OO'$ (рис. 1.25), то изображение P источника света сместится на величину

$$D = d[(L_1 + L_2)/L_2] \quad (1.28)$$

в ту же сторону. Зонная пластина с круговыми зонами дает подобное изображение точечного источника света или фокусирует параллельный пучок когерентного света в виде точки.

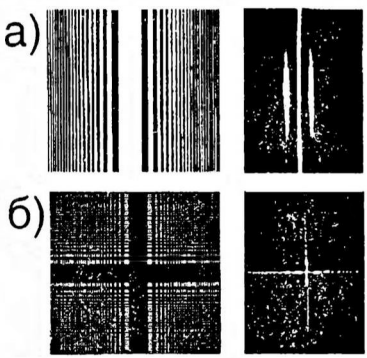


Рис. 1.26. Зонные пластины и изображения источника света, создаваемые ими:
а – одномерная пластина; б – двумерная пластина

На рис. 1.26, а представлена одномерная зонная пластина с вертикальными зонами и изображение источника света, даваемое ею; на рис. 1.26, б — двумерная зонная пластина в виде совокупности прямоугольных зон и изображение точечного источника света, даваемое ею в виде креста.

Зонные пластины применяют в лазерных створофиксаторах с дистанционным съемом информации о положении технологического оборудования [156].

Глаз как оптическая система

Глаз (рис. 1.27) имеет шарообразную форму и заключен в сухожильную оболочку (склеру), передняя часть которой (роговица) прозрачна и имеет форму, близкую к сфере. К склере прилегает сосудистая оболочка, образующая вблизи перехода склеры в роговицу утолщение в форме кольца (ресничное тело). Сосудистая оболочка не прилегает к роговице, а отходит от нее, образуя радужную оболочку с отверстием (зрачком). В радужной оболочке имеются мышечные волокна, сокращение которых изменяет размеры зрачка. В кольце ресничного тела находится

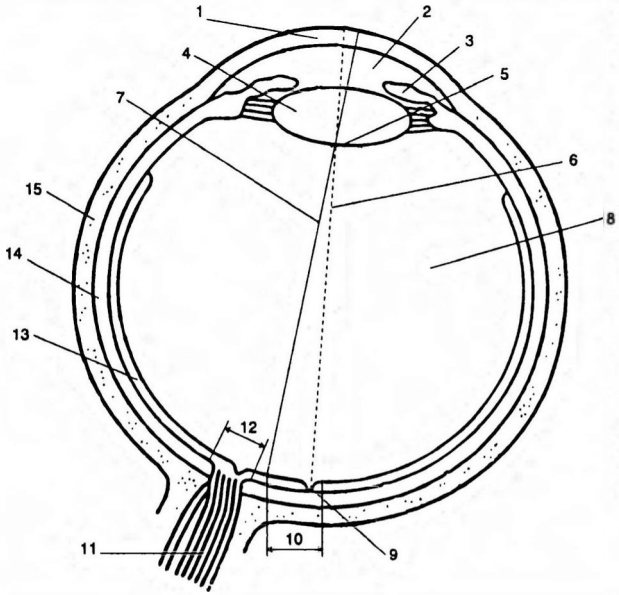


Рис. 1.27. Глаз человека
1 – роговица;
2 – передняя камера;
3 – радужная оболочка;
4 – хрусталик;
5 – захрусталиковое пространство;
6 – зрительная ось;
7 – оптическая ось;
8 – стекловидное тело;
9 – центральная ямка;
10 – желтое пятно;
11 – зрительный нерв;
12 – слепое пятно;
13 – ретина;
14 – сосудистая оболочка;
15 – склера

хрусталик, прикрепленный к нему волокнами тончайшей перепонки, которой он окружен. Хрусталик представляет собой двояковыпуклую линзу с различными радиусами кривизны. С задней стороны глаза до ресничного тела к поверхности сосудистой оболочки примыкает сетчатая оболочка (ретина), очень сложная по строению, состоящая из десяти слоев, один из которых – световоспринимающий. Попадая на нервные элементы (колбочки и палочки), свет вызывает их раздражение, и зрительное восприятие по зрительному нерву передается в головной мозг. Глаз имеет две особые области: в одной из них – желтом пятне – получается наибольшая острота зрения; в другой – слепом пятне – зрительного восприятия нет. Передняя камера глаза (между роговицей и хрусталиком) заполнена водянистой влагой, а задняя (между хрусталиком и сетчаткой) – стекловидным телом. Глаз можно рассматривать как оптическую систему, принципиальное отличие которой от обычной оптической системы состоит в том, что расстояние от хрусталика до сетчатки постоянно. В обычной системе резкое изображение на экране возникает при определенном положении предмета относительно этой системы, и при изменении расстояния от предмета до оптической системы необходимо измерять расстояние до экрана. Глазом же мы видим предметы резко при различном удалении за счет изменения кривизны поверхности и, соответственно, фокусного расстояния хрусталика.

Способность глаза резко видеть предметы, различно удаленные от него, называется аккомодацией. Аккомодационная мышца глаза, к которой прикреплен хрусталик, способна увеличить или уменьшить его кривизну. При спокойном состоянии мышцы нормальный глаз акко-

модируется на бесконечность. Чем ближе предмет к глазу, тем сильнее напряжение мышцы. Наименьшее расстояние, при котором нормальный глаз привычен к аккомодации в течение длительного времени, называется расстоянием наилучшего зрения. Для нормального глаза оно составляет около 25 см.

Способность глаза раздельно видеть изображение двух точек называется разрешающей способностью. Разрешающая способность глаза близка к одной угловой минуте. Пределы разрешающей способности обусловлены структурой сетчатки. Если изображение предмета умещается в пределах одного элемента сетчатки (например, колбочки), то глаз, не различая формы, воспринимает этот предмет в виде точки. Две точки глаз различает отдельно, если изображения их на сетчатке будут находиться на разных элементах, разделенных по крайней мере одним нераздраженным элементом. Высокая разрешающая способность глаза при оценке смещения линий имеет большое значение при измерении дальности оптическими дальномерами и при отсчетах по шкалам измерительных приборов. Сетчатка воспринимает лучистую энергию с длиной волны $\lambda = 380–0{,}780$ мкм как световое раздражение, а энергия более коротких и более длинных волн поглощается стекловидным телом глаза.

Максимальная спектральная чувствительность дневного (колбочкового) зрения находится в области 0,556 мкм (желто-зеленый свет), максимальная спектральная чувствительность палочкового зрения приходится на длину волны 0,507 мкм (ночное зрение).

При работе с оптическими приборами в условиях дневного освещения действует дневное зрение. При работе ночью – в зависимости от освещенности предмета – смешанное или ночное. Признак ночного зрения – неразличимость цветов, все предметы кажутся голубовато-серыми, как при лунном освещении.

Визуальные методы отсчета в геодезии в основном используются при работе с оптическими приборами и с лазерными приборами в условиях, когда отсутствует прямое солнечное освещение, создающее мощный световой фон, затрудняющий возможность определять положение пучка лазерного излучения.

Более эффективна работа геодезических приборов, снабженных фотоприемными устройствами. В качестве фотоприемников во многих современных приборах используется ПЗС-матрица (прибор с зарядовой связью, на английском языке CCD – Charge-Coupled Device) [102]. ПЗС-матрица воспринимает идущие от объекта частицы света – фотоны, преобразовывает их в электрические заряды и накапливает. Считывая эти заряды, можно затем при помощи компьютера восстановить изображение объекта, которое с помощью оптики проецируется на светочувствительную поверхность матрицы. Впервые ПЗС-матрица была разработана сотрудниками телефонной корпорации Bell в конце

60-х годов. Это устройство состоит из очень маленьких кремниевых детекторов света прямоугольной формы, называемых пикселями, и имеет двумерную структуру. Если пиксели располагаются вдоль линии, тогда матрица называется линейной и является одномерной.

Каждый пиксель работает как копилка для электронов, возникающих в нем под действием фотонов, пришедших от источника света. Во время экспозиции, продолжительность которой регулируется при помощи механического затвора, каждый пиксель постепенно заполняется электронами пропорционально количеству попавшего на него света.

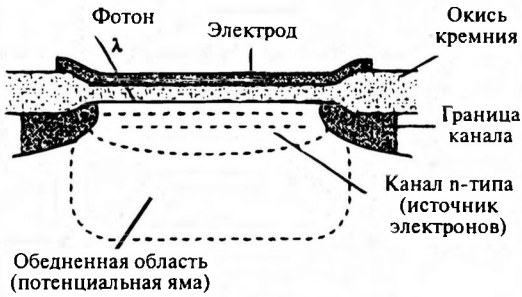


Рис. 1.28. Элемент ПЗС-матрицы

Принцип работы элемента (пикселя) ПЗС-матрицы демонстрирует рис. 1.28. При попадании светового пучка на проводник часть его отражается от поверхности, другая поглощается на определенной глубине, а третья проходит «навылет». Для фотоэлектрических устройств, преобразующих «фотоны в электроны», желательно, чтобы в полупроводнике поглощалась основная часть падающего излучения, так как отраженная часть пучка и прошедшая насквозь не используются для такого преобразования. Поэтому в кремниевой подложке p-типа создаются каналы из полупроводника n-типа. Сверху наносится изолирующий слой окиси кремния. Над каналами размещаются электроды из поликристаллического кремния. При подаче электрического потенциала на электрод в обедненной зоне под каналом n-типа образуется так называемая потенциальная яма, которая способна хранить электроны. После попадания фотона в слой кремния образуется электрон, который в итоге попадает в потенциальную яму, где и хранится. Чем больше фотонов попадает на поверхность (то есть чем интенсивнее световой поток, падающий на поверхность ЭОП), тем выше уровень накапливаемого ямой заряд. Затем заряд (фототок) считывается и усиливается. ПЗС-матрица состоит из множества таких элементов малого размера (рис. 1.29). В настоящее время выпускаются матрицы с размерами пикселей от 7 до 52 микрон. На ПЗС-матрице нанесены металлические электроды с изоляцией от полупроводника тонким слоем диэлектрика.

Когда на электрод подается отрицательное напряжение, то на поверхности полупроводника формируется обедненный слой. В этом слое нет свободных зарядов, и он представляет собой потенциальную яму, в которой могут накапливаться неосновные носители заряда из числа носителей, возникающих под действием света. Передача заряда

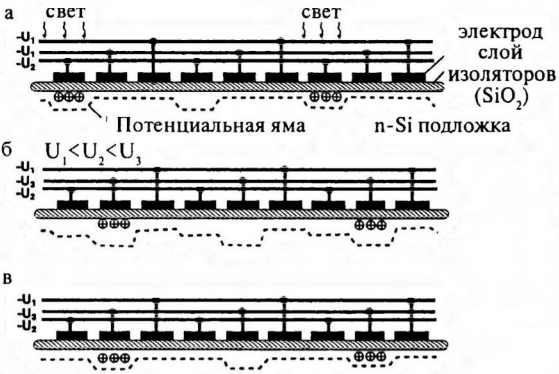


Рис. 1.29. Схема работы ПЗС-матрицы

осуществляется под действием приложенного к управляющим контактам напряжения. Сначала в потенциальной яме, созданной высоким отрицательным напряжением, приложенным к контакту 1, накапливаются дырки (рис. 1.29, а).

Если теперь приложить высокое отрицательное напряжение к контакту 2, то потенциальная яма сместится в сторону этого контакта, и туда же переместятся дырки (рис. 1.29, б).

Сразу же конфигурацию потенциальных ям приводят к виду, показанному на рис. 1.29-в. Затем цикл повторяется, и заряд последовательно перемещается и воспринимается как изменяющийся во времени сигнал, несущий информацию об интенсивности и пространственном распределении света, создающего изображение на ПЗС-матрице.

Для считывания фототоков пикселей используются устройства, называемые последовательными регистрами сдвига, преобразующими строку зарядов на входе в последовательность импульсов на выходе. Полученная последовательность образует сигнал, который можно, например, подать на усилитель.

Таким устройством можно считать заряды строки, состоящей из ПЗС-элементов. Собственно, и сам последовательный регистр сдвига представляет собой строку ПЗС-элементов. А его функционирование основано на способности ПЗС к перемещению зарядов потенциальных ям. Как уже отмечалось выше, для этого достаточно подать больший потенциал на соседний электрод переноса (transfer gate), под который должен переместиться заряд потенциальной ямы.

Количество «транзитных» электродов на каждый ПЗС-элемент регистра может варьироваться от 2 до 4, и именно в зависимости от этого количества регистр может называться двухфазным, трехфазным либо четырехфазным. При перемещении заряды всех ПЗС-элементов регистра сдвигаются синхронно и, проходя последовательно под электродами, оказываются в соседнем ПЗС-элементе. Тот заряд, которому ПЗС-элемента «не хватило», поступает на вход регистра, а затем — в усилитель. В свою очередь, на вход последовательного регистра попадают заряды, являющиеся «лишними» для всех последовательных регистров, расположенных «перпендикулярно» по отношению к считывающему фототок регистру.

Эта совокупность называется «параллельным регистром сдвига», и в сочетании с последовательным регистром, подающим сигнал на усилитель, представляет собой собственно ПЗС-матрицу (рис. 1.30).



Рис. 1.30. Схема ПЗС-матрицы

Работа составляющих ПЗС-матрицу «перпендикулярных» последовательных регистров, которые называют «столбцами», строго синхронизирована. За один рабочий цикл все заряды параллельного регистра смещаются одновременно, а самые «нижние» попадают на вход последовательного регистра. Поэтому последовательный регистр должен «сбросить» на вход усилителя всю строку зарядов до очередного рабочего цикла параллельного регистра.

Для обеспечения работы ПЗС-матрицы используются дополнительные устройства: микросхемы, подающие потенциалы на электроды переноса как последовательного, так и параллельного регистров сдвига; микросхема, синхронизирующая работу обоих регистров, а также тактовый генератор. Таким образом, по окончании съемки столбцы с накопленными в пикселах электронами начинают сдвигаться к краю матрицы, где находится аналогичный измерительный столбец. В нем заряды сдвигаются уже в перпендикулярном направлении и попадают на измерительный элемент, где создаются микротоки, пропорциональные этим зарядам. Для каждого последующего момента времени получают значение накопленного заряда и определяют, какому пикселю на матрице (номер строки и номер столбца) он соответствует. После того, как световой поток прошел через оптическую систему и попал на светочувствительную матрицу, полученное аналоговое изображение преобразуют в цифровое. Для получения полноцветного изображения производят обработку с помощью встроенного программного обеспечения, используя схему с интерполяцией цвета. Полученные графические файлы очень велики, поэтому их предварительно обрабатывают с целью сжатия.

Полученные данные затем поступают в компьютер, на его экране восстанавливается изображение объекта съемки, которое можно обработать и сохранить в виде файла после того, как все пиксели накопили заряд (эквивалентный световому потоку, упавшему на них).

Описанный тип электронно-оптического преобразователя является одним из первых и называется *полнокадровой ПЗС-матрицей* (full-frame CCD-matrix). В своей работе он использует механический затвор, который сначала открывает поверхность ПЗС-матрицы для экспониро-

вания, а затем снова закрывает от лучей света. При работе ПЗС-матрицы возникают различного рода помехи, наибольший вклад в которые вносит шум темнового тока — результат генерации пикселями термоэлектронов. Количество этих «паразитных» электронов зависит от двух основных параметров: продолжительности экспозиции и температуры матрицы.

Одним из эффективных способов уменьшения темнового тока является охлаждение матрицы. Например, при уменьшении температуры кристалла на 8 градусов темновой ток уменьшается вдвое. С помощью небольшого термодатчика, укрепленного с обратной стороны кристалла, можно управлять электронной схемой, поддерживающей температуру матрицы с точностью до 0,1 градуса, и фиксировать эту температуру в памяти компьютера. Общий контроль за работой ПЗС осуществляет блок управления, представляющий собой довольно сложную электронную схему. Он может быть выполнен как типовая плата расширения для компьютера, которая ставится в свободный разъем внутри него, либо в виде отдельного блока, который подключается к компьютеру. К достоинствам ПЗС-матрицы можно отнести следующие качества: а) высокую квантовую эффективность, достигающую на отдельных участках спектра 80 % (для сравнения квантовая эффективность фотоэмульсии 1 %, а глаза — 3 %); б) линейную чувствительность, т. е. величина фототока на выходе матрицы прямо пропорциональна количеству попавших на него квантов света; в) высокую разрешающую способность — порядка 100 линий на миллиметр; г) большой диапазон яркости (для матрицы с пикселями 10 микрон диапазон 1:1000); д) широкий спектральный диапазон, значительно превосходящий возможности фотопленки и тем более глаза. ПЗС реагируют на свет в диапазоне от рентгеновского до ближнего инфракрасного излучения (от единиц ангстрем до примерно 11 тысяч ангстрем). Таким образом, ПЗС обладают самым широким спектральным диапазоном среди всех известных приемников излучения и стабильностью параметров, так как параметры ПЗС-матрицы мало изменяются со временем. Параметры ПЗС-матрицы, прокалиброванной по наблюдениям стандартных источников света с разными фильтрами, длительное время соответствуют полученным данным.

Для сохранения результатов измерений, полученных при выполнении полевых работ, в геодезических приборах используется долговременная память. К устройствам долговременного хранения предъявляется ряд требований: а) возможность продолжительного хранения без источников питания; б) минимальное энергопотребление при операциях записи/считывания/стирания; в) время записи/считывания/стирания должно быть как можно меньше; г) габариты должны быть минимальными; д) устройство обязано быть стопроцентно надежным.

Долговременная память имеет несколько видов носителей, наиболее распространенными из которых является флеш-память: карты PCMCA и Compact Flash, Start Media, MultiMedia, Card/Secure, Digital Memory Stick, xD Picture Card (рис 1.31). Флэш-память является промежуточным типом памяти и по своим характеристикам находится между ПЗУ (постоянное запоминающее устройство) и ОЗУ. ПЗУ хранит информацию без источников питания, но не позволяет ее модифицировать; ОЗУ допускает модификацию информации, но хранить ее не может. Флэш-память использует питание при считывании данных и для записи.

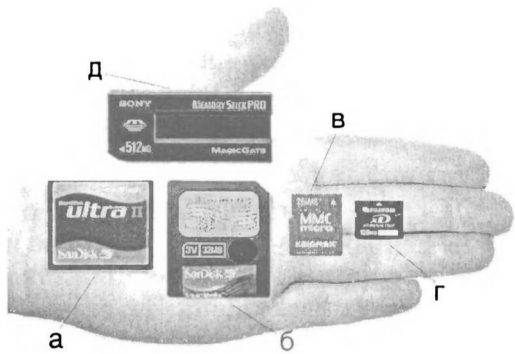


Рис 1.31. Сравнительные размеры основных модулей памяти
а – Compact Flash; б – Smart Media; в – MMC; г – xD Picture Card; д – Memory Stick

Карты PCMCIA

В начале карты PCMCIA использовались в портативных компьютерах (ноутбуках). Был принят стандарт PCMCIA, описывающий форм-фактор и габариты, а также интерфейс подключения карт расширения постоянной памяти для ноутбуков. В отличие от модулей расширения ОЗУ, карты PCMCIA предназначались для хранения данных без дополнительных источников питания, а также переноса, между портативными компьютерами. Позднее в этом стандарте стали выпускаться модемы, сетевые карты и т. д., стандарт приобрел новое название – PC Card. В настоящее время выпускается три типа карт PCMCIA, различающиеся между собой по толщине.

Compact Flash

Compact Flash является модулем PCMCIA, но имеет меньшие габариты и массу; кроме того, в нем уменьшено количество контактов: разъем PCMCA имеет 68 контактов, Compact Flash – 50, тем не менее между собой они сохраняют полную электрическую совместимость. При помощи переходника модули Compact Flash легко устанавливаются в PCMCA-слоты, что упрощает обмен данными.

Smart Media

Модули Start Media имеют большую емкость (до 64 Мбайт), малые габариты и массу (всего 2 грамма) и дешевле Compact Flash. Для передачи данных в портативный компьютер используется адаптер стандарта PCMCIA. В отличие от похожего устройства для карт Compact Flash данный прибор содержит контроллер работы с памятью, поэтому он

дороже, а старые модели адаптеров не всегда могут работать с новыми модулями памяти. Также как и для Compact Flash, существуют считыватели через порт USB.

Memory Stick

Модули Memory Stick Sony внешним видом напоминают пластинку жевательной резинки, имеют также малую массу (4 г), но объем памяти значительно больше и может составлять гигабайт.

xD Picture Card

Модуль xD Picture Card совместим с существующими двумя типами модулей – Smart Media и Compact Flash и является наиболее миниатюрным из всех модулей (рис. 1.31). Он обеспечивает высокую скорость обмена данными и большую емкость (максимум 8 Гбайт).

1.6. Лазеры

Лазеры – квантовые генераторы оптического диапазона, работающие на длинах 0,1–103 мкм. В основе их работы лежит явление усиления электромагнитных колебаний с помощью вынужденного излучения атомов и молекул [83]. Из физики атома известно, что чем дальше орбита электрона от ядра, тем больше его энергия. Энергия атома в целом не произвольна и может принимать лишь вполне определенные дискретные значения E_0, E_1, E_2, ..., E_i и т. д., называемые энергетическими уровнями.

В невозбужденном состоянии атом обладает минимальной энергией, чему соответствует уровень энергии E_0. Такое состояние атома называется основным. Если атом не подвергается внешним воздействиям, то в основном состоянии он может находиться неограниченное время. Остальные уровни E_1, E_2, ... , E_i называются *возбужденными*.

Причины перехода атома из нормального состояния в возбужденное могут быть различными: нагрев, облучение светом, бомбардировка потоком элементарных частиц, приложение высокочастотного поля и т. д.

Для перевода атома из основного состояния в возбужденное ему необходимо сообщить энергию ($E_i - E_0$), причем время пребывания атома в возбужденном состоянии предсказать невозможно; можно лишь говорить о вероятности перехода из возбужденного состояния на более низкий уровень через некоторое время. Время жизни атома в возбужденном состоянии очень мало и составляет примерно 10^{-8} с. По истечении этого времени атом самопроизвольно переходит на один из более низких энергетических уровней, например E_k.

Согласно постулату Бора, такой переход сопровождается излучением определенных порций электромагнитной энергии с частотой ν, которые называют *квантами энергии* или *фотонами*:

$$E_i - E_k = h\nu_{i,k}, \qquad (1.29)$$

где h – постоянная Планка, равная $6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. В некоторых случаях переходы из состояния E_i на любой из уровней запрещены правилами отбора. В этих случаях состояние E_i является метастабильным. Время жизни атома в метастабильном состоянии составляет примерно 10^{-3} с. Совокупность переходов между энергетическими уровнями образует энергетический спектр атома, который состоит из серии линий, разделенных «запрещенными» промежутками. Дискретностью энергетического спектра объясняется линейчатый характер спектров поглощения или излучения электромагнитных волн атомами.

Атом данного вещества может излучать электромагнитные волны различных частот, причем количество последних равно числу возможных переходов с уровня на уровень. Данный атом может поглощать или излучать электромагнитные волны, частоты которых определяются соотношением:

$$\nu_{i,k} = (E_i - E_k)/h. \qquad (1.30)$$

Переход атома с одного энергетического уровня на другой может и не сопровождаться излучением. В этом случае энергия передается другому атому и превращается в теплоту.

Самопроизвольное излучение возбужденных атомов, возникающее при их хаотическом переходе с верхнего энергетического уровня на нижний, носит спонтанный (самопроизвольный) характер.

Случайность спонтанных переходов приводит к тому, что различные атомы излучают не одновременно и независимо, поэтому фазы электромагнитных волн, излучаемых отдельными атомами, не согласованы друг с другом. Таким образом, спонтанное излучение происходит в широкой полосе частот и не синфазно, случайный характер имеет не только момент испускания атомами фотона, но и направление распространения излучаемого фотона и его поляризация. Примером такого излучения является излучение обычной лампочки накаливания. Из-за случайного характера спонтанного излучения оно не монохроматично, не направлено и не поляризовано, т. е. не когерентно.

Если на вещество, находящееся в возбужденном состоянии, воздействует электромагнитная волна, частота которой близка к частоте перехода, то атом может либо увеличить свою энергию за счет энергии электромагнитной волны и перейти на более высокий уровень (поглотив фотон), либо, наоборот, потерять энергию (испустив фотон). При индуцированном (стимулированном) излучении поток фотонов находится в определенном фазовом соотношении с внешним электромагнитным полем, т. е. имеет ту же частоту, поляризацию и фазу, что и первичная волна.

Из-за хаотического теплового движения молекул на верхних энергетических уровнях может находиться некоторое количество возбуж-

денных частиц. При этом чем выше расположен уровень, тем меньше частиц находится на нем.

Если вещество находится в термодинамическом равновесии и имеет температуру T, то его атомы распределены по всем энергетическим состояниям по закону Больцмана:

$$N_i = N_0 \exp(-E_i/kT), \qquad (1.31)$$

где N_i – концентрация атомов, находящихся в состоянии с энергией E_i; N_0 – концентрация атомов в основном состоянии; T – термодинамическая температура; k – постоянная Больцмана ($1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

Температура тела T всегда больше нуля и, следовательно, из (1.31) можно заключить, что заселенность верхних уровней при термодинамическом равновесии всегда меньше населенности нижних, т. е. $N_1 > N_2$.

При тепловом равновесии температуры всех переходов одинаковы и совпадают с истинной температурой тела.

В возбужденном состоянии на более высоком энергетическом уровне располагается больше частиц, чем на более низком, т. е. соблюдается неравенство $N_2 > N_1$, где N_2 – концентрация атомов в верхнем возбужденном состоянии; N_1 – концентрация атомов в нижнем состоянии. Это неравенство справедливо, если выполняется условие $T_{21} < 0$. Состояние, при котором на верхнем уровне больше частиц, чем на нижнем, называется состоянием с отрицательной температурой. Действительно закона Больцмана следует, что

$$N_2 = N_1 \exp[-(E_2 - E_1)/kT_{21}]. \qquad (1.32)$$

Для выполнения неравенства $N_2 - N_1 = \Delta N > 0$ необходимо, чтобы второй сомножитель в последнем выражении был больше 1, что имеет место при условии $T_{21} < 0$.

В природе температура тела ниже абсолютного нуля быть не может. Поэтому величина T_{21} является условной и называется температурой перехода. Но она ничего общего не имеет с температурой вещества и характеризует лишь отношение заселенностей уровней.

Для создания стимулированного излучения необходимо, чтобы из двух выбранных уровней, между которыми возможен переход, верхний был заселен больше, чем нижний, т.е. необходима инверсия заселенностей для пары уровней, переход между которыми соответствует частоте генерации. Метод получения стимулированного излучения в лазере основан на том, что внешнее электромагнитное поле, взаимодействуя с микрочастицами вещества (так называемого активного вещества), изменяет их внутреннюю энергию, в результате чего невозбужденные частицы из основного состояния 1 переходят на более высокий энергетический уровень, где и находятся в течение некоторого времени. Энергия, необходимая для возбуждения частиц, вырабатывается специальным источником энергии, называемым источником накачки.

Среда (твердая, жидкая или газообразная) считается усиливающей, если имеется избыточная заселенность верхних уровней (инверсная заселенность уровней). В отличие от обычного распространения света в различных средах, где энергия излучения уменьшается, в среде с инверсной заселенностью свет определенной частоты усиливается. В результате на выходе из среды световой поток Ф будет больше, чем на входе:

$$\Phi = \Phi_0 \exp \alpha d, \qquad (1.33)$$

где Φ_0 – начальный световой поток; α – коэффициент усиления на единицу длины активного вещества; d – длина пути, пройденного светом.

Для получения непрерывного процесса излучения необходимо, чтобы наблюдалась постоянная инверсная заселенность верхних уровней. Если инверсная заселенность создается периодически, то излучение будет импульсным. Методы получения инверсии могут быть различными и связанными с использованием для накачки энергии светового излучения мощных электрических ламп, энергии ускоренных электронов, химической, тепловой и других видов энергии.

Если на активную среду, имеющую два энергетических уровня, воздействует электромагнитное поле с частотой

$$\nu_{21} = (E_2 - E_1)/h, \qquad (1.34)$$

то одни частицы будут переходить с нижнего энергетического уровня на верхний, а другие частицы, наоборот, с верхнего уровня на нижний. В последнем случае индуцированные переходы сопровождаются выделением энергии. Для получения среды с отрицательной температурой Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым было предложено использовать трехуровневую систему. Если на такую систему воздействовать интенсивным электромагнитным полем с частотой

$$\nu_{31} = (E_3 - E_1)/h, \qquad (1.35)$$

половина частиц перейдет на уровень 3 (рис. 1.32, а), и количество частиц на нем окажется равным количеству частиц на уровне 1 ($N_2 \sim N_1$), т. е. произойдет насыщение квантового перехода.

В результате этого окажется, что при достаточно большом времени жизни возбужденных частиц их количество на уровне 3 окажется больше, чем на уровне 2. При воздействии на такую среду электромагнитного излучения с частотой

$$\nu_{32} = (E_3 - E_2)/h, \qquad (1.36)$$

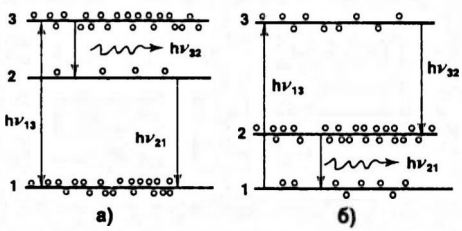


Рис. 1.32. Схема получения инверсной заселенности в трехуровневых системах:
а – инверсная населенность между 3 и 2 энергетическими уровнями; б – инверсная населенность между 2 и 1 энергетическими уровнями

которая соответствует переходу с уровня 3 на уровень 2, произойдет усиление этого излучения.

Индуцированное излучение может быть также вызвано и спонтанными переходами частиц. В этом случае система является генератором. Возможно также создание и таких систем, в которых накопление возбужденных частиц будет происходить на метастабильном уровне 2 (рис. 1.32, б), а индуцированное излучение возникать на частоте ν_{21} в результате перехода частиц с уровня 2 на уровень 1. В этом случае переход частиц с уровня 3 на уровень 2 совершается без излучения.

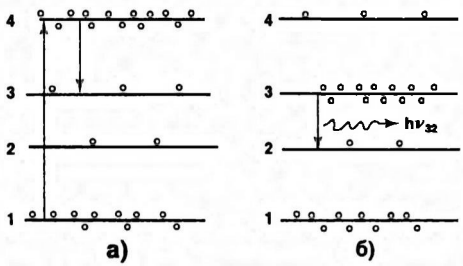


Рис. 1.33. Схема получения инверсной заселенности в четырехуровневой системе:
а – заселенность уровней в первый момент возбуждения; б – заселенность уровней к моменту излучательных индуцированных переходов; 1, 2, 3, 4 – энергетические уровни

В лазерах помимо трехуровневого метода возбуждения квантовых систем используется и четырехуровневый. Многие из четырехуровневых систем возбуждаются с помощью внешнего источника накачки таким образом, что частицы переходят с уровня 1 на уровень 4 (рис. 1.33). В результате безызлучательного перехода с уровня 4 на уровень 3 (рис. 1.33, а) частицы накапливаются на метастабильном уровне 3.

Таким образом, создается инверсная населенность между уровнями 3 и 2 (рис. 1.33, б). Так как уровень 2 достаточно удален от уровня 1, то при термодинамическом равновесии его заселенность близка к нулю.

Поэтому в четырехуровневых системах для накачки требуется меньшая мощность по сравнению с трехуровневыми системами, в которых инверсная заселенность создается по отношению к уровню 1, являющемуся основным и поэтому значительно заселенным.

Для получения незатухающего процесса излучения необходимо, чтобы часть испускаемых фотонов все время находилась внутри активного вещества, вызывая излучение новых фотонов, а само вещество находилось бы в возбужденном состоянии.

Кроме того, при индуцированном излучении фотоны распространяются в различных направлениях и могут иметь любую частоту в пределах ширины линии люминесценции активного вещества. Например, в газовых лазерах активное вещество из-за разности скоростей атомов излучает в полосе частот, равной десяткам или сотням мегагерц, т. е. ширина полосы частот излучения увеличивается. Уширение линий в этом случае возникает вследствие эффекта Доплера и носит название доплеровского уширения.

В твердых телах (стекло, кристаллы) ширина линии люминесценции составляет сотни гигагерц.

При распространении излучения вдоль активной среды его интенсивность увеличивается, однако значительное усиление света вследствие увеличения длины усиливающего устройства с активной средой практически осуществить сложно. Поэтому увеличение пути пучка излучения в активной среде (рис. 1.34) достигается многократным прохождением его через одну и ту же активную среду 1. Для этой цели на границах среды устанавливают зеркала 2, 3, представляющие собой интерферометр Фабри-Перо. В лазерах он служит резонатором, в котором используются как плоские, так и сферические зеркала.

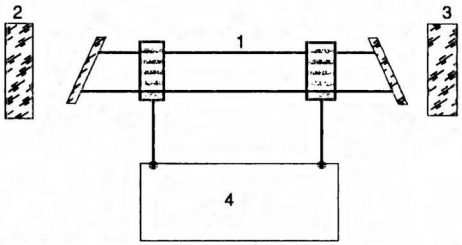


Рис. 1.34. Принципиальная схема лазера:
1 – газоразрядная трубка; 2, 3 – зеркала резонатора; 4 – блок питания

Подвод энергии осуществляется от блока питания 4 через электроды.

Внутренние поверхности зеркал серебрят или покрывают другим металлом; кроме того, в лазерах используют зеркала с нанесенными в несколько слоев диэлектрическими покрытиями, имеющими большую отражательную способность, чем металлические. Зеркала в резонаторе обычно закрепляют в трубке, которую снабжают юстировочными винтами. В некоторых случаях одно из зеркал резонатора заменяют призмой, обеспечивающей полное отражение.

При наличии резонатора излучение, направленное под углом к его оси, выйдет из активного вещества сразу же или после небольшого числа отражений, и поэтому не успеет значительно усилиться. Значительное усиление достигается только для той части излучения, направление распространения которого совпадает с осью резонато-

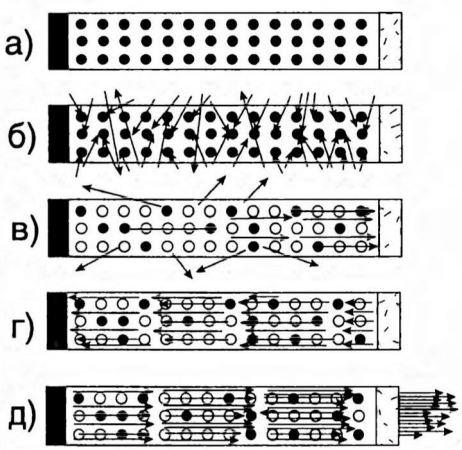


Рис. 1.35. Процесс формирования пучка излучения в активном веществе лазера:
а) атомы активного вещества в невозбужденном состоянии; б) свет накачки переводит большинство атомов в возбужденное состояние; в) атомы вещества спонтанно излучают, часть фотонов уходит наружу, а часть вызывает индуцированное излучение; г) отразившись от зеркала, поток фотонов вызывает индуцированное излучение; д) пучок излучения выходит через полупрозрачное зеркало

ра, так как в этом случае оно много раз проходит через усиливающую среду. При этом частота излучения должна удовлетворять условию резонанса, т. е. на длине резонатора должно укладываться целое число полуволн, что приводит к образованию в резонаторе стоячих волн.

Рис. 1.35 иллюстрирует процесс формирования пучка излучения в активном веществе лазера.

До начала усиления (рис. 1.35, а) атомы находятся в основном состоянии (черные кружки). Внешнее возбуждение (рис. 1.35, б) в виде оптической накачки (сплошные стрелки) переводит большую часть атомов в возбужденное состояние (белые кружки на рис. 1.35, в). Некоторые атомы начинают спонтанно излучать фотоны (рис. 1.35, в), при этом часть фотонов переходит за пределы активного вещества, остальные фотоны, двигаясь параллельно оси лазера, вызывают индуцированное излучение. Отразившись от зеркала, поток фотонов проходит через активную среду и вынуждает возбужденные атомы излучать новые фотоны (рис. 1.35, г); происходит усиление потока фотонов. Усиленный поток, отразившись от зеркала (рис. 1.35, д), втягивает в процесс индуцированного излучения все большее число возбужденных атомов. Когда усиление потока фотонов достигает определенной величины, часть потока выходит через полупрозрачное зеркало.

Чтобы возникла генерация света, в активной среде должно быть достаточно большое усиление для компенсации в системе потерь, обусловленных поглощением в зеркалах при отражении и излучении через открытую боковую поверхность активной среды.

Основные типы лазеров

В основе классификации лазеров лежит физическое состояние активной среды. По этому признаку лазеры делят на твердотельные, жидкостные и газовые. Лазеры подразделяют также в зависимости от материала, используемого в качестве активного вещества. Например, если активным веществом является искусственный кристалл рубина, то лазер называют рубиновым, если смесь гелия и неона — гелиево-неоновым; если используют полупроводниковые материалы, лазер называют полупроводниковым и т. д. В зависимости от режима работы лазеры делят на импульсные и непрерывного излучения. Первый лазер, созданный в 1960 г. Т. Мейманом (США), был рубиновым. Рубиновый лазер состоит из трех основных частей (рис. 1.36): кристалла рубина 1, который является активным веществом, лампы

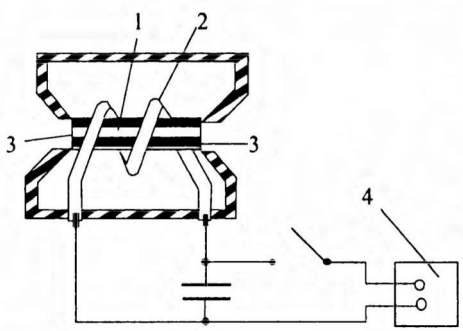


Рис. 1.36. Схема рубинового лазера
1 – рубиновый стержень; 2 – лампа накачки; 3 – зеркальная поверхность

накачки 2 (газоразрядной импульсной лампы) и резонатора 3, представляющего собой тщательно отполированные торцы кристалла с нанесенными на них отражающими покрытиями. Для питания лампы 2 служит блок питания 4. Рубиновый лазер работает по трехуровневой схеме (рис. 1.37). При облучении рубина, представляющего собой оксид алюминия Al_2O_3, активированного хромом, атомы хрома возбуждаются и переходят на уровень 2, соответствующий поглощению света с длиной волны λ = 0,560 мкм.

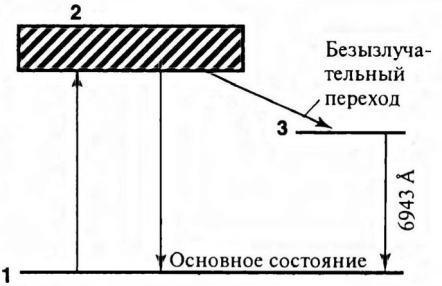


Рис. 1.37. Диаграмма рабочих уровней рубинового лазера
1, 2, 3 – уровни энергии ионов хрома

Рубин облучают ксеноновой лампой, которая излучает в зеленой части спектра.

Часть возбужденных ионов хрома с уровня 2 переходит на уровень 1, другая их часть совершает безызлучательный переход на метастабильный уровень 3. В результате уровень 3 оказывается более заселенным, чем уровень 1. Такая система крайне неустойчива, так как вероятность спонтанных переходов в любой момент времени очень велика. В свою очередь спонтанный переход одного из ионов хрома с уровня 3 на уровень 1 вызывает индуцированное излучение.

Многократное прохождение излучения в активной среде между торцевыми стенками стержня обеспечивает значительное усиление и строгую направленность. Длина волны излучения лазера (0,6943 мкм) соответствует видимому диапазону (красный свет).

В первых образцах рубиновых лазеров применяли спиральные газоразрядные лампы. Затем стали использовать осветители другого типа, имеющие лампы накачки 2 и зеркальные отражатели 3, которые направляют излучение на активную среду 1 (рис. 1.38). Эти типы осветителей обеспечивают более эффективное использование мощности ламп накачки. В последние годы для накачки твердотельных лазеров используют также полупроводниковые лазеры.

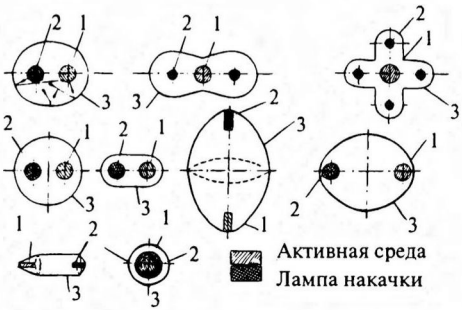


Рис. 1.38. Типы осветителей
1 – активная среда; 2 – лампы накачки; 3 – зеркальная поверхность

Для уменьшения пороговой мощности накачки используют рубиновый стержень в сапфировой оболочке, которая фокусирует

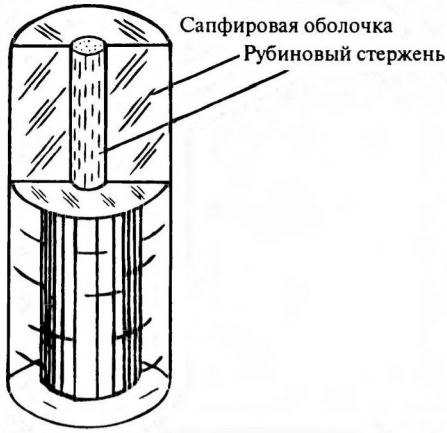


Рис. 1.39. Рубиновый стержень в сапфировой оболочке

свет накачки на центральной части рубинового стержня (см. рис. 1.39). При этом сапфир в значительно меньшей степени поглощает световую энергию от ламп накачки, чем такой же слой рубина, и является хорошим проводником теплоты. Конструкция рубиновых стержней с сапфировой оболочкой позволяет генерировать излучение лазера при импульсной энергии накачки порядка 50–80 Дж, а без сапфировой оболочки – в лучшем случае при энергии накачки 120–200 Дж.

Другим весьма распространенным твердотельным лазером является лазер из стекла с присадкой неодима. Длина волны излучения этого лазера лежит в ближней инфракрасной области спектра (λ = 1,06 мкм), а мощность его излучения может достигать значительных величин. Так, например, получена импульсная мощность ~10^{13} Вт при длительности импульса 10^{-11} с. Изготовить неодимовые лазеры любых требуемых размеров и формы проще, чем рубиновые. Стеклянные лазеры, в которых используются ионы других редкоземельных элементов, отличаются от неодимового лазера длиной волны излучения. Например, стеклянные лазеры с присадкой гольмия генерируют на длине волны порядка 1,95 мкм, иттербия – 1,015 мкм, тербия – в интервале 0,535–0,55 мкм, гадолиния – 0,3125 мкм.

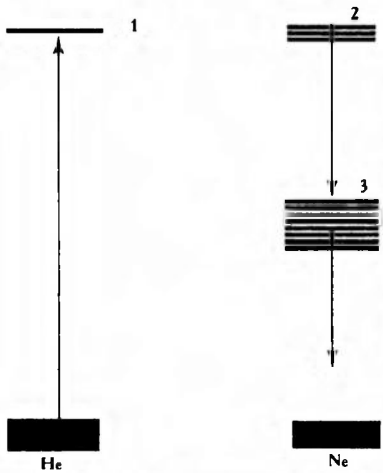


Рис. 1.40. Упрощенная схема гелиево-неонового лазера:
1 – уровень атомов гелия; 2 – верхний рабочий уровень атомов неона; 3 – нижний рабочий уровень атомов неона

Наиболее широкое распространение получили гелиево-неоновые (HeNe) лазеры. В последние годы в геодезии в основном используются полупроводниковые арсенид-галлиевые (GaAs) лазеры.

Гелиево-неоновые лазеры работают на нейтральных атомах, в частности на атомах Ne. Для получения индуцированного излучения служит смесь гелия и неона. Неон выполняет роль рабочего газа, гелий – примесного.

На рис. 1.40 приведена упрощенная схема уровней атомов неона (Ne) и ге-

лия (He). Из-за столкновений электронов в плазме разряда возбуждаются все уровни. Как видно из рис. 1.36, уровень 1 атомов гелия лежит близко к уровню 2 атомов неона.

Кроме того, верхний рабочий уровень 2 атомов неона возбуждается также и вследствие резонансной передачи энергии от возбужденных атомов He, находящихся на уровне 1. Нижний рабочий уровень 3 атомов неона возбуждается только за счет разряда в трубке. Благодаря этому на уровне 2 создается инверсная населенность, и при переходах атомов с уровня 2 на уровень 3 возникает индуцированное излучение. Затем атомы неона возвращаются в основное состояние.

Необходимо отметить, что уровни атомов неона представляют собой полосы, состоящие из большого числа тесно расположенных уровней (подуровней), между которыми возможны переходы. Всего имеется 16 разрешенных переходов, соответствующих различным длинам волн, поэтому спектр гелиево-неонового лазера может содержать в видимой и инфракрасной областях оптического диапазона до 40 спектральных линий.

Большинство промышленных газовых лазеров — это гелиево-неоновые лазеры, излучающие в красной области видимого спектра (λ = 0,6328 мкм) (см. табл. 1.2 приложения). Гелиево-неоновые лазеры, генерирующие на других длинах волн (λ = 1,15; 3,29 мкм и др.), используют редко. Коэффициент полезного действия этих лазеров очень мал (0,01–0,1%), а значения выходной мощности обычно находятся в пределах от 0,5 мВт до 70 мВт в одномодовом режиме и от 5 до 100 мВт в многомодовом режиме. Излучатели большинства лазеров имеют коаксиальную конструкцию, в которой оптическая и геометрическая оси совпадают. Гелиево-неоновые лазеры являются в настоящее время наиболее надежными и отработанными в техническом отношении. Срок их службы достигает 25 тыс. час., но не менее 10 тыс. час.

Низкие пороговые мощности питания, высокая когерентность излучения в видимой области спектра, малая расходимость пучка — все это способствует широкому применению гелиево-неоновых лазеров в различных отраслях науки и техники.

Недостатком всех лазеров на благородных газах является слишком малый КПД, так как в процессе накачки, помимо рабочего уровня, возбуждается большое количество других уровней, и энергия, затрачиваемая на их возбуждение, не используется для генерации индуцированного изучения. Кроме того, в благородных газах мал коэффициент перехода, т. е. мало отношение излучаемой энергии к энергии, необходимой для возбуждения верхнего уровня.

КПД перехода несколько выше у лазеров, работающих на парах металлов (меди, таллия, свинца). К недостаткам таких лазеров относят сложность их реализации, которая вызвана необходимостью поддержания высоких температур в разрядной трубке.

Лазеры на углекислом газе могут обеспечивать мощность излучения от единиц до десятков киловатт. Обычно длина волны излучения лазеров на CO_2 составляет 10,6 мкм, но возможна также генерация на длине волны 9,4 мкм.

Для повышения мощности излучения в качестве компонента рабочей смеси вводят гелий, который вследствие высокой теплопроводности снижает температуру газа, уменьшает заселение нижнего лазерного уровня и тем самым способствует образованию инверсной заселенности.

Коэффициент преобразования энергии возбуждения в энергию когерентного излучения в значительной степени зависит от температуры газа, так как при повышении температуры возрастает заселенность нижнего лазерного уровня и уменьшается время жизни верхнего излучательного уровня, а следовательно, уменьшается инверсная заселенность. С повышением температуры снижается интенсивность излучения, а при достижении критической температуры, которая составляет 800—1000 °К, происходит срыв генерации.

Повышение мощности осуществляется путем снижения температуры рабочей смеси, что достигается быстрой прокачкой газа через рабочий объем. При использовании продольной прокачки мощность излучения составляет ~ 9 кВт при длине трубки 185 м и КПД порядка 15—20 %.

Более высокая мощность излучения достигается при поперечной прокачке газа. При этом конструкция лазера более компактна, а удельный энергосъем характеризуется величиной порядка 1 кВт мощности непрерывного излучения на 1 м длины разрядного промежутка при скорости прокачки 30 м/с и расходе газа 30—40 $м^3/с$. Газовые лазеры с замкнутым циклом прокачки имеют большой ресурс работы.

Отпаянные лазеры на CO_2, в которых отсутствует циркуляция газовой смеси, имеют значительно меньшую мощность. Их средняя мощность составляет 2—100 Вт.

В последние годы разработаны более компактные волноводные лазеры на CO_2, имеющие довольно высокую удельную мощность излучения, а также широкий диапазон перестройки частоты генерации. По сравнению с отпаянными лазерами на CO_2, волноводные лазеры при одинаковой мощности излучения имеют в 2—3 раза меньшие размеры, а также обеспечивают возможность изменения перестройки частоты в широком диапазоне, в 10—20 раз превышающем диапазон классического CO_2-лазера.

Улучшение характеристик волноводного CO_2-лазера достигается за счет повышения давления газовой смеси в газоразрядной трубке, которая имеет уменьшенный диаметр, а материал, из которого изготовлена трубка, имеет повышенную теплопроводность, низкий коэффициент температурного расширения, высокий коэффициент отражения; кроме

того, он технологичен в отношении высококачественного полирования. Обычно в качестве такого материала используют кварц, стекло, нитрид бора (ВМ), оксиды алюминия (Al_2O_3) и бериллия (BeO). Наиболее высокая мощность достигается при использовании оксида бериллия. В этом случае волноводные лазеры позволяют получить мощность выходного излучения в 2–3 раза большую, чем лазеры, у которых трубки изготовлены из стекла или кварца.

Волноводы обычно имеют круглое или прямоугольное сечение, размеры которого составляют от 1 х 1 до 2,5 х 2,5 мм. В качестве рабочего вещества используют смесь газов (CO_2–CO–He–Xe), (CO_2–He–K_2), (CO_2–He–K_2–Xe).

Так как эти газовые смеси имеют более высокий показатель преломления, чем материал волновода, то световые лучи на поверхности раздела газовой смеси и стенки волновода претерпевают полное внутреннее отражение и поэтому распространяются только внутри волновода. При диаметре волновода, значительно большем длины волны излучения, распространение света происходит по законам геометрической оптики, потери обусловлены в основном поглощением в газовом разряде. Мощность излучения волноводных лазеров в значительной степени зависит от давления газовой смеси, которое составляет 80–200 Па.

Волноводные лазеры наряду с воздушным охлаждением могут охлаждаться циркулирующей водой или специальными жидкостями.

В качестве активной среды в лазерах используют и растворы ряда органических красителей, химическое строение которых характеризуется сочетанием бензольных (CM_4K_2) и других колец. Лазеры на красителях дают возможность в широких пределах изменять частоту, которая зависит от концентрации активных центров и коэффициента потерь резонатора, а также от состава, концентрации и температуры раствора. В жидкостных лазерах получена генерация волн в диапазоне 0,3–1,2 мкм.

Значительно меньшие габариты и массу по сравнению с газовыми и кристаллическими лазерами имеют полупроводниковые лазеры. В большинстве полупроводниковых лазеров возбуждение активной среды производится непосредственно электрическим током. На рис. 1.41 показана схема энергетических зон полупроводников. В отличие от изолированного атома в полупроводниках отсутствуют отдельные уровни и имеются группы энергетических уровней, называемых зонами. Нижнюю группу уровней называют *валентной* или *заполненной зоной*, а верхнюю – *зоной проводимости* или *свободной зоной*. Между верхними и нижними группами уровней

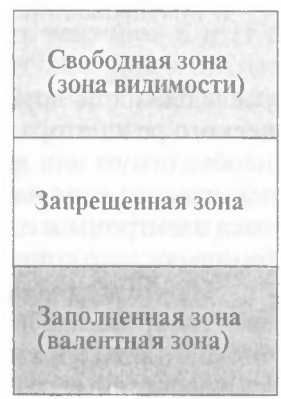


Рис. 1.41. Энергетические зоны в полупроводнике

находится *запрещенная зона*. Электроны могут располагаться в двух зонах: валентной и зоне проводимости.

При возбуждении полупроводника электроны с нижнего энергетического уровня (из валентной зоны) переходят в верхний (зону проводимости). При этом в валентной зоне появится положительный носитель – дырка. В результате спонтанного или индуцированного перехода электрона из зоны проводимости в валентную зону происходит рекомбинация пары электрон-дырка, при этом выделяется энергия в виде кванта света. Число свободных электронов и дырок в чистом полупроводнике обычно невелико и определяется температурой: чем выше температура, тем больше количество носителей тока. Для повышения количества носителей тока в полупроводник добавляют примеси, в зависимости от которых он становится либо p-полупроводником, либо n-полупроводником. Например, если в германий добавить примесь индия, то он становится p-полупроводником, а если сурьму или мышьяк, то n-полупроводником.

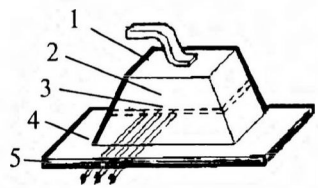


Рис. 1.42. Конструкция излучающего элемента полупроводникового лазера:
1, 5 – электроды; 2 – p-полупроводник; 3 – n-переход; 4 – n-полупроводник

Если соединить полупроводники этих двух типов и с помощью электродов приложить электрическое напряжение к p-n-переходу в прямом направлении (т.е. плюс подключить к p-полупроводнику, а минус – к n-полупроводнику) (рис. 1.42), то к p-n-переходу потекут из n-области электроны, а из p-области – дырки. В результате происходит рекомбинация электронов и дырок с излучением невысокой степени временной и пространственной когерентности и сравнительно широким диапазоном спектра излучения электромагнитной энергии. Если две грани полупроводника перпендикулярны границе перехода, параллельны друг другу и отполированы, то они служат элементами оптического резонатора, т.е. обеспечивают положительную обратную связь, необходимую для возникновения генерации. Полупроводниковые лазеры такого типа называют инжекционными, так как при пропускании тока электроны и дырки инжектируют в p-n-переход, где затем рекомбинируют, что сопровождается излучением света.

Наиболее распространенным полупроводниковым лазером является лазер на арсениде галлия (GaAr). Этот лазер изготовляют из небольшой пластинки толщиной в доли миллиметра. Пластинка состоит из двух частей, соответствующих дырочной и полупроводниковой проводимостям. Толщина слоя p-n-перехода ничтожно мала и составляет несколько микрон. Генерация происходит в диапазоне 0,82–0,90 мкм. При охлаждении полупроводникового арсенид-галлиевого лазера полу-

чают мощность излучения в несколько ватт в непрерывном режиме при КПД порядка 30–50 %. В импульсном режиме такие лазеры работают при комнатной температуре.

Имеется целый ряд инжекционных полупроводниковых лазеров, которые позволяют получать генерацию как в видимом, так и в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах (635–1550 нм).

Благодаря малым габаритам и массе, а также простоте осуществления модуляции полупроводниковые лазеры и полупроводниковые лазерные диоды обычно используют во многих современных геодезических приборах в качестве источника излучения (см. табл. 1.3 Приложения).

К недостаткам полупроводниковых лазеров следует отнести большую расходимость пучка, а также невысокую степень временной и пространственной когерентности и сравнительно широкий диапазон спектра излучения.

1.7. Свойства лазерного излучения. Моды оптического резонатора

Свойства лазерного излучения определяются параметрами активной среды, резонатора и системы накачки.

Характерным для лазерного резонатора является то, что расстояние между зеркалами, а также радиусы кривизны и апертурные размеры зеркал много больше длины волны излучения.

Простейшим типом лазерного резонатора является интерферометр Фабри-Перо, который состоит из двух параллельных зеркал, расположенных на определенном расстоянии друг от друга. Поле в пространстве между зеркалами представляет собой суперпозицию встречных волн, отраженных от зеркал.

В простейшем случае поле в поперечном сечении представляет собой «пятно», в центре которого имеется пучность векторов E и H с постоянным уменьшением амплитуды векторов до нуля к краям пятна.

В общем случае конфигурацию поля составляют несколько таких «пятен»-ячеек.

Типы колебаний имеют обозначение TEMmng, где m и n указывают число пятен, или, как принято, число вариаций поля по осям X и Y для прямоугольных зеркал или по радиальному и азимутальному направлениям для круглых зеркал. Эти типы колебаний также называют поперечными модами.

Указанные индексы определяют лишь поперечную структуру поля. Индекс g соответствует числу вариаций поля вдоль оси Z (между зеркалами), т. е. числу полуволн, укладывающихся на длине резонатора. Этот индекс имеет величину порядка $2\lambda/L$ (его обычно опускают).

Отдельные типы колебаний, выделенные в гелиево-неоновом лазере для резонатора со сферическими зеркалами, показаны на рис. 1.43.

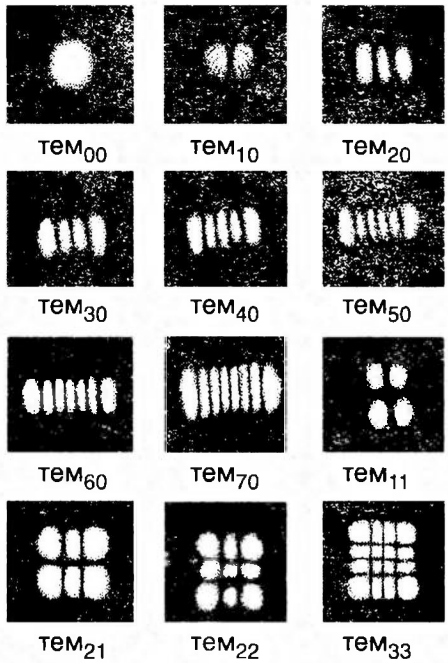


Рис. 1.43. Фотографии структуры поля излучения типов колебаний лазерного резонатора со сферическими зеркалами

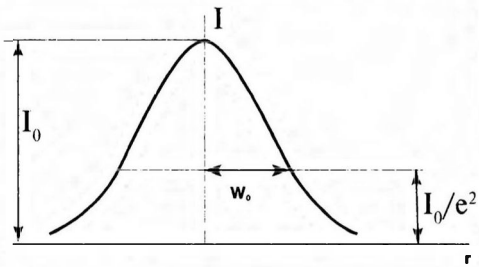


Рис. 1.44. Распределение интенсивности в одномодовом пучке

w_0 – расстояние, на котором интенсивность I в e^2 раз меньше по сравнению с интенсивностью I_0 на оси пучка

Основной модой называют такой тип колебаний, для которого индексы m и n равны нулю ($ТЕМ_{00}$); в этом случае говорят об одномодовом режиме генерации лазера. Распределение интенсивности в пучке лазера, генерирующего на основной моде ($ТЕМ_{00}$), неоднородно, так как мощность излучения сконцентрирована преимущественно вблизи оси распространения, а фазовый фронт отличается от плоского. Излучение лазера, генерирующего в одномодовом режиме, имеет в поперечном сечении гауссово распределение интенсивности:

$$I = I_0 e^{-r^2/w^2}, \qquad (1.37)$$

где I – интенсивность излучения на расстоянии r от оси распространения пучка; I_0 – интенсивность на оси пучка.

Как видно из рис. 1.44, w_0 определяется расстоянием, на котором интенсивность I в e^2 раз меньше по сравнению с интенсивностью на оси пучка. Параметр w_0 обычно называют размером пятна, он зависит от конфигурации резонатора и сечения пучка. Для такого распределения характерно, что распределение интенсивности и фаза поля с расстоянием не меняются. Излучение с гауссовым распределением может быть сфокусировано в пятно, диаметр которого меньше длины волны.

Для основной моды характерна наименьшая степень угловой расходимости пучка. Поперечные моды высших порядков имеют большой размер пятна. Кроме того, моды высших порядков имеют и большую угловую расходимость. В табл. 1.4 приведены значения коэффициентов K_m, характеризующие отношение размеров пятен мод высших порядков к размеру пятна основной моды.

При работе лазеров в многомодовом режиме обеспечивается наибольшая мощность излучения, вместе с тем увеличивается по сравнению с одномодовым режимом и расходимость излучения.

Таблица 1.4

Значения коэффициентов моды

Радиальный индекс типа колебаний	0	1	2	3	4
Коэффициент моды K_m (отношение размеров пятен)	1	1,52	1,86	2,12	2,32

При одномодовом режиме работы для основной моды расходимость пучка $\beta/2$ определяется по уровню снижения интенсивности в e^2 раз в одну сторону от оси:

$$\beta/2 = \lambda/\pi w_0, \qquad (1.38)$$

где w_0 – размер пятна в так называемой плоскости перетяжки моды TEM_{00}. Под плоскостью перетяжки понимают плоскость, в которой пучок лазерного излучения имеет минимальные размеры w_0 (рис. 1.45). Чтобы определить положение плоскости перетяжки относительно зеркал резонатора, имеющих радиусы кривизны r_1 и r_2, можно воспользоваться следующими формулами [83]:

$$z_1 = Lg_2(1 - g_1)/(g_1 + g_2 - 2g_1g_2), \qquad (1.39)$$

$$z_2 = Lg_1(1 - g_2)/(g_1 + g_2 - 2g_1g_2), \qquad (1.40)$$

где $g_1 = 1 - L/r_1$ и $g_2 = 1 - L/r_2$ – обобщенные параметры резонатора; L – длина резонатора.

Размер пятна определяется формулой:

$$w_0 = \sqrt{\frac{\lambda L}{2\pi}}, \qquad (1.41)$$

$$R_э = 2L \sqrt{\frac{g_1g_2(1 - g_1g_2)}{g_1 + g_2 - 2g_1g_2}}. \qquad (1.42)$$

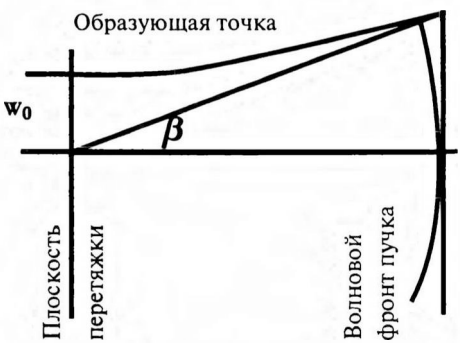


Рис. 1.45. К определению угловой расходимости пучка лазерного излучения

$R_э$ – конфокальный параметр резонатора (радиус кривизны зеркал эквивалентного резонатора, т. е. конфокального резонатора, имеющего те же пространственные характеристики, что и данный резонатор); L – длина резонатора.

В общем случае «половинный» угол расходимости пучка может быть вычислен по формуле:

$$\beta/2 = \frac{2K_m}{\sqrt{kR_э + 3{,}83/rk}}, \qquad (1.43)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; r – радиус апертурной диафрагмы резонатора; K_m – множитель, учитывающий индекс моды (для основной моды TEM_{00} $K_m = 1$).

Высокая направленность лазерного излучения определяет следующие преимущества лазеров перед обычными источниками:

– малые потери энергии при прохождении излучением больших расстояний в атмосфере;

– высокое разрешение по углу, что позволяет направлять излучение на цели, размеры которых малы по сравнению с расстоянием до них;

– возможность пространственной фильтрации принимаемого сигнала (для этого могут быть применены узкоугольные оптические системы или фотоприемники излучения с малой площадью светочувствительного слоя).

Генерация на одном типе колебаний (одномодовый режим) является необходимым условием получения минимально возможной угловой расходимости пучка лазерного излучения, которая вызвана только дифракционными явлениями. Ширина спектра излучения также зависит от числа возбуждения мод; минимальная ширина спектра наблюдается при генерации на одной аксиальной моде.

Спектр каждой поперечной моды состоит из ряда очень узких спектральных линий, которые находятся в центрах резонансных линий резонатора, соответствующих условию образования стоячих волн. Ширина резонансной кривой определяется добротностью резонатора Q:

$$\Delta\nu_p = \nu/Q \qquad (1.44)$$

и имеет значение порядка 10^6 Гц. Ширина линии $\Delta\nu$, излучаемой свободным атомом, на несколько порядков больше:

$$\Delta\nu = 2\nu\sqrt{2kT\ln 2/Mc^2}, \qquad (1.45)$$

где k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая (абсолютная) температура; M – масса атома; c – скорость света.

Например, доплеровская ширина линии 632,8 нм, излучаемой гелиево-неоновым лазером, составляет по уровню 0,5 примерно $\Delta\nu_д = 1700$ МГц. Поэтому любое излучение, частота которого находится в пределах линии люминесценции активного вещества, будет усиливаться (рис. 1.46) на резонансных частотах от ν_{g+2} до ν_{g+7} и вблизи этих частот в узких резонансных областях шириной $\Delta\nu_0$. Как видно из рис. 1.47, а, где по оси ординат показана относительная интенсивность I_ν/I_0, максимальное усиление наблюдается в центре контура усиления I и минимальное – на краях, т.е. на частотах ν_{g+2} и ν_{g+7}.

Расстояние между резонансными частотами зависит от длины резонатора L и показателя преломления n активного вещества:

$$\nu_0 = c/2n\,L. \qquad (1.46)$$

Так как все типы колебаний взаимодействуют с одним и тем же веществом, то будут «выживать» только те моды, которые, как можно выразиться, поставлены в лучшие условия, а другие – подавляться, вследствие чего некоторые частоты в спектре излучения отсутствуют (рис. 1.47, б). В отдельных случаях число таких продольных компонент может оказаться равным единице. При этом считают, что режим работы лазера одночастотный, т. е. в спектре имеется одна спектральная линия, соответствующая продольной моде резонатора. Одномодовый режим генерации можно получить, изменяя размер зеркал, расстояние между ними или мощность накачки. За счет выбора соответствующей длины резонатора лазер работает либо в многомодовом, либо в одномодовом режиме.

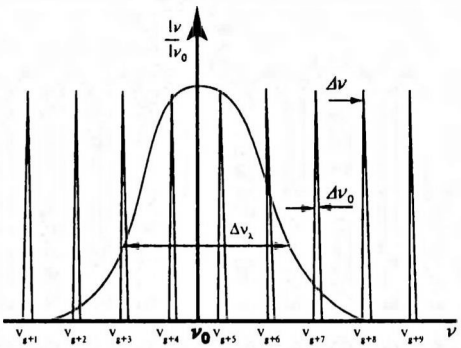


Рис. 1.46. Усиление различных типов колебаний в контуре линии люминесценции

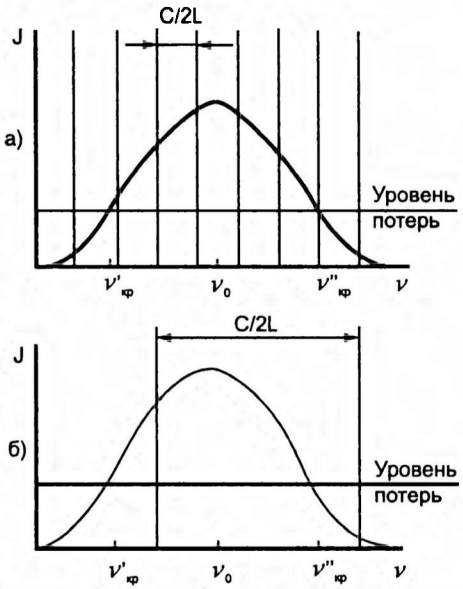


Рис.1.47. Усиление типов колебаний в зависимости от длины резонатора L

Монохроматичность излучения

Любое излучение прежде всего характеризуется распределением энергии по частотам (или длинам волн); такое распределение энергии называется спектром или полосой излучения. Обычный белый свет характеризуется широкой полосой излучаемых частот; тепловые источники излучения имеют сплошной спектр, включающий все частоты определенного интервала. Распределение энергии по частотам задается законом Планка для излучения черного тела. Лазерное излучение отличается от излучения обычных источников света узкополосностью. Частота излучения лежит в пределах ширины одной линии люминесценции активного вещества. Причем наличие резонатора обеспечивает существенное сужение спектральной линии. При этом происходит не только сужение линии люминесценции, но и распадение ее на ряд узких линий, ширины которых соответствуют типам колебаний резонатора, но все они лежат внутри линии люминесценции.

Для оценки степени монохроматичности в случае спектральной линии излучения можно принять отношение $\Delta\lambda/\lambda_0$, где λ_0 – длина волны, соответствующая максимальному излучению; $\Delta\lambda$ – полуширина линии излучения.

Если $\Delta\lambda/\lambda_0 = 0$, то такое излучение является идеально монохроматическим; если $\Delta\lambda/\lambda_0 << 1$, то излучение называется квазимонохроматическим (почти монохроматическим). Идеально монохроматического излучения практически не существует. Обычно монохроматическое излучение имеет достаточно узкий спектральный интервал, при этом степень монохроматичности μ определяется как логарифм отношения крайних длин волн спектра:

$$\mu = 2{,}3 \lg (\lambda_1/\lambda_2), \qquad (1.47)$$

где λ_1 и λ_2 – длины волн, ограничивающие спектральный интервал ($\lambda_1 > \lambda_2$).

Наличие многих типов колебаний часто является нежелательным. В случае, если поперечное сечение поля излучения имеет одномодовую структуру $ТЕМ_{00в}$, то диаграмма направленности излучения существенно сужена, хотя генерация может происходить на нескольких равностоящих (эквидистантных) частотах. Излучение происходит практически на одной частоте (точнее, узкой полосе частот). При этом ширина линии излучения определяется выражением:

$$\Delta\nu_{max} = 4\pi\, h\nu(\Delta\nu_p)^2/P, \qquad (1.48)$$

где h – постоянная Планка; P – мощность лазера; ν – частота излучения; $\Delta\nu_p$ – ширина резонансной кривой моды резонатора.

Например, для гелиево-неонового лазера, имеющего мощность излучения $P = 10^{-3}$ Вт, $\nu = 10^{15}$ Гц, $\Delta\nu = 10^7$ Гц, получим $\Delta\nu_{max} \approx 1$ Гц.

В действительности ширины линий излучения превышают вычисленные значения, так как в процессе работы лазера происходят случайные изменения длины резонатора и состояния активной среды. Поэтому для гелиево-неоновых лазеров ширина излучения обычно составляет несколько десятков килогерц, а кратковременная нестабильность, характеризуемая отношением ширины излучения к средней частоте излучения, составляет

$$\Delta\nu_{изл}/\nu = 10^{-9}.$$

Вследствие температурного дрейфа резонатора лазера, вызывающего изменение его длины, в течение длительного времени частота излучения может значительно измениться. В обычных условиях долговременная нестабильность характеризуется значением порядка 10^{-7}, а при стабилизации температуры с точностью до 0,01 °С она улучшается и составляет 10^{-8}.

Существует целый ряд методов, позволяющих получить генерацию на одной частоте и повысить ее стабильность. Наиболее простой состоит в том, что работа лазера должна осуществляться при очень малом

усилении (на пороге генерации) активной среды. При этом можно подобрать такие условия, чтобы возбуждалась только одна мода с наивысшей добротностью, а другие моды при этом не усиливались.

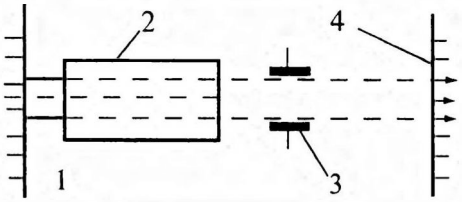


Рис. 1.48. Подавление поперечных типов колебаний с помощью диафрагмы
1, 4 – зеркала резонатора; 2 – активное вещество; 3 – диафрагма

Для создания одночастотного режима работы подавляют неаксиальные типы колебаний путем установки в резонатор диафрагмы. Так как типы колебаний, имеющие большие индексы m и n, располагаются дальше от оси резонатора, то их перекрывают диафрагмой 2 (рис. 1.48), которая устанавливается (вне активной среды) на оси резонатора, образованного зеркалами 1, 4. В этом случае через диафрагму будут проходить только аксиальные моды TEMoog.

Выделение одной продольной моды осуществляется изменением длины резонатора. При большой длине резонатора в контуре линии люминесценции оказывается целый ряд типов колебаний (между частотами $\nu'_{кр}$ и $\nu''_{кр}$), причем усиливаются только те, для которых потери меньше по сравнению с усилением (рис. 1.47). В то же время уменьшение длины резонатора приводит к уменьшению объема активной среды, а следовательно, и к падению выходной мощности.

Использование трехзеркального резонатора (рис. 1.49) позволяет не уменьшать объем активной среды. Зеркала 2 и 3 делают полупрозрачными, а зеркало 1 — непрозрачным, причем они пропускают волны тех частот, для которых длины волн кратны расстоянию L_0 между зеркалами 2 и 3. Перемещая одно из зеркал, подбирают такое расстояние L, чтобы трехзеркальный резонатор обладал достаточной добротностью на определенной частоте.

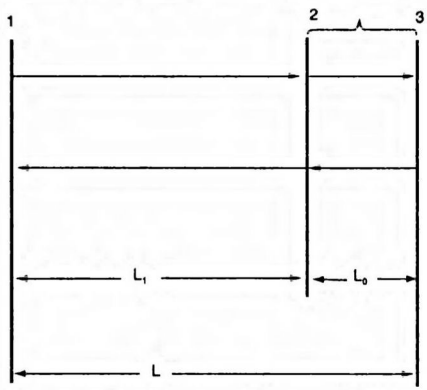


Рис. 1.49. Схема трехзеркального лазерного резонатора
1, 2, 3 – зеркала резонатора

Для создания одночастотного режима генерации используют также тонкую металлическую пленку, которая помещается в резонатор и имеет толщину, значительно меньшую длины волны (рис. 1.50).

В момент генерации в резонаторе образуются стоячие волны, причем узлы каждой моды не совпадают. Если металлическая пленка находится в месте узла какой-либо моды, то эта мода не ослабляется, а в том

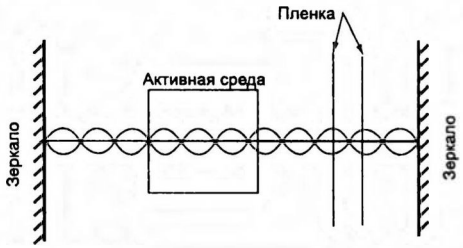


Рис. 1.50. Селекция типов колебаний с помощью металлической пленки

месте, где имеется пучность волн, соответствующий тип колебаний будет подавлен. Такие металлические пленки обычно наносят на прозрачную подложку, которую крепят внутри резонатора на пьезокерамике. Под действием приложенного напряжения пленка смещается вдоль оси резонатора.

Кроме рассмотренных методов, имеются и другие, позволяющие выделять только один вид колебаний. Высокая степень монохроматичности излучения лазеров позволяет увеличить отношение сигнал/фон на входе приемника за счет спектральной селекции, которая может быть осуществлена применением узкополосных интерференционных фильтров (с полосой пропускания в несколько ангстрем) или приемников, чувствительных к монохроматическому излучению в узкой полосе спектра.

Когерентность излучения

От степени монохроматичности излучения зависит в первую очередь когерентность, которая является следствием высокой монохроматичности излучения. Когерентность подразделяют на временную и пространственную. Временная когерентность означает корреляцию фаз колебаний в одной и той же точке пространства, но в различные моменты времени. Пространственная когерентность означает корреляцию фаз излучения в двух различных точках пространства в один и тот же момент времени.

Обычное спонтанное излучение носит случайный характер и представляет собой «беспорядочную смесь» колебаний с различными длинами волн. На рис. 1.51, а показаны составляющие излучения обычного некогерентного источника света. Как видно из рисунка, волны имеют различные амплитуды и длины, разность фаз носит случайный характер. Таким образом, эти волны не согласованы ни по длине, ни по фазе; такое излучение некогерентно. На рис. 1.51, б ломаной линией изображена результирующая кривая этих колебаний. Установить какую-либо закономерность или периодичность для нее очень трудно. В отдельных случаях результи-

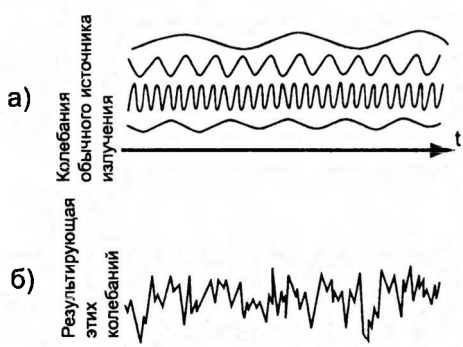


Рис. 1.51. Некогерентное излучение

рующее излучение усиливается, в других — ослабляется; все это происходит случайным образом. На рис. 1.52, а изображены составляющие когерентного излучения. Его колебания равны по частоте и амплитуде и имеют одинаковую начальную фазу. Так как фазы всех составляющих колебаний совпадают, а частоты равны, то результирующее колебание (рис. 1.52, б) имеет те же фазу и частоту, что и его составляющие, а амплитуда результирующего колебания равна сумме амплитуд составляющих колебаний. Интенсивность результирующего когерентного излучения равна сумме составляющих. Говоря об идеальной волне, имеют ввиду, что ее колебания происходят точно на частоте ν. Однако при излучении атомами электромагнитных колебаний происходят некоторые малые изменения (флуктуации) частоты ν на величину Δν. Промежуток времени, в течение которого Δν не изменяется, измеряется величиной $\Delta t = 1/\Delta\nu$, называемой временем когерентности.

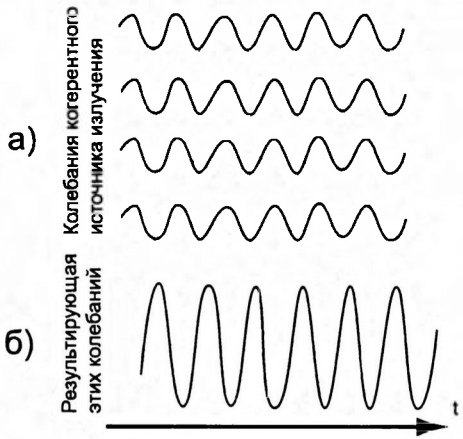


Рис. 1.52. Когерентное излучение

За любой промежуток времени, не превышающий Δt, колебания происходят почти на одной частоте, без изменений фазы колебаний. Чем больше величина Δt, тем больше временная когерентность, тем строже выполняются фазовые соотношения между волнами, испускаемыми в разные моменты времени.

В свою очередь, величина

$$\Delta\nu = 2/\pi\Delta t \qquad (1.49)$$

характеризует степень размытия частотного спектра.

В предельном случае полной когерентности время когерентности $\Delta t \to \infty$; $\Delta\nu = 0$. Со временем когерентности и шириной полосы излучения связано такое понятие, как длина когерентности $l_{ког}$, которая соответствует разности хода двух световых волн:

$$l_{ког} = c\,\Delta t = c/\Delta\nu, \qquad (1.50)$$

Например, для гелиево-неонового лазера $\Delta\nu = 10^4$ Гц, $\Delta t = 10^{-4}$ с, $l_{ког} = 30$ км.

Измеряя степень монохроматичности, можно определить и степень временной когерентности излучения.

Мерой пространственной когерентности является коэффициент когерентности $\gamma_{1,2}$, который определяется по способности волн интерферировать друг с другом:

$$\gamma_{1,2} = V(I_1 + I_2)/2\sqrt{I_1 I_2}, \quad (1.51)$$

где I_1 и I_2 – интенсивность пучков излучения; V – коэффициент видности интерференционной картины, характеризующий относительную контрастность и равный

$$V = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}). \quad (1.52)$$

Для определения пространственной когерентности можно наблюдать на экране интерференционную картину, создаваемую волнами, распространяющимися из двух пространственно разнесенных точек P_1 и P_2.

Лазерное излучение многократно отражается от зеркал резонатора, в результате чего поверхности зеркал являются поверхностями равных фаз. Поэтому для лазера значение коэффициента когерентности $\gamma_{1,2}$ для любых двух точек поперечного сечения пучка близко к 1.

Высокая степень пространственной и временной когерентности лазерного излучения позволяет измерять значительные расстояния интерференционным методом с высокой степенью точности, а также создавать узконаправленные пучки излучения, что, в свою очередь, обеспечивает значительную дальность действия лазерных приборов, облегчает пространственную селекцию полезного сигнала и получение высокого разрешения при использовании лазеров для угловых измерений.

Поляризованность

Многие источники излучают свет, который является частично поляризованным. Такое излучение характеризуется с помощью понятия *степени поляризации P,* которое определяют из соотношения:

$$P = I_0 / (I_н + I_п), \quad (1.53)$$

где $I_п$ – интенсивность полностью поляризованной части излучения; I_0 – интенсивность источника света; $I_н$ – интенсивность неполяризованной части излучения.

Солнечный свет, как всякий естественный, является неполяризованным светом; электрическое поле суммарной волны хаотично изменяет свою величину и направление.

Естественный свет можно превратить в плоскополяризованный. Для этого его направляют через поляроид, который пропускает волны с определенным направлением поляризации (совпадающим с направлением плоскости поляризации поляроида) и поглощает волны, имеющие другие направления поляризации.

Следует отметить, что полностью поляризованным, т.е. имеющим одно строго определенное направление колебаний вектора напряженности электрического поля E, может быть только излучение с высокой степенью монохроматичности. Излучение газовых лазеров практически обладает 100 %-ной поляризацией.

Высокая степень поляризации лазеров определяется их конструкцией и свойствами активной среды. Например, в первых образцах газовых лазеров торец газовой кюветы представлял собой стеклянную или кварцевую пластинку. При нормальном падении лучей на такую пластинку коэффициент потерь α_n, определяется формулой [18]:

$$\alpha_n = 200[(n - 1) / (n + 1)]^2, \qquad (1.54)$$

где α_n – коэффициент потерь, в %; n – показатель преломления материала пластинки.

При такой установке газоразрядной трубки потери составляют 7–13 %, что значительно снижает добротность резонатора и делает невозможной генерацию на большинстве переходов в газовой среде.

Если пластинка поставлена наклонно к пучку излучения, то отражение от нее в значительной степени зависит от ориентации плоскости поляризации падающего излучения.

Максимальный коэффициент отражения ρ_{max} наблюдается, когда плоскость поляризации перпендикулярна плоскости падения:

$$\rho_{max} = \sin^2(i - i') / \sin^2(i + i'), \qquad (1.55)$$

где i и i′ – соответственно угол падения и преломления. Минимальный коэффициент отражения ρ_{min} соответствует случаю, когда плоскость падения и плоскость поляризации излучения совпадают. Значение ρ_{min} определяется по формуле

$$\rho_{min} = \operatorname{tg}^2(i - i') / \operatorname{tg}^2(i + i') \qquad (1.56)$$

и равно нулю, если угол падения равен углу Брюстера i_0. (Углом Брюстера называется угол, тангенс которого равен коэффициенту преломления материала пластинки $\operatorname{tg} i_0 = n$). В этом случае $i_0 + i_0' = \pi/2$.

Таким образом, если пластинка установлена под углом Брюстера к оси разрядной трубки, излучение, поляризованное в плоскости падения, проходит без потерь. Высокая степень поляризации газовых лазеров позволяет применять внешние зеркала, обеспечивающие малые потери при прохождении излучения через окна (см. рис. 1.53). При такой конструкции полусферы газоразрядные трубки закрыты стеклянными окнами, установленными под углом Брюстера к оптической оси. Окна, установленные под углом Брюстера, уменьшают потери при отражении от поверхности окон. Эти окна практически не создают

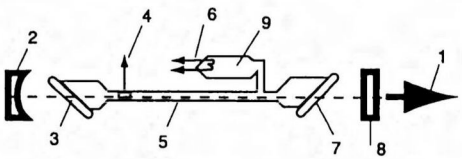


Рис. 1.53. Принципиальная схема гелиево-неонового лазера

1 – выходное излучение; 2, 8 – зеркала резонатора; 3, 7 – выходные окна трубки; 4 – анод; 5– рабочий капилляр трубки; 6 – катод; 9 – резервный баллон

потерь на отражение для излучения, поляризованного в плоскости падения, и делают невозможной генерацию излучения, поляризованного в другой плоскости.

Свойства поляризованного излучения лазеров используют в геодезии при ориентировании. За счет поляризованного излучения увеличиваются помехозащищенность и дальность действия различных геодезических приборов, так как улучшается отношение сигнал/фон в результате использования поляризационных фильтров.

Мощность излучения

Мощность оптического излучения, или лучистый поток, определяется энергией, излучаемой в единицу времени. Большая мощность излучения лазеров достигается тем, что в процессе излучения одновременно участвует большое число возбужденных частиц. Выходная мощность газовых лазеров в основном меньше, чем твердотельных, вследствие относительно невысокой плотности возбужденных частиц газа. Мощность лазера возрастает с увеличением концентрации активных частиц и размеров активного вещества.

Одной из особенностей лазерного излучения является невозможность получить высокую степень монохроматичности и когерентности при большой мощности; увеличение мощности вызывает расширение полосы частот, а это, в свою очередь, уменьшает степень монохроматичности и когерентности.

Вместе с тем интенсивность излучения маломощных лазеров достаточно велика благодаря малой угловой расходимости и во много раз превышает интенсивность обычных источников света. В табл. 1.5 для сравнения приведены характеристики обычных источников света и гелиево-неонового лазера.

Мощные лазеры являются самыми интенсивными источниками излучения.

Мощность, отнесенная к единице спектрального интервала излучения, называется спектральной плотностью мощности. В ряде случаев даже при малой мощности излучения можно получить очень большую спектральную плотность мощности, если излучение происходит в достаточно узком спектральном диапазоне.

Спектральная плотность мощности лазеров может на несколько порядков превышать спектральную плотность мощности Солнца. Полная плотность мощности излучения Солнца составляет примерно $7 \cdot 10^3$ Вт/см^2. Эта энергия распределяется в широком спектральном диапазоне (видимый участок спектра равен $3{,}5 \cdot 10^8$ МГц), и поэтому мощность излучения Солнца в полосе, равной 1 МГц, на волне 0,55 мкм (зеленый цвет) с каждого квадратного сантиметра поверхности составляет всего 10^{-5} Вт (10 мкВт).

Таблица 1.5

Энергетические характеристики источников света

Источник света	Мощность излучения, Вт	Угол излучения		Интенсивность излучения, Вт/ср	Спектр излучения, мкм
		плоский, град	телесный, ср		
Лампа накаливания	1,3	360	12,6	0,1	Непрерывный в оптическом диапазоне
Газоразрядная аргоноциркониевая лампа	1,4	45	0,6	2,3	То же
Газоразрядная ртутная лампа высокого давления	19	180	6,3	3,0	Линейчатый, 0,548; 0,580
Полупроводниковый диод на арсениде галлия	$3 \cdot 10^{-3}$	8	$2 \cdot 10^{-2}$	1,5	0,65
Гелиево-неоновый лазер	$25 \cdot 10^{-3}$	0,2	$12 \cdot 10^{-6}$	2000	0,6328

Вместе с тем лазеры могут генерировать излучение мощностью до 10^4 Вт в полосе менее 1 МГц.

Благодаря своим уникальным свойствам, в том числе высокой интенсивности и значительной спектральной плотности мощности, лазерные геодезические приборы обеспечивают значительную дальность действия и высокую точность измерений.

Дальность действия приборов и устройств, в которых лазеры используют в качестве излучателей, зависит не только от мощности излучения, но и от стабильности положения лазерного пучка в пространстве. В свою очередь, нестабильность положения пучка лазерного излучения в пространстве обусловлена температурными деформациями корпуса прибора.

Экспериментально выявлено, что после включения лазера, установленного горизонтально, пучок излучения, выходящий из него, начинает отклоняться вниз и спустя некоторое время занимает некоторое определенное положение. При этом угол наклона относительно начального положения пропорционален изменению температуры корпуса прибора. Так как нагрев корпуса лазера описывается дифференциальным уравнением, а между изменением угла наклона и изменением

температуры корпуса существует линейная зависимость, то изменение угла наклона пучка под воздействием нагрева корпуса также может быть выражено дифференциальным уравнением с соответствующими начальными условиями. Поэтому можно считать, что скорость изменения угла наклона пучка пропорциональна величине угла отклонения пучка от начального положения, т. е.

$$\tau \frac{d\alpha}{d\tau} + \alpha - \alpha_0 = 0, \qquad (1.57)$$

где τ – постоянная прибора. Решение этого дифференциального уравнения имеет вид:

$$\alpha = \alpha_0 [1 - \exp(-t/\tau)], \qquad (1.58)$$

где α_0 – амплитуда угла отклонения; t – время с момента включения прибора; τ – постоянная прибора.

Как показали исследования, гелиево-неоновые лазеры, используемые в геодезии, в начале обеспечивали невысокую стабильность положения пучка излучения в пространстве. В настоящее время выпускаются гелиево-неоновые лазеры с холодным катодом; они имеют конструкцию, которая обеспечивает высокую стабильность положения оси генерируемого пучка излучения.

1.8. Техника безопасности при работе с лазерными приборами

При работе с радиотехническими приборами необходимо соблюдать технику безопасности. Лазеры в этом отношении не являются исключением. Опасность, вызываемая лазерным излучением, качественно не отличается от опасности, создаваемой высокоинтенсивными источниками света.

Наиболее уязвимым органом для поражения лазерным излучением является глаз. Лазерное излучение, имеющее малую расходимость, фокусируется с помощью глазной линзы на сетчатке в очень малое пятно (~20 мкм), в результате чего плотность излучения в нем оказывается на четыре-пять порядков выше, чем плотность мощности падающего на глаз излучения. Действительно, если диаметр зрачка 5 мм, а диаметр сфокусированного пятна составляет 20 мкм, то увеличение плотности мощности на сетчатке глаза пропорционально 5^2 мм / 20^2 мкм, т.е. увеличивается в $6 \cdot 10^4$ раз. Поэтому сетчатка может быть повреждена при уровнях мощности лазера, не представляющих опасности для других частей тела. Лазерное излучение обладает свойством вызывать кумулятивный эффект, поэтому допустимая доза облучения зависит от времени облучения и спектрального состава излучения. На сетчатке может фокусироваться только излучение с длиной волны 0,4–1,4 мкм, которое проходит через хрусталик глаза и воздействует на нее. Лазерное инфракрасное излучение (>1,4 мкм) и ультрафиолетовое (<0,4 мкм) поглощаются глазной средой и не достигают сетчатки. Если интенсивность поглоща-

емого глазной средой излучения достаточно высока, обычно повреждается роговая обо- лочка глаза. Спектральные характеристики человеческого глаза приведены на рис. 1.54. Кривая «а» иллюстрирует пропускание света оптической средой глаза, кривая «б», характеризующая степень опасности для сетчатки в зависимости от длины волны излучения, определяется как произведение пропускания глазной среды на поглощение различными слоями сетчатки.

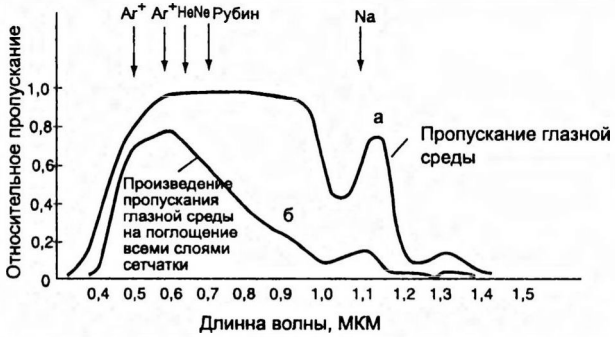


Рис. 1.54. Спектральные характеристики человеческого глаза

Для физиологических изменений большое значение имеют высокая степень направленности лазерного пучка, малая величина фокального пятна и высокая интенсивность падающего на сетчатку излучения. Кроме того, на характер и степень производимых нарушений оказывают влияние и другие факторы: длительность импульса лазерного излучения, пространственное распределение энергии в пучке, различия в структуре разных участков и ее пигментации, наличие светового фона, а также особенности фокусировки каждого отдельного глаза. На рис. 1.55 приведены экспериментальные пороги плотности мощности на сетчатке глаза для различных размеров светового пятна (мкм), вызывающие минимальные ожоги в зависимости от длительности воздействия светового пятна на сетчатку глаза.

В настоящее время наиболее широко используют гелиево-неоновые и полупроводниковые лазеры, имеющие выходную мощность в несколько милливатт. Их выходная мощность близка к значению максимально допустимого уровня. На рис. 1.55 приведены пороговые мощности для периферийной области и чувствительного пятна глаза, вызы-



Рис. 1.55. Пороговая плотность мощности, вызывающая минимальные офтальмологически обнаруживаемые повреждения сетчатки глаза для указанных размеров светового пятна на сетчатке

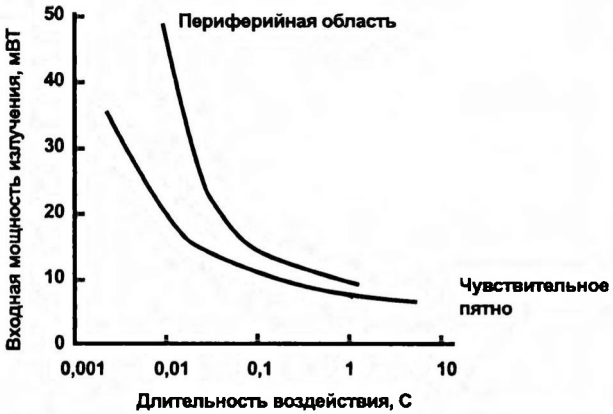


Рис. 1.56. Пороговые значения мощности He-Ne лазера, вызывающие минимальные повреждения сетчатки глаза в зависимости от длительности экспозиции

вающие минимальные повреждения сетчатки обезьян резус, в зависимости от длительности облучения. Чувствительное пятно – это небольшой участок сетчатки наиболее четкого восприятия. Малый ожог на чувствительном пятне снижает остроту зрения, а на периферийные участки сетчатки оказывает меньшее влияние. С течением времени малые ожоги на сетчатке заживают, но приводят к потере остроты зрения. Согласно графику, приведенному на рис. 1.56, минимальная мощность выходного излучения гелиево-неонового лазера, которая вызывает повреждение глаз, составляет 7 мВт.

Экспериментально доказано, что пороговое значение плотности энергии на сетчатке составляет 0,1–1,0 Дж/см^2 при длительности действия 10–15 нс.

Предельно допустимый безопасный уровень для глаз составляет $1 \cdot 10^{-4}$ Дж/см^2. Световой пучок такой плотности не оказывает вредного воздействия на кожу. Вся энергия излучения поглощается тонким слоем кожи. На рис. 1.57 приведены пороговые значения облученности, создаваемой лазером на CO_2, при которых могут появляться ожоги.

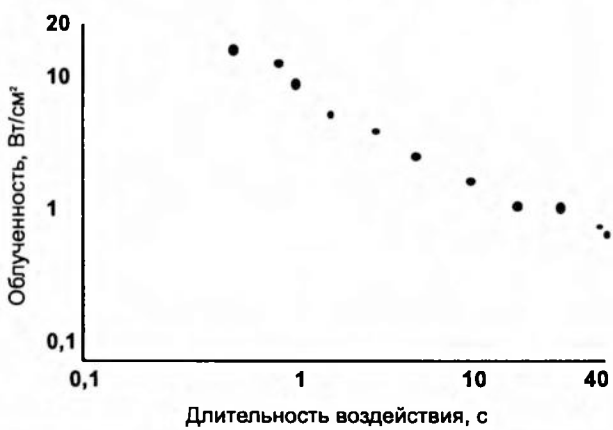


Рис. 1.57. Пороговые значения для минимальных ожогов кожи в зависимости от времени облучения CO_2 лазером

Более высокие плотности мощности лазерного излучения могут вызывать ударные эффекты, которые повреждают органы тела, вызывая их смещение. Однако лазеры, имеющие значительную выходную мощность излучения,

для измерений, как правило, не применяют. В геодезии используются лазеры, мощность излучения которых не превышает 4 мВт.

В тех случаях, когда выполняются работы с лазерами, энергия излучения которых выше допустимого безопасного значения, используют защитные очки. Защитные очки, представляющие собой узкополосный светофильтр, сильно ослабляют лазерное излучение, одновременно пропуская другие длины волн. Очки имеют маркировку по оптической плотности и эффективной длине волны.

При работе с лазерными приборами значительную опасность представляет источник электропитания, который может вызвать поражение током, поэтому необходимо соблюдать те же меры предосторожности, что и при использовании высоковольтных устройств.

Кроме того, возможны опасности, связанные с использованием в лазерных приборах ядовитых или агрессивных веществ в модуляторах, затворах, пленках и т. п. Министерство здравоохранения утвердило санитарные нормы и правила, которые необходимо выполнять при работе с лазерными устройствами.

Согласно этому документу лазерные установки делят на четыре класса по степени опасности генерируемого ими излучения (табл. 1.6). К лазерам I класса относятся лазеры, излучение которых не представляет опасности при облучении глаз прямым или зеркально отраженным излучением. К лазерам II класса относятся лазеры, излучение которых представляет опасность при облучении глаз прямым или зеркально отраженным излучением. К лазерам III класса относятся лазеры, выходное излучение которых представляет опасность при облучении глаз прямым, зеркально отраженным, а также диффузно отраженным излучением на расстоянии 10 см от диффузно отражающей поверхности или при облучении кожи прямым и зеркально отраженным излучением. К лазерам IV класса относятся лазеры, выходное излучение которых представляет опасность при облучении кожи диффузно отраженным излучением на расстоянии 10 см от диффузно отражающей поверхности.

Таблица 1.6

Классификация лазерных приборов по степени опасности лазерного излучения

Класс	Значение
1	Безопасно для достаточно предсказуемого применения.
2	Применяется только для видимых лазеров. Защита глаз обычная, например, рефлекс промывания глаза. Не следует использовать на уровне головы.
3	Опасно прямое попадание в глаза, особенно через оптические инструменты (например, бинокль или телескоп). Следует использовать квалифицированных рабочих и специалистов.
4	Очень опасно при использовании на открытой местности.

Лазеры, используемые в геодезических приборах, относятся ко II классу.

При работе с приборами, использующими в качестве источника излучения лазеры, основное правило техники безопасности заключается в том, чтобы не допускать попадания прямого и зеркально отраженного излучения в глаза оператора и лиц, случайно попавших в зону действия пучка.

Если лазерное излучение наблюдается не более одного раза в день и такое наблюдение не связано с производственной необходимостью, то оно считается случайным. Для определения границы лазерной опасной зоны рассчитывают плотность потока излучения по трассе его распространения. Для этого используют такие паспортные данные прибора, как диаметр пучка на выходе из прибора и его расходимость, а также мощность излучения. Кроме того, необходимо знать коэффициент отражения от мишени (марки).

Для безопасного ведения геодезических работ рекомендуется соблюдать следующие правила:

- место производства работ должно быть ограждено и установлен предупредительный плакат (рис. 1.58) или сигнальная лампа;
- перед работой из зоны действия пучка лазерного излучения необходимо удалить все хорошо отражающие предметы;
- пучок лазерного излучения должен проходить, по возможности, выше головы или ниже пояса человека;
- соблюдать требования техники безопасности, установленные для работы с электрическими приборами;
- все работники должны быть информированы о вредном воздействии лазерного излучения на сетчатку глаз;
- пучок лазерного излучения не должен выходить за пределы рабочей площадки;
- категорически запрещается вскрывать лазерный прибор и его блок питания во включенном состоянии;
- соединительные кабели прибора не должны иметь повреждений.



Рис. 1.58. Предупредительный плакат, устанавливаемый при работе с лазерными приборами

При выполнении маркшейдерских работ возникает дополнительная опасность, связанная с воспламенением атмосферы в шахте. Поэтому маркшейдерские приборы, содержащие источник лазерного излучения, должны иметь дополнительную защиту, которая обеспечивает фотобезопасное излучение.

ГЛАВА 2
ПРИБОРЫ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Механические мерные приборы. Оптические дальномеры

Приборы для измерения длин линий, применяемые в настоящее время в геодезии, можно условно разделить на две большие группы: механические и физико-оптические.

Механические мерные приборы представляют собой линейные меры различной длины, изготавливаемые чаще всего из металла либо фибергласа с капроновым кордом в виде лент, рулеток, проволок и т. п., служащие для непосредственного измерения длины линии путем последовательного отложения длины мерного прибора в створе измеряемой линии. Результат измерений получают суммированием количества отложений в принятых единицах измерений.

Измерения производят либо по поверхности земли, либо подвешивая мерный прибор на небольшой высоте (1—1,5 м) на специальных штативах. В обоих случаях вместо прямой — кратчайшего расстояния между конечными точками линии — измеряют некоторую ломаную линию. Поэтому для получения горизонтального проложения измеряют углы наклона линии или отдельных ее частей.

Согласно ГОСТа 7502-89, отечественная промышленность выпускает рулетки со шкалами номинальной длины: 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 и 100 м. Рулетки изготавливают с лентами из нержавеющей стали (в условном обозначении рулетки Н): углеродистой стали (в условном обозначении рулетки У) с защитным антикоррозионным покрытием: лаковым, эмалевым, полимерным. Измерительные ленты рулеток изготавливаются плоскими. По требованию потребителя ленты для рулеток длиной до 5 м с началом шкалы, совпадающим с торцом измерительной ленты, изготавливаются выпуклыми (желобчатыми).

В зависимости от положения начала шкалы на измерительной ленте рулетки ГОСТ предусматривает выпуск рулеток в двух исполнениях:

- начало шкалы сдвинуто от торца измерительной ленты не менее 150 мм;
- начало шкалы совпадает с торцом измерительной ленты.

Условное обозначение рулеток должно состоять из номинальной длины шкалы, материала ленты, класса точности, конструктивного изготовления вытяжного конца ленты и обозначения настоящего стандарта. Шкалы рулеток наносят с миллиметровыми, сантиметровыми, дециметровыми и метровыми интервалами. По точности нанесения шкал рулетки могут изготовляться двух классов: 3-го и 2-го классов.

Отклонение действительной длины шкал рулеток от номинального значения при температуре окружающей среды (20±5 °С) и номинальном натяжении должно быть не более указанного в табл. 2.1

Таблица 2.1

Наименование элемента шкалы	Допустимое отклонение действительной длины, мм, не более, для классов точности	
	2	3
Миллиметровый интервал	±0,15	±0,20
Сантиметровый интервал	±0,20	±0,30
Отрезок шкалы 1 м и более	±0,30 + 0,15 (L – 1)	±0.40 + 0.20 (L – 1)
Примечание: L – число полных и неполных метров в отрезке		

Рулетки должны быть работоспособны при температуре плюс 50 °С до минус 40 °С и относительной влажности 98 % при плюс 20 °С. Полный средний ресурс для рулеток из нержавеющей стали – 2000 циклов измерений, рулеток с лентами из углеродистой стали – 1500 циклов (1 цикл включает вытягивание на полную длину, натяжение, отсчет, свертывание ленты). Рулетки в зависимости от класса точности и материала изготовления обеспечивают производство линейных измерений с относительными ошибками от 1 : 2000 до 1 : 20 000. При измерениях повышенной точности необходимы тщательное компарирование рулетки, измерение и учет температуры, а также постоянство натяжения. Рулетки с учетом их технических характеристик можно рекомендовать для различных геодезических работ: измерение линий, разбивочные работы, поэтажное распространение отметок, исполнительные съемки, различные обмеры габаритов конструкций и др. Долговечность рулеток в первую очередь зависит от качества используемых в них лент. Зарубежные фирмы выпускают рулетки (см. табл. 2.2 Приложения), в которых используются ленты следующих видов:

1. стальная лента с делениями, нанесенными методом травления;
2. стальная крашеная лента;
3. стальная крашеная лента с полиамидным покрытием;
4. лента из нержавеющей стали с делениями, нанесенными методом травления;
5. фибергласовая лента с капроновым кордом.

Наиболее долговечными являются ленты, изготовленные из нержавеющей стали, и ленты, имеющие полиамидное покрытие. Полиамид – прозрачный пластик, который надежно защищает металлические ленты от воздействия влаги и трения. Рулетки с такими лентами не ржавеют, разметка на них не стирается.

В последние годы все большее распространение получают рулетки с фибергласовой лентой с капроновым кордом либо со стальной кра-

шеной лентой с полиамидным покрытием, которые износостойки и практически не подвержены коррозии.

Достоинства рулеток: компактность, малый вес, простота устройства и эксплуатации при сравнительно высокой точности измерений, особенно коротких линий. Недостатки – большая трудоемкость при измерении длинных линий, необходимость расчистки наземной трассы, вешения, измерения углов наклона отдельных участков линий и т. д.

При измерениях с невысокой точностью нередко используются мерные колеса, которые выполняются из легкого и прочного никеле-

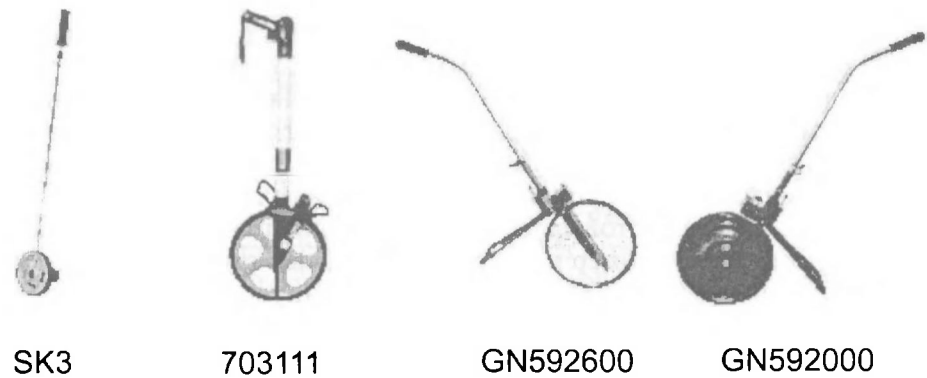


Рис. 2.1. Мерные колеса

вого сплава и изготавливаются в различных модификациях: механические, электронные. На рис. 2.1 показан внешний вид таких устройств.

При измерении расстояния между двумя точками мерное колесо прокатывают от одной точки до другой, а отсчет берется по счетчику, установленному на оси мерного колеса (механические мерные колеса), либо на рукоятке (электронные мерные колеса). Они применяются для промеров участков дорог, участков лесных угодий и железнодорожных путей в тех случаях, где не требуется высокая точность.

Оптические дальномеры. При выполнении работ в труднодоступных районах – в таежной заболоченной местности, в горах, в городских условиях – единственно возможным средством для измерения расстояний являются дальномеры.

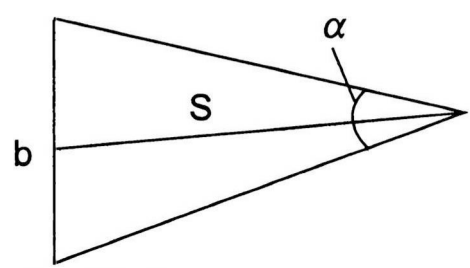


Рис. 2.2. Определение растояния из параллактического треугольника

Дальномеры подразделяют на геометрические (оптические) и электронные. Оптический даль-

номер представляет собой оптико-механическое устройство, принцип действия которого основан на решении параллактического треугольника, образуемого базой b и параллактическим углом α (рис. 2.2). Из параллактического треугольника определяют измеряемое расстояние:

$$S = (b/2)\,\mathrm{ctg}\,\alpha/2 + c. \qquad (2.1)$$

В зависимости от этого различают оптические дальномеры с переменной (измеряемой) базой b и постоянным углом α или с постоянной базой b и переменным (измеряемым) углом α.

Одну из величин (b или α) принимают постоянной, другую измеряют. В зависимости от этого различают оптические дальномеры с переменной (измеряемой) базой b и постоянным углом α или с постоянной базой b и переменным (измеряемым) углом α. Конструктивно оптические дальномеры могут быть выполнены в виде насадки на зрительную трубу, самостоятельного прибора, встроенного узла или в виде одного из элементов зрительной трубы. В настоящее время из оптических дальномеров в основном используется нитяной дальномер.

Это наиболее простой дальномер с постоянным параллактическим углом. Нитяной дальномер имеется в зрительных трубах большинства геодезических приборов. Он содержит стеклянную пластинку с нанесенными на ней двумя горизонтальными нитями, расположенными на равном расстоянии друг от друга. Пластинка помещается в окулярной части зрительной трубы геодезического инструмен та.

При измерениях отсчет берут по вертикальной рейке по крайним нитям сетки, а затем вычисляют расстояние:

$$S = Kl + c, \qquad (2.2)$$

где K = 100 – коэффициент дальномера; l – разность отсчетов по рейке; c – постоянная дальномера. Точность измерения расстояния нитяным дальномером характеризуется относительной ошибкой ~1/300 – 1/400 и в основном зависит от ошибки отсчета по рейке. Измеряемое расстояние — до 200–300 м.

2.2. Электромагнитные способы измерения расстояний

В основу работы всех светодальномеров положен электромагнитный способ измерения расстояний. Практически все способы определения скорости света можно использовать и для решения обратной задачи – определения расстояния по времени распространения и известной скорости света.

При этом скорость световых волн во время измерений предполагается постоянной и известной. Следовательно, измеренное расстояние будет иметь относительную ошибку, равную относительной ошибке в принятом для вычислений значении скорости света даже в том случае, когда все инструментальные ошибки сведены к нулю. Светодальномеры в зависимости от характера излучения разделяют на импульсные и фазовые.

Схема фазового дальномера была впервые предложена в 1933 г. советским изобретателем Г.И. Трофимуком. В 1936 г. в Государственном оптическом институте (Ленинград) советскими физиками А.А. Лебедевым, В.Г. Вафиади, В.В. Балаковым был создан действующий макет дальномера, но он имел невысокую точность и не получил широкого применения. К тому же результаты работы были опубликованы спустя двадцать лет.

Практическое широкое использование светодальномеров связано с созданием в 1952 г. Э. Бергстрандтом (Швеция) первого фазового дальномера, названного геодиметром[39].

В СССР первый светодальномер СВВ-1, который серийно выпускался на протяжении 25 лет, был создан в 1953 г. коллективом разработчиков под руководством В.А. Величко и был назван в честь его создателей светодальномером Величко–Васильева (СВВ).

С помощью импульсных дальномеров, как правило, измеряют расстояния до диффузноотражающих объектов, а с помощью фазовых – до отражателей. В последнее время появились фазовые светодальномеры, которые измеряют расстояния до точек без установки на них отражателей, т. е. отраженый сигнал принимается от объекта измерений. Расстояние до измеряемой точки может быть вычислено по формуле:

$$S = v\tau/2, \qquad (2.3)$$

где v – скорость света в воздухе, которая в момент измерений предполагается известной и постоянной; τ – время прохождения световых волн до измеряемой точки и обратно. Скорость света в воздухе находят с помощью выражения:

$$v = c/n, \qquad (2.4)$$

где c = 299 792 458 м/с – скорость света в вакууме; n – показатель преломления света в воздухе, зависящий от длины волны излучения, температуры, давления и влажности. Зависимость n от длины волны света выражается формулой Коши:

$$10^6(n - 1) = N_0 = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4, \qquad (2.5)$$

где N_0 – индекс преломления в стандартных условиях (T_0 =15 °С, p = 760 мм рт. ст.); λ – длина волны света в вакууме; A, B, C – экспериментально определяемые постоянные, называемые дисперсионными коэффициентами. Считается, что наиболее точно (до $5\cdot10^{-8}$) дисперсионные коэффициенты получены в 1966 г. Эдленом:

$$N_0 = 272{,}613 + 3\cdot1{,}52294/\lambda^2 + 5\cdot0{,}01367/\lambda^4. \qquad (2.6)$$

Для уменьшения ошибок, связанных с условиями распространения световых волн на трассе в момент измерений, определяют плотность воздуха как функцию его температуры, давления и влажности. В светодальномерии обычно используют формулу Барелла и Сирса:

$$N = N_0(T_0/P_0)\cdot\frac{P-e}{T} + [N_0T_0/P_0 - (17{,}045 - 0{,}5572/\lambda^2)]\, e/T, \quad (2.7)$$

где N_0 определяют по формуле (2.6); T_0, p_0 – стандартные значения термодинамической температуры и давления воздуха, при которых вычислено значение N; e – влажность воздуха в мм рт. ст. Погрешность определения индекса преломления N зависит от точности измерений T, p и e, т. е.:

$$\sigma_n = \sqrt{(dn/dT)^2\sigma_T^2 + (dn/dP)^2\sigma_P^2 + (dn/de)^2\sigma_e^2}\,. \quad (2.8)$$

Так как атмосфера является неоднородной средой, то температура, давление и влажность меняются не только от точки к точке, вдоль трассы, но и во времени, поэтому при измерении расстояний должна быть известна скорость света <v>, осредненная для всей трассы (знак < > означает осреднение).

Если изменения температуры, давления и влажности не учитывать, то для наземных условий, где температура меняется от –40 до +40 °С, давление от 800 до 500 мм рт. ст., влажность от 1 до 30 мм рт. ст. (1 мм рт. ст. = 133,2 Па), относительная погрешность в вычислении скорости распространения волн составит 1 : 5000 и, следовательно, такую же погрешность будет иметь измеряемое расстояние. Для повышения точности определения v необходимо знать среднее интегральное значение <n> показателя преломления воздуха:

$$<n> = 1/L\int_0^L n(x)dx\,. \quad (2.9)$$

Среднее интегральное значение показателя преломления может быть определено приближенно, так как его вычисляют на основе измерений метеоэлементов в крайних точках. При этом относительная погрешность в длине измеряемой линии, обусловленная погрешностью определения метеоэлементов, характеризуется величиной 1:500 000. Для более точных измерений используют дисперсионный метод определения среднего вдоль трассы показателя преломления, который предложен М.Т. Прилепиным [125, 126] и рассмотрен ниже (см. 2.4.). Из формулы (2.3) можно заключить, что для определения расстояния с точностью 1 см – 1 мм необходимо измерять время с точностью порядка 10^{-10} – 10^{-11} с. Измерить время с указанной точностью можно косвенно – фазовым способом. Непосредственное измерение времени импульсным способом обеспечивает несколько меньшую точность.

Следует отметить, что при измерении небольших расстоянии (до 1–2 км, что имеет место в инженерной геодезии), точность измерений зависит, главным образом, от ошибок определения времени распространения света. При измерениях больших расстояний на точность измерений начинают оказывать ошибки определения скорости

распространения электромагнитных колебаний в воздухе, что связано с точностью оценки условий прохождения света в атмосфере.

2.3. Импульсный и фазовый способы измерения расстояний. Основные элементы светодальномеров

Принципиальная структурная схема светодальномера изображена на рис. 2.3. Светодальномеры работают по диффузно отражающим визирным целям или специальным отражателям (зеркально-линзовым, сферическим, трипельпризменным).

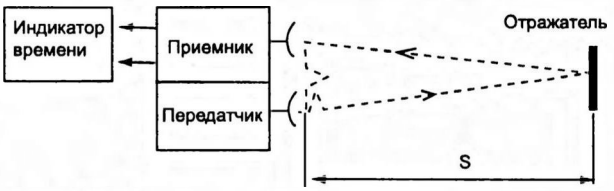


Рис. 2.3. Принципиальная структурная схема светодальномера

Если используется мощный источник излучения, то можно измерять расстояние, не применяя отражатель, т.е. по сигналу, отраженному непосредственно от визирной цели (например, стена побеленного здания имеет отражающую способность 15–20 %). Передатчик импульсного дальномера представляет собой источник излучения с формирователем импульсов (модулятором) и коллиматором. Он формирует импульсы малой длительности с большой скважностью (~1000 и более) и посылает их в заданном направлении. Под скважностью понимают отношение периода повторения импульсов T к длительности импульса τ (рис. 2.4, а). Если скважность мала, т. е. $T < t_{2S}$ (t_{2S} – время пробега импульсом двойного измеряемого расстояния), то отраженный сигнал достигает приемника позже, чем излучается следующий импульс, и поэтому нельзя однозначно получать величину измеряемого расстояния. Необходимо, чтобы соблюдалось условие $T > 2S/v$.

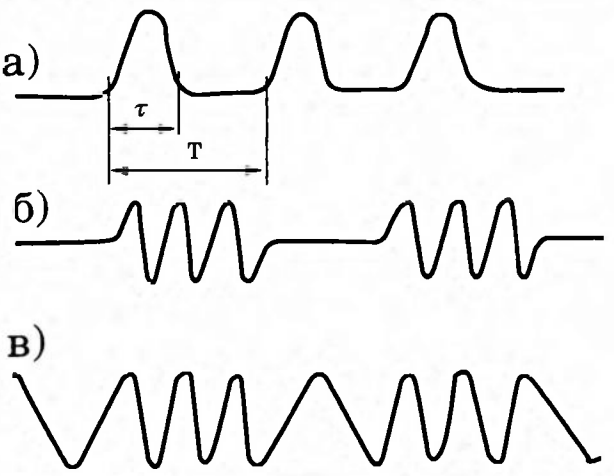


Рис. 2.4. Форма импульсов: немодулированных (а), модулированных по амплитуде (б) и частоте (в)

Сигнал представляет собой высокочастотные колебания, модулированные по амплитуде или частоте. При амплитудной модуляции (рис. 2.4, б) во время импульса излучаются высокочастот-

ные колебания постоянной амплитуды; в интервале между импульсами излучение отсутствует. При частотной модуляции (рис. 2.4, в) частота колебаний во время импульса отличается от частоты колебаний между импульсами, а амплитуда все время остается постоянной.

Более просто осуществляется амплитудная модуляция. При работе дальномера приемопередатчик устанавливают на начальной, а отражатель на конечной точках линии и взаимно ориентируют. Передатчик излучает импульс энергии, который расщепляется на два: зондирующий и опорный. Опорный сигнал поступает на вход фотоприемника, на выходе которого регистрируется старт-сигнал. Через какое-то время отраженный от цели световой сигнал поступает также на фотоприемник, на выходе которого регистрируется стоп-сигнал (зондирующий импульс). Зондирующий импульс смещается относительно опорного, если осуществляется наблюдение подвижного объекта. Опорный импульс с фотоприемника поступает на вход счетчика, который подсчитывает количество квантующих импульсов до тех пор, пока на вход счетчика не поступит стоп-импульс, т. е. импульс, отраженный от цели. Интервал между опорным и стоп-импульсами равен времени прохождения светом двойного измеряемого расстояния.

Точность измерения импульсным методом в первую очередь обусловлена точностью измерения временных интервалов, которая зависит от крутизны фронтов опорного и зондирующего импульсов и частоты квантующих импульсов.

Погрешность однократно измеренного расстояния импульсным дальномером можно оценить с помощью следующего выражения:

$$\delta_S = \frac{v}{2}\sqrt{\delta_\tau{}^2 + (\delta_{\Delta N}/f)^2}, \qquad (2.10)$$

где v – скорость света в воздухе; δ_τ – погрешность задания временного интервала; $\delta_{\Delta N}$ – погрешность определения дробной части периода следования квантующих импульсов; f – частота квантующих импульсов.

Для получения точности измерений в несколько сантиметров необходима частота квантующих импульсов в несколько гигагерц. Использование импульсных лазеров позволяет получать оптические импульсы длительностью от 10^{-9} до 10^{-12} с. Повысить точность измерения временных интервалов можно, используя электронные счетчики, которые с помощью дополнительного аналогового интерполятора последней единицы счета позволяют уточнить временной интервал до 0,1 нс. Другой способ, основанный на электронном анализе импульсов, позволяет воспроизводить и записывать с шагом 0,025 нс весь импульс.

По этим значениям можно вычислить положение среднего момента импульса или линии, делящей площадь импульса пополам. Кроме того, для уточнения результатов используются методы корреляционного

анализа, позволяющего выявлять погрешности, обусловленные неопределенностью времени прохождения импульса, которые сопоставимы с погрешностями передачи времени и учета атмосферных процессов, влияющих на скорость распространения света.

В фазовых светодальномерах используются как импульсные источники света, так и источники с непрерывным излучением. Время распространения электромагнитных колебаний вдоль измерительной трассы можно измерять не только непосредственно, как это делается в импульсных дальномерах, но также косвенным способом, а именно: по разности фаз посылаемых и принимаемых синусоидально модулированных электромагнитных колебаний.

Чтобы определить расстояние с точностью до 3—5 см при непосредственном измерении времени распространения электромагнитных колебаний, необходима точность измерения временных интервалов порядка долей наносекунды, которую достичь весьма трудно. Особенно сложно получать импульсы электромагнитных колебаний, которые позволяли бы с требуемой точностью фиксировать моменты их посылки и приема.

При фазовом методе измерения расстояний время измеряется косвенно с очень высокой точностью. Так, например, в фазовых светодальномерах частота модуляции обычно выбирается примерно равной 10^7—$5 \cdot 10^8$ Гц, а фаза колебаний может быть измерена с погрешностью 0,1°, что соответствует погрешности в измерении времени порядка $0{,}3 \cdot 10^{-10}$—$0{,}6 \cdot 10^{-12}$ с или эквивалентно погрешности в расстоянии порядка 5—0,1 мм.

На рис. 2.5 приведена принципиальная схема фазового светодальномера.

Передатчик излучает в направлении отражателя световой пучок, модулированный по частоте φ и имеющий фазу:

$$\varphi_1 = \omega t + \varphi_0, \qquad (2.11)$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота; t — время; φ_0 — начальная фаза колебаний.

Часть пучка (опорный сигнал) поступает в приемник и на фазометр, а другая — на отражатель, установленный в конечной точке трассы, и, отразившись, через время τ_{2S} поступает на вход приемника и на тот же фазометр. Фаза этих колебаний с тем же началом счета времени равна:

$$\varphi_2 = \omega(t - \tau_{2S}) + \varphi_0. \qquad (2.12)$$

Таким образом, на фазометр поступают колебания, разность фаз которых при неизменном расстоянии и неизменной высоте остается постоянной, т. е. отличается на величину

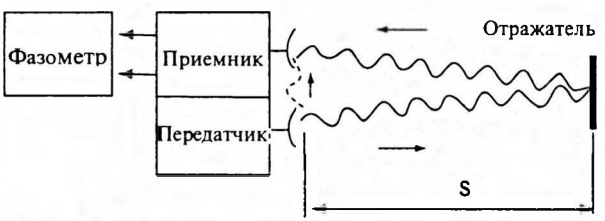


Рис. 2.5. Принципиальная схема фазового светодальномера

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \omega\,\tau_{2S} = 2\pi\, f\,\tau_{2S}, \qquad (2.13)$$

$$\tau_{2S} = \Delta\varphi / (2\pi f), \qquad (2.14)$$

Зная скорость распространения света v, получим:

$$S = v\Delta\varphi / (4\pi f). \qquad (2.15)$$

Погрешность измерения расстояния m_S зависит от погрешностей измерения фазы m_φ, частоты m_f и скорости m_v электромагнитных колебаний:

$$\frac{m_S}{S} = \sqrt{(\frac{m_\varphi}{\varphi})^2 + (\frac{m_f}{f})^2 + (\frac{m_v}{v})^2}, \qquad (2.16)$$

Погрешность измерения фазы с помощью фазометра лежит в пределах 0,1–1°. Относительная погрешность определения частоты находится в пределах ~10^{-6}–10^{-7}. Погрешность определения скорости распространения электромагнитных волн зависит в основном от погрешности определения показателя преломления воздуха вдоль трассы. Эта погрешность может быть охарактеризована величиной порядка 10^{-6}–10^{-7}. В меньшей степени эта погрешность зависит от точности определения скорости света в вакууме ($4\cdot10^{-9}$).

Относительная погрешность измерения расстояния для большинства современных фазовых дальномеров составляет 10^{-5}–10^{-6}.

В светодальномерах обычно применяют высокие частоты модуляции, так как с увеличением частоты увеличивается точность измерений.

Например, используя частоту модуляции f = 10 МГц ($\lambda << 30$ м) и измеряя разность фаз с точностью до 0,1°, можно измерить расстояние с погрешностью до 5 см. При увеличении частоты до 500 МГц погрешность составит 0,1 мм. Дальнейшее увеличение частоты ограничивается тем, что при этом значительно усложняется измерение разности фаз. Таким образом, принципиально возможно для измерения расстояний использовать электромагнитные колебания, имеющие частоту от 10 до 500 МГц. Однако электромагнитные волны этого диапазона испытывают дифракцию и переотражение от подстилающей поверхности, что требует сравнительно больших передающих антенн. Чтобы устранить эти недостатки, в фазовых светодальномерах используют модуляцию излучаемых колебаний. Фазометр позволяет измерять разность фаз лишь в пределах от 0 до 360°. Как правило, длина волны модулированного колебания значительно меньше измеряемого расстояния, и следовательно, в общем случае сдвиг фаз значительно больше 2π, т. е.:

$$S = (v/2f)\,(N + \varphi/2\pi) = (\lambda/2)\,(N + \varphi/2\pi), \qquad (2.17)$$

где N – целое число колебаний (число длин волн, укладывающихся в измеряемой линии), а φ – величина, меньшая, чем 2π ($0 < \varphi < 2\pi$). Подставляя (2.17) в (2.15), получаем основное уравнение фазовой дальномерии:

$$S = (v/2f)\,(N + \varphi/2\pi) = (\lambda/2)\,(N + \varphi/2\pi). \qquad (2.18)$$

Как уже отмечалось, фазометры позволяют измерять только φ, а N остается неизвестным, и следовательно, в уравнении (2.18) два неизвестных: расстояние S и целое число длин волн N.

Для того чтобы устранить неоднозначность величины измеряемого расстояния, полученного по формуле (2.18), необходимо выполнять измерения несколько раз, используя различные частоты.

Для разрешения неоднозначности в фазовых светодальномерах используют следующих два основных способа: способ плавного изменения частоты и способ фиксированных частот. Схема дальномера и его конструктивные данные в значительной степени зависят от выбранного способа измерений.

Способ плавного изменения частоты используют в светодальномерах с переменной частотой модуляции. При изменении одного и того же расстояния можно подобрать ряд частот, при которых разность фаз будет одинакова при различных N. Таким образом, количество подобранных в диапазоне перестройки частот зависит от длины измеряемого расстояния.

Допустим, что при измерении расстояния S на частоте f_1 разность фаз $\Delta\varphi = 0$. Следовательно, в двойном измеряемом расстоянии укладывается целое число N_1 длин волн, соответствующих частоте f_1. Таким образом:

$$S = v\,N_1/(2f_1). \qquad (2.19)$$

При плавном изменении частоты, например, в сторону увеличения, разность фаз будет также изменяться в пределах от 0 до 360°. Следовательно, при некотором значении частоты f_2 можно вновь получить значение $\Delta\varphi = 0$. В этом случае количество электромагнитных волн $\lambda = v/f_2$, укладывающихся на длине, равной расстоянию 2S, увеличится на единицу, т.е. $N_2 = N_1 + 1$. Если этот процесс повторить n раз и подсчитать, сколько раз разность фаз будет равна нулю, то для n-го прохождения $\Delta\varphi$ через нуль

$$S = v\,N_n / (2f_n), \qquad (2.20)$$

$$n = N_n - N_1. \qquad (2.21)$$

Обычно при измерениях частоты модуляции f_1 и f_n, подбирают так, чтобы $\Delta\varphi$ была равна одному из следующих значений: 0, $\pi/2$ или π, и следовательно, $\Delta N = \Delta\varphi / (2\pi)$ будет соответственно равно 0, 1/4 или 1/2.

В общем случае при измерении расстояний способом плавного изменения частоты можно получить следующую систему уравнений:

$$n = N_n - N_1,$$

$$S = (v/2f_1)\,(N_1 + \Delta\varphi/2\pi) = (\lambda_1/2)\,(N_1 + \Delta N),$$

$$S = (v/2f_1)\,(N_n + \Delta\varphi/2\pi) = (\lambda_n/2)\,(N_n + \Delta N). \quad (2.22)$$

Величины λ_1, λ_n, n и ΔN известны, и следовательно, система уравнений (2.22) содержит три неизвестных: S, N_1 и N_n. Решая ее, получим:

$$N_1 + \Delta N = f_1/(f_1 - f_n), \quad (2.23)$$

$$N_n + \Delta N = f_n/(f_1 - f_n). \quad (2.24)$$

Неоднозначность разрешается тем увереннее, чем больше разнесены частоты f_1 и f_2.

Числа $N_1+\Delta N$ и $N_n+\Delta N$ должны быть либо целыми, либо целыми плюс 0,25, либо целыми плюс 0,5. Отличие этих чисел от ожидаемых значений связано с неточным приведением величины $\Delta\varphi$ к заданному значению (фазовая погрешность), погрешностями измерения частоты и определения скорости электромагнитных волн для момента наблюдений. Поэтому вычисленные значения $N_1+\Delta N$ и $N_n+\Delta N$ необходимо обязательно округлить до ближайшего нужного значения и после этого подставить в (2.22).

Для разрешения неоднозначности способом фиксированных частот определяют значения ΔN при измерении расстояний на двух–четырех фиксированных частотах.

Например, если расстояние измерено на двух частотах, то можно составить систему двух независимых уравнений:

$$S = v(N_1+\Delta N_1)/(2f_1) = (\lambda_1/2)\,(N_1+\Delta N_1),$$

$$S = v(N_2+\Delta N_2)/(2f_2) = (\lambda_2/2)\,(N_2+\Delta N_2). \quad (2.25)$$

В приведенных уравнениях три неизвестных: S, N_1 и N_2. Для решения системы (2.25) предположим, что расстояние известно с точностью $\lambda/4$. Следовательно:

$$N_2 = (2S_{\text{прибл}}/\lambda_2) - \Delta N_2. \quad (2.26)$$

Чтобы уточнить значение расстояния, подставим вычисленное по формуле (2.25) значение N_2 в формулу (2.26), предварительно округлив его до ближайшего целого числа. Полученное второе (уточненное) значение расстояния $S_{\text{прибл}}$ необходимо для определения N_1 на частоте f_1:

$$N_1 = (2S_{\text{прибл}}/\lambda_1) - \Delta N_1. \quad (2.27)$$

Значение N_1 также необходимо округлить до целого числа и затем, подставив его в формулу (2.25), вычислить точное значение расстояния S. Способ измерения расстояний с использованием двух фиксированных частот применяется в дальномерах, имеющих малую дальность действия – до 1 км. При дальности действия дальномера свыше 1 км используют три или четыре фиксированные частоты. Этот способ измерения легко автоматизировать. Поэтому он применяется практически во всех светодальномерах без исключения.

Светодальномеры с плавным изменением частоты содержат частотомер, а если дальномер работает на фиксированных частотах, то вместо

частотомера в приемный или передающий тракт вводится оптическая линия задержки переменной длины.

Основные элементы светодальномеров. Приемник светодальномера содержит приемную оптику, фотодетектор и блок электроники. Оптическая система светодальномера служит для формирования, передачи, отражения и приема светового потока и обычно содержит (рис.2.6) источник света 1; модулятор 2; светоделитель 3; передающий и принимающий объективы 4, 5 и фотодетектор 8.

Мощность сигнала Ф, поступающего на фотоприемник, зависит не только от мощности выходного излучения Φ_0, но также от параметров приемного и передающего трактов оптических систем и условий прохождения в атмосфере. Поэтому общее требование к оптической системе светодальномера состоит в обеспечении направленности лазерного излучения, минимальном светопоглощении и максимальном приеме отраженного сигнала.

Для уменьшения влияния помех, прежде всего солнечного излучения, в оптическую систему приемника устанавливают оптический фильтр с узкой полосой пропускания, соответствующей длине волны излучения лазера.

Использование узкополосных светофильтров позволяет на один-два порядка улучшить отношение сигнал/шум.

Для преобразования оптических сигналов в электрические в дальномерах применяют фотоприемники,

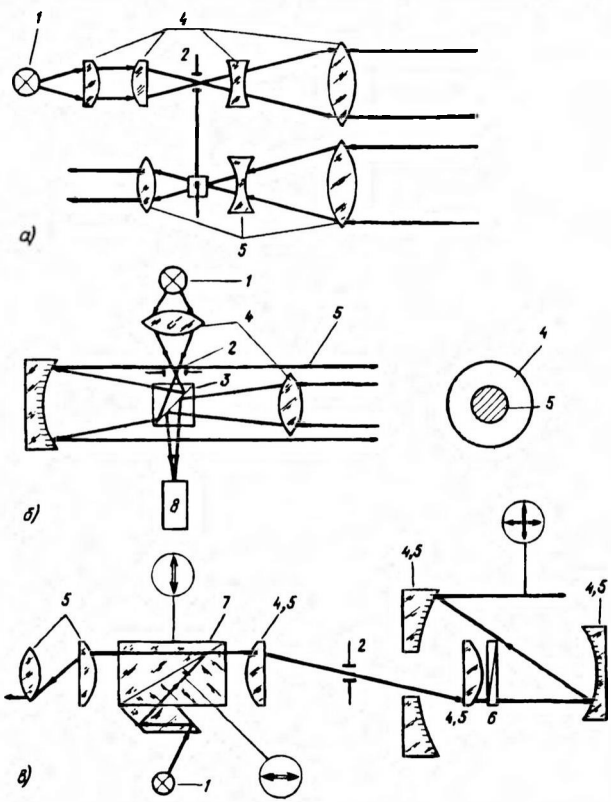


Рис. 2.6. Оптические системы приемо-передатчиков
а – двухтрубная линзовая; б – зеркально-линзовая; в – зеркально-линзовая совмещенная;
1 – источник света; 2 – модулятор; 3 – светоделительный кубик; 4 и 5 – передающая и принимающая линзы; 6 – пластинка $\lambda/4$; 7 – биполяризатор; 8 – фотодетектор

спектральные характеристики которых соответствуют длине волны принимаемого сигнала.

Фотоприемники должны иметь малую инерционность и высокую чувствительность. Этим качествам в значительной степени отвечают фотоэлектронные умножители (ФЭУ), инерционность которых составляет 1–10 нс, и фотодиоды, у которых временное разрешение несколько лучше (~0,1–1 нс) и примерно такая же чувствительность.

На рис. 2.7 представлены оптические схемы различных отражателей. Зеркально-линзовые и сферические отражатели (рис. 2.7, а, б) имеют большие габариты, чем уголковые. На рис. 2.7, а приведена схема зеркально-линзового отражателя с плоским зеркалом, установленным в фокальной плоскости линзы. Для простоты изготовления диаметр линзы должен быть значительно меньше ее фокусного расстояния, т.е. d:f ⩽ 1:10. Общие потери света в таком отражателе составляют не более 12–20 %. В настоящее время зеркально-линзовые отражатели практически не используются.

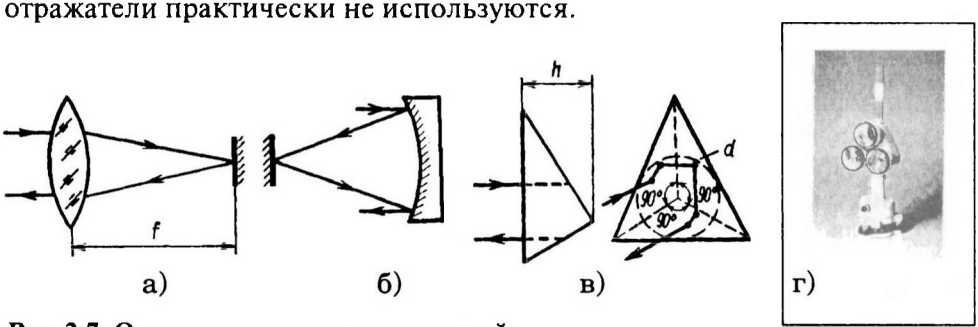


Рис. 2.7. Оптические системы отражателей:
а – ход лучей в зеркально-линзовом отражателе; б – в зеркально-сферическом отражателе; в – в трипельпризме; г – внешний вид блока уголковых (трипельпризменных) отражателей.

Наиболее широко при светодальномерных измерениях используются трипельпризменные или уголковые отражатели (рис. 2.7). Блок уголковых отражателей представляет собой панель из кварцевых трипельпризм. Каждая трипельпризма, в свою очередь, представляет собой стеклянную трехгранную пирамиду – тетраэдр (рис. 2.7, в), три грани которой образуют между собой углы 90°. Луч света, падающий на входную грань, претерпевает в призме трехкратное полное отражение и, пройдя в призме путь, равный двум ее высотам h, выходит параллельным падающему лучу, но при этом смещен относительно него по вертикали и по горизонтали. Максимальное смещение луча может быть равным диаметру окружности, вписанной во входную грань трипельпризмы.

Для измерений малых расстояний обычно применяют марки, на которых нанесен катофот. Катофоты являются отражателями, выполненными в виде пластинки, на которую равномерным слоем наклее-

ны стеклянные шарики малого диаметра. Световой луч, падающий на такой шарик, проходит внутрь, затем испытывает полное внутреннее отражение и возвращается назад, часть светового пучка рассеивается и не доходит до приемника. Поэтому при использовании катофота наблюдаются потери мощности светового сигнала большие, чем при использовании уголковых отражателей. Практически все дорожные знаки также изготавливаются из катофота.

Использование лазеров в дальномерах вместо обычных источников света позволило снизить габариты и массу дальномеров, увеличить их дальность, а также повысить точность измерений. Точность измерения лазерными дальномерами повышается за счет узкой спектральной полосы лазерного излучения, что позволяет пренебрегать погрешностью, вызванной дисперсией.

В качестве источников света в современных дальномерах, как правило, применяются полупроводниковые лазеры на арсениде галлия. При использовании в дальномере полупроводникового лазера отпадает необходимость в использовании модуляторов света, так как модуляция в этом случае осуществляется током накачки.

Использование внутренней модуляции позволяет не только уменьшить габариты и массу дальномера, но и снизить потребляемую мощность. Мощность излучения полупроводниковых лазеров обычно невелика, поэтому дальномеры с полупроводниковым источником света имеют малую дальность действия (до 3–5 км). Для измерения больших расстояний используют дальномеры с газовыми лазерами либо с лазерами на стекле.

В дальномерах на газовых лазерах или лазерах на стекле в основном используются внешние модуляторы. Под модуляцией излучения понимают изменение каких-либо характеристик световой волны (амплитуды, частоты, фазы, поляризации). Плоская монохроматическая световая волна, распространяющаяся в изотропной среде с показателем поглощения k и показателем преломления n, описывается выражением:

$$E = E_0 e^{-kl} \cos[\omega t - 2\pi l/n\lambda], \qquad (2.28)$$

где E_0 – амплитуда волны при вхождении в среду; ω – круговая частота; λ – длина волны; l – длина пути пучка излучения в среде.

Модуляцию волны можно осуществить, изменяя параметры n, l, k. Если изменять показатель поглощения n, то можно осуществлять амплитудную модуляцию; изменяя же параметр k, осуществляют различные виды модуляции: амплитудную, фазовую и частотную. Известно много методов модуляции (рис. 2.8). Модуляция может быть внутренней или внешней. При внутренней модуляции изменяются характеристики светового пучка в процессе его формирования в резонаторе лазера, а при внешней – воздействию подвергается излучение, уже вышедшее из лазера.



Рис. 2.8. Методы модуляции света

В качестве внешних модуляторов обычно используется кристаллический модулятор, работа которого основана на эффекте Поккельса. Модулятор представляет собой пьезокристалл, зажатый между электродами и установленный между поляризатором П и анализатором А (рис. 2.9). В модуляторе Поккельса используется продольное поле, в котором направление линий напряженности совпадает с направлением распространения света. Чтобы свет мог проходить через электроды, их делают в виде решетки или кольца. Электрооптический кристалл поворачивает плоскость поляризации излучения пропорционально первой степени напряжения.

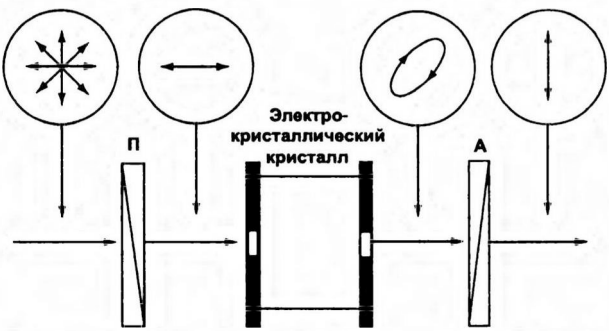


Рис. 2.9. Кристаллический модулятор на эффекте Поккельса

Когда напряжение на электродах отсутствует, кристалл является изотропным, и световой поток гасится анализатором, так как

в ячейке поляризатор и анализатор скрещены (рис. 2.9). Под воздействием напряжения кристалл расщепляет пучок лазерного излучения на два – обыкновенный и необыкновенный, которые имеют различную скорость распространения и интерферируют между собой.

Для случая, когда главные сечения поляризатора и анализатора повернуты друг относительно друг друга на 90°, зависимость пропускания света описывается выражением:

$$\Phi_л/\Phi_п = \sin A\, El/\lambda, \qquad (2.29)$$

где $\Phi_п$ и $\Phi_л$ – соответственно световой поток, падающий на поляризатор, и после выхода из анализатора; A – постоянная, зависящая от материала кристалла; E – напряженность электрического поля; l – длина кристалла; λ – длина волны.

На рис. 2.10 приведена статистическая модуляционная характеристика модулятора на эффекте Поккельса ($\Phi_п$ – световой поток, падающий на поляризатор, $\Phi_л$ – световой поток после анализатора). Напряжение, при котором световой поток впервые достигает максимума, называется критическим напряжением $U_{кр}$. Рабочую точку выбирают на линейном участке характеристики подачей постоянного напряжения смещения U_0 или с помощью четвертьволновой пластины. Используемые модуляторы на эффекте Поккельса обычно представляют собой кристаллы ниобата лития LiNbG. Эти модуляторы являются широкополосными, частота их модуляции составляет несколько сотен мегагерц.

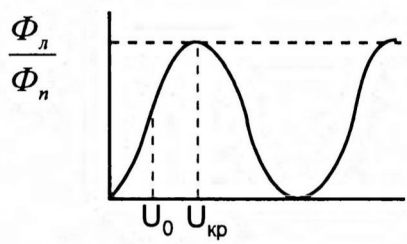


Рис. 2.10. Статистическая модуляционная характеристика модулятора Поккельса

$\Phi_п$ – световой поток, падающий на поляризатор; $\Phi_л$ – световой поток после анализатора; U_0 – рабочая точка, $U_{кр}$ – критическое напряжение

У жидкостей и некоторых кристаллов наблюдается квадратичный электрооптический эффект Керра, т. е. изменение показателя преломления вещества под воздействием внешнего электрического поля пропорционально квадрату его напряженности. Наибольшим квадратичным электрооптическим эффектом обладают жидкости нитробензол и сероуглерод и кристаллы группы перовскитов ABO_3.

В модуляторе, основанном на эффекте Керра, также содержится пара скрещенных поляроидов, между которыми помещают кювету с жидкостью, обладающей электрооптическим эффектом. Непосредственно в жидкости обычно располагают пластины конденсатора (рис. 2.11).

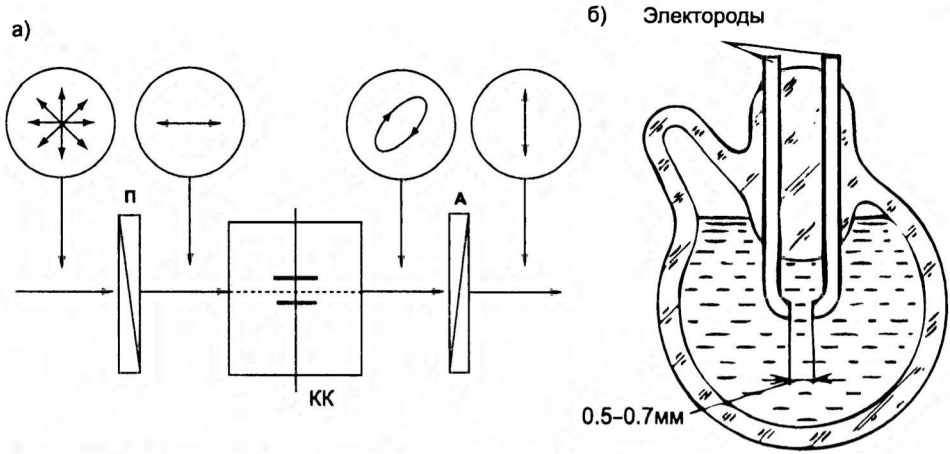


Рис. 2.11. Модулятор, основанный на эффекте Керра
а – схематическое изображение ячейки Керра и характера поляризации света; б – конденсатор Керра

Когда в ячейке Керра на пластины конденсатора напряжение не подается, нитробензол оптически изотропен, и поэтому свет, прошедший поляризатор, пройдет без изменения нитробензол и погасится анализатором. При подаче напряжения биполярные молекулы бензола ориентируются в направлении силовых линий электрического поля, которые составляют с осями поляризатора и анализатора угол 45°. Благодаря этому нитробензол становится анизотропным. В анизотропной среде пучок лазерного излучения расщепляется на два: обыкновенный и необыкновенный, которые распространяются с разной скоростью. Разность фаз этих лучей пропорциональна квадрату напряжения, приложенного к электродам. Если на ячейку Керра подавать переменное напряжение, то в такт с напряжением изменяется и прозрачность ячейки, а пучок лазерного излучения будет выходить из анализатора модулированным по амплитуде.

Модуляторы, принцип действия которых основан на эффекте Керра, сравнительно просты в изготовлении, поэтому они широко использовались в первых отечественных светодальномерах. Эти модуляторы обеспечивают по сравнению с кристаллическими меньшую частоту модуляции (десятки мегагерц), имеют большую потребляемую мощность и поэтому в геодезической практике в настоящее время практически не применяются.

При модуляции светового потока по интенсивности излучения среднеинтегральное значение интенсивности за период несущих колебаний не зависит ни от частоты, ни от их фазы. Поэтому модуляция интенсивности возможна как для монохроматического, так и немонохроматического световых потоков, и поэтому используется практически во всех геодезических дальномерах.

Дальность действия лазерных дальномеров увеличивается (особенно в дневное время) по сравнению со светодальномерами с обычными источниками излучения не только из-за большой интенсивности излучения (см. табл. 1.2 Приложения), но также и за счет его монохроматичности. Это свойство лазерного излучения позволяет использовать для селекции сигнала оптические фильтры, пропускающие сигнал и подавляющие фон.

Фильтры по физическому принципу взаимодействия с излучением подразделяют на отражающие, поглощающие, интерференционные, рассеивающие и дисперсионные. Наиболее часто используют поглощающие, рассеивающие, поляризационные и интерференционные фильтры.

В свою очередь, по типу спектральных характеристик фильтры делятся на полосовые и отражающие в коротковолновой или длинноволновой части спектра. В геодезических приборах обычно применяют полосовые фильтры (рис. 2.12).

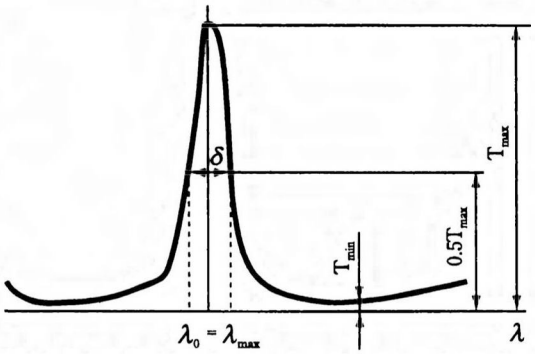


Рис. 2.12. Параметры полосового фильтра: $\lambda_0 = \lambda_{max}$ – длина волны, соответствующая максимуму полосы пропускания фильтра; T_{max} – величина пропускания в максимуме полосы; T_{min} – величина минимального пропускания; δ – полуширина полосы пропускания

Основными параметрами полосового фильтра являются его спектральные характеристики:

- длина волны $\lambda_0 = \lambda_{max}$, соответствующая максимуму полосы пропускания фильтра;
- величина пропускания в максимуме полосы T_{max};
- полуширина полосы пропускания δ, т.е. ширина спектрального интервала, на границах которого пропускание равно половине максимального;
- контрастность, определяемая соотношением $\eta = T_{max}/T$.

Поглощающие фильтры имеют широкую полосу пропускания. Рассеивающие фильтры имеют более узкую полосу пропускания – порядка 1 мкм.

Поляризационные фильтры могут иметь еще меньшую полосу пропускания (порядка 5,0 нм). Самую узкую полосу пропускания (порядка десятых долей нанометра) могут обеспечить интерференционные фильтры.

На рис. 2.13 показаны структуры интерференционных фильтров металлического и диэлектрического типов.

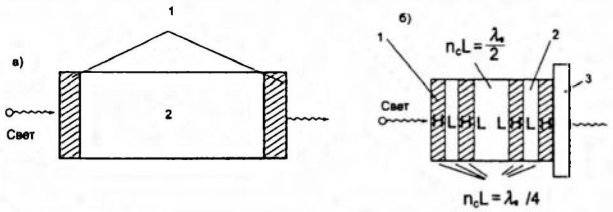


Рис. 2.13. Структуры интерференционных фильтров металлического (а) и диэлектрического (б) типов

Интерференционный фильтр металлического типа (рис. 2.13, а) изготавливается из прозрачного диэлектрика 2, на который нанесены полуотражающие металлические слои 1. Эти металлические покрытия образуют интерферометр Фабри-Перо, полоса пропускания которого определяется показателем преломления и толщиной диэлектрика, а также коэффициентами металлических покрытий.

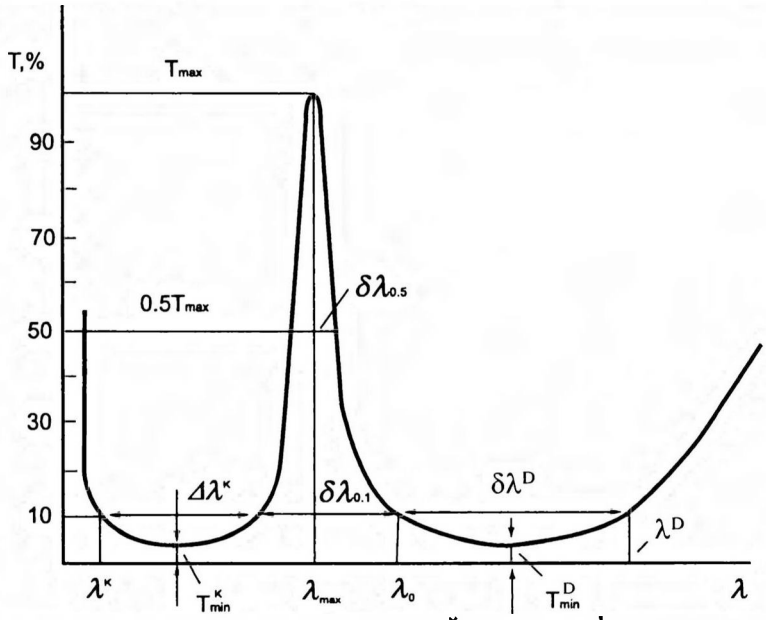


Рис. 2.14. Спектральная характеристика многослойного интерференционного фильтра узкополосного типа.

λ_{max} – длина волны максимума полосы пропускания; $\delta\lambda_{0.5}$ – ширина полосы пропускания на уровне $0{,}5T_{max}$ или полуширина; $\delta\lambda_{0.1}$ – ширина полосы прозрачности на уровне 10%-ного пропускания; T^K_{min} и T^D_{min} – величины минимального пропускания с коротко- и длинноволновой сторон основной полосы пропускания; λ^K и λ^D – длины волн коротко- и длинноволнового подъема вторичных полос пропускания, соответствующие 10%-ному пропусканию от T_{max}; $\Delta\lambda^K$ и $\Delta\lambda^D$ – спектральная ширина в области низких пропусканий ($T < 10\ \%$) с коротко- и длинноволновой сторон основной полосы пропускания.

Вторичные полосы пропускания на длинах волн менее λ^K и более λ^D обычно устраняют сложением интерференционного фильтра с фильтром другого типа.

Более высокое отражение и более низкое поглощение обеспечивает диэлектрический фильтр, изображенный на рис. 2.13, б, который состоит из чередующихся слоев материалов с высоким и низким показателем преломления 2, нанесенных на стеклянную подложку 3. Оптическая толщина L центрального слоя равна 1/2 длины волны, а внешних слоев – 1/4 длины волны каждая.

Внешние наборы HLH образуют сильно отражающие пластины резонатора Фабри-Перо, разделенные диэлектрической пластиной LL.

Спектральная характеристика многослойного интерференционного фильтра узкополосного типа приведена на рис. 2.14.

Наиболее узкую полосу пропускания $\Delta\lambda \sim 10^{-4}$ мкм обеспечивают акустооптические фильтры. В таких фильтрах обычно используют двулучепреломляющие кристаллы (рис. 2.15), в которых возникает анизотропная дифракция света в результате взаимодействия с монохроматическим звуком. Для разделения проходящего и диафрагированного света используют поляризаторы. При прохождении света через кристалл возникает излучение другой поляризации. С помощью электроакустического преобразователя создается монохроматический звук, направление распространения которого совпадает с направлением распространения света (рис. 2.15, а); в некоторых случаях используют фильтры с неколлинеарным взаимодействием (рис. 2.15, б).

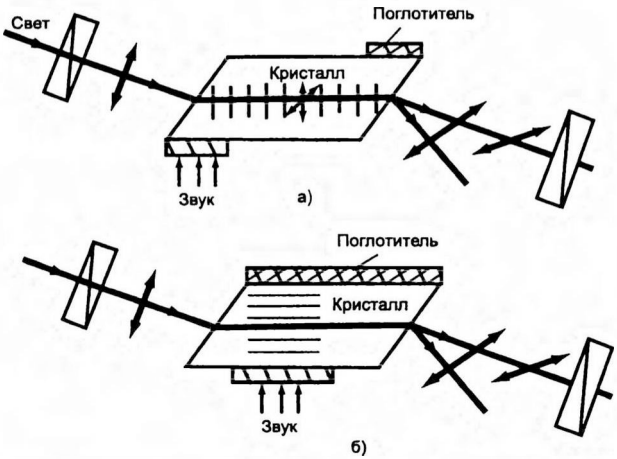


Рис. 2.15. Схема акустооптического фильтра с коллинеарным взаимодействием (а) и неколлинеарным взаимодействием (б)

Электроакустический преобразователь вырабатывает высокочастотный звук, длина волны которого Λ удовлетворяет условию $\lambda L/\Lambda^2 < 1$ (L – длина взаимодействия в направлении на первый дифракционный максимум).

В результате взаимодействия света со звуковыми волнами в кристалле возникает брэгговская дифракция. Интенсивность диафрагированного света максимальна, если разность оптического хода световых волн, отраженных от соседних максимумов деформации среды, удовлетворяет условию Брэгга:

$$\Lambda = 2\lambda \sin\theta,$$

где θ – угол падения света на звуковой пучок (угол Брэгга).

Вследствие брэгговской дифракции из широкого спектра оптического излучения выделяется достаточно узкий интервал длин световых волн, так как с монохроматическим звуком взаимодействуют лишь те световые волны, длины которых с достаточной точностью удовлетворяют условию Брэгга.

2.4. Современные импульсные и фазовые дальномеры

Импульсные лазеры обеспечивают более высокие мощности сигнала, чем лазеры непрерывного излучения, что дает возможность использовать их не только для измерений на земной поверхности, но и для космических измерений, например, измерять расстояния до искусственных спутников Земли или до Луны.

Широкое применение импульсные лазерные дальномеры находят при измерении высот. Так, например, на борту космической системы «Аполлон» был установлен лазерный высотомер, который имел рубиновый импульсный лазер (λ = 0,694 мкм), излучавший импульсы длительностью 10 нс с энергией ~0,2 Дж. Расходимость пучка на выходе из передатчика составляла ~1′. В качестве фотодетектора использовался фотоэлектронный умножитель, сигналы с которого после усиления и формирования поступали в измеритель временных интервалов. Точность измерений составляла 2 м, масса – 20 кг, потребляемая мощность – 50 Вт. С борта этого космического корабля проводилось картографирование лунной поверхности с помощью специальной фотокамеры, затвор которой открывался синхронно с посылкой импульса лазерного высотомера. Ось диаграммы направленности лазера была тщательно сопряжена с направлением главной оптической оси фотокамеры. Благодаря этому достигалась возможность с высокой точностью определять на снимке положение точки, до которой производилось измерение высоты. Влияние погрешностей, обусловленных неровностями лунного рельефа, сводилось к минимуму из-за малой расходимости пучка лазерного излучения. При средней высоте орбиты космичес-

кого аппарата ~100 км диаметр пучка на поверхности Луны составлял около 30 м.

Съемка лунной поверхности с синхронным измерением высоты позволяла осуществлять высококачественное фотографирование значительной ее части и выполнять очень точное определение масштаба снимков.

С помощью лазерного высотомера можно также выполнять измерения независимо от работы фотокамеры с частотой один раз в 20 с. На основании полученных результатов удалось уточнить форму Луны и обнаружить ряд гравитационных аномалий.

Аналогичная аппаратура может быть использована и для картографирования поверхности Земли со спутников. В этом случае максимальную высоту орбиты можно оценить с помощью следующей упрощенной формулы:

$$H_{max} = k_a \sqrt{E_0 A_{пр} \eta_{пер} \cdot \eta_{пр} \rho k / 4\pi E_{min}}, \qquad (2.30)$$

где k_a – коэффициент пропускания атмосферы на длине волны излучения лазера; E_0 – импульсная энергия лазера, Дж; E_{min} – минимально допустимая энергия сигнала на детекторе Дж; $A_{пр}$ – площадь входного зрачка приемной оптики, м^2; $\eta_{пер}$ – коэффициент передачи коллимирующей оптической системы; $\eta_{пр}$ – коэффициент передачи приемной оптической системы; ρ – энергетический коэффициент отражения земной поверхности (альбедо) в месте падения пучка лазерного излучения; k – коэффициент, характеризующий направленность отраженного излучения.

Для примера рассчитаем максимальную высоту орбиты при следующих условиях: $E_0 = 0{,}5$Дж, $A_{пр} = 10^{-2}$ м^2 (диаметр приемной оптики $D_{пр} = 35$ см), $\eta_{пер} = 0{,}8$, $\eta_{пр} = 0{,}4$ (с учетом затухания, вносимого интерференционным фильтром приемника). Произведение ρk находится в пределах от 0,1 (для темного грунта и водной поверхности при сильном волнении) до 2 (при отражении от снега либо от спокойной водной поверхности). Коэффициент k для большинства видов поверхности суши находится в пределах от 2 до 4, а для водной поверхности его величина зависит от интенсивности волнения. Величину E_{min} для ФЭУ, обеспечивающего квантовый выход 10 %, и коэффициент избыточных шумов $B = 1$ в условиях незначительного постороннего фона, можно принять равной $1 \cdot 10^{-16}$ Дж. Коэффициент k_a зависит от длины волны излучения и метеорологических условий. Например, на длине волны излучения рубинового лазера $\lambda = 0{,}69$ мкм k_a в среднем равно 0,85.

При этих условиях рассчитанная по формуле (2.30) измеряемая предельная высота орбиты составляет 300–2000 км.

В случае измеряемых высот, например, при аэрофотосъемке земной поверхности, целесообразно использовать высотомеры, у которых

источником излучения является полупроводниковый лазер. Такие приборы имеют малые габариты и массу, а погрешность измерений может составлять от единиц сантиметров до 0,5 м. Их используют для получения профиля лесных и открытых участков земной поверхности. На полученных профилях прослеживается как земная поверхность, так и «поверхность отражения» от крон деревьев.

Для измерения дальности до космических объектов используют наземные лазерные установки, одной из составных частей которых является лазерный дальномер. До появления лазерных дальномеров расстояние от Земли до Луны определялось из астрономических наблюдений с точностью порядка 3,5 км. Радиолокационные измерения позволили повысить эту точность до 1 км. С помощью лазерных импульсных дальномеров расстояние до Луны было измерено с точностью ~30 м. Причем существенного улучшения точности нельзя было ожидать, так как сигнал, отраженный от лунной поверхности, сильно размазывался из-за неровностей рельефа. Более точные измерения с помощью лазерного дальномера выполнены после того, как на Луне были установлены блоки уголковых (трипельпризменных) отражателей. Требования к отражателям предъявлялись очень жесткие, так как они должны выдерживать суточные изменения температуры на поверхности Луны, достигающие 300 °С. Размер отраженного пятна должен составлять больше 1,5 км, так как за 2,5 с — время, за которое свет проходит расстояние до Луны и обратно, — точка, из которой был послан сигнал, смещается, и отраженный луч «уходит» в сторону на 1,5 км. Космические корабли «Аполлон-11», «Аполлон-14» и «Аполлон-15» доставили на Луну отражатели, которые образовали треугольник со сторонами примерно 1000 км и позволили точно измерять либрацию Луны. Аналогичные отражатели были смонтированы на советских космических аппаратах «Луноход-1» и «Луноход-2».

Для коллимирования пучка лазерного излучения и приема отраженных сигналов обычно используются астрономические телескопы. Например, лазерная установка для локации Луны, размещенная в обсерватории Мак-Дональд (США), имеет следующие характеристики: эффективная площадь системы отражателей 150 см^2; расходимость пучка лазерного излучения ~10^{-3} рад; диаметр приемного телескопа 100 см; диаметр передающего телескопа 100 см; пропускание оптической системы 30 %; длина волны излучения лазера λ = 0,69 мкм; длительность импульса 3 нс.

Инструментальная точность измерения временного интервала, соответствующего времени прохождения светового импульса до Луны и обратно, составляет 1 нс (±15 см по дальности).

Из-за большой дальности эффективность системы очень мала, и поэтому, чтобы получить различимый сигнал с фотоэлектронного

умножителя, имеющего квантовый выход не менее 3 %, необходим лазерный импульс, составляющий 10^{19} фотонов.

Для определения расстояния до Луны с погрешностью 0,1 м осуществлялось многократное осреднение результатов измерений.

При регистрации сигнала использовался многоканальный временной анализатор, который регистрировал наличие сигнала в одном из последовательных узких интервалов времени (каналов), сумма которых перекрывала весь возможный диапазон ожидаемых моментов прихода отраженного сигнала. При этом ширина канала согласовывалась с длительностью излучаемых импульсов.

Работа дальномера осуществлялась таким образом, чтобы при каждом срабатывании лазера интервал времени между посылкой зондирующего импульса от лазерного передатчика и открыванием первого канала временного анализатора приемника изменялся на величину, зависящую от программного значения дальности и информации о радиальной скорости движения объекта.

В результате при выполнении измерений отраженный сигнал всегда регистрируется одним и тем же каналом временного анализатора, например, с номером N. Следовательно, за время измерений в этом канале накапливается суммарная энергия всех принятых импульсов (их число может составлять десятки или сотни), а в остальных каналах накапливается энергия только шумов и приемного устройства. Используя такой метод приема, удается резко снизить пороговую энергию сигнала E_{min} и, следовательно, увеличить дальность действия дальномера.

Такие измерения выполняют до тех пор, пока расчетные данные (программная дальность и радиальная скорость) незначительно отличаются от истинного значения. В противном случае сигнал попадает в соседний канал временного анализатора (с номером $N + 1$ или $N - 1$).

Для получения различной геофизической информации в настоящее время широко используются материалы наблюдений ИСЗ, выполняемых с помощью лазерных систем. Наибольший интерес представляют не параметры орбиты спутника, а расхождение между наблюдаемыми и предсказуемыми величинами, которые дают информацию о гравитационном поле Земли, земных приливах и приливных изменениях силы тяжести, о положении полюса Земли и др. Предельная дальность действия импульсного лазерного дальномера может быть найдена по формуле:

$$S = \sqrt[4]{E_0 A_{отр} A_{пр} k_{пр} k_{пер} k_{отр} k_a / E_{min} \theta_{пер} \theta_{отр}}, \qquad (2.31)$$

где E_0 – энергия лазерного излучения в импульсе, Дж; $A_{пр}$ – площадь входного объектива приемника, м^2; $A_{отр}$ – площадь отражателя, м^2; $k_{пер}$,

$k_{пр}$ – коэффициенты пропускания оптических систем передатчика и приемника соответственно; $k_{отр}$ – коэффициент передачи отражателя, зависящий как от оптических потерь на поглощение и отражение, так и от ориентировки отражателя относительно направления на приемопередатчик; $k_а$ – коэффициент пропускания атмосферы на длине волны излучения лазера, зависящий от зенитного угла и метеорологических условий; $\theta_{пер}$ – угловая расходимость пучка лазерного излучения на выходе из передатчика, ср; $\theta_{отр}$ – угловая расходимость пучка лазерного излучения после отражателя, ср; E_{min} – минимальная энергия сигнала на входе фотодетектора, при которой осуществляется работа дальномера, Дж.

Минимальная допустимая энергия на входной площадке фотодетектора зависит от пороговой чувствительности фотодетектора на длине волны лазера с учетом воздействующего на приемник фонового излучения, а также от необходимой точности измерений, которая обусловлена отношением сигнал/шум. При наблюдениях в дневных условиях для уверенного приема сигнала E_{min} должна превышать пороговую энергию шума $E_ш$ в 5–6 раз, т. е. $E_{min} = 5\,E_ш$. Для спутниковых измерений используют крупногабаритные установки с достаточно мощными импульсными лазерами. Типичные параметры лазерной дальномерной установки, используемой для измерения расстояний до спутников, имеют следующие числовые значения: $E_0 = 1$ Дж; $A_{отр} = 0{,}05$ м^2; $A_{пр} = 0{,}2$ м^2; $k_{пер} = 0{,}8$; $k_{отр} = 0{,}5$; $k_{пр} = 0{,}4$; $k_а = 0{,}5$; $\theta_{пер} \sim 10^{-7}$; $\theta_{отр} \sim 2\cdot10^{-9}$; $E_{min} = 10^{-16}$ Дж. При этих значениях S ~ 14000 км.

В реальных условиях такой лазерный дальномер имеет дальность действия порядка 6000 км, что объясняется менее благоприятными условиями видимости на всей трассе, наличием фона и недостаточно точным наведением на спутник. Проблема наведения пучка лазерного излучения, имеющего расходимость порядка 1′, на спутник, движущийся с большой угловой скоростью по орбите, очень сложна. При этом возникает так называемая «аберрация скорости» – кажущееся угловое отклонение оси пучка излучения от направления на ИСЗ, которое равно $\gamma = v_l/c$, где v_l – тангенциальная составляющая скорости движения объекта относительно дальномера; – скорость света. При небольших высотах орбиты (~1000 км) значение γ может достигать ~5″; так как отраженный пучок идет в направлениии, параллельном направлению падения, то для отраженного пучка величина кажущегося отклонения составляет 2γ, т. е. может достигать 10″.

В случае если угловая расходимость пучка равна 10″, отраженный сигнал может не попасть на входной объектив приемника. Чтобы компенсировать величину γ, используют специальные отражатели, которые отклоняют отраженный пучок на угол, равный среднему расчетному значению 2γ, но при этом несколько снижается $k_{отр}$, и следовательно, уменьшается дальность действия дальномера.

Для наземных измерений в настоящее время выпускаются компактные лазерные дальномеры. Фирма Fennel (ФРГ) одна из первых создала компактный импульсный дальномер для геодезических работ, в котором источником света служил лазерный диод, излучающий в ближней ИК-области. Модуляция излучения осуществляется импульсным током, который создается при помощи скоростного переключателя, обеспечивающего скорость нарастания и убывания тока более 1010 А/с. Длительность импульса составляет $5 \cdot 10^{-9}$ с. Излучатель и фотоприемник соединены волоконным световодом. Точность одного измерения расстояния равна 25 см. Для повышения точности измерений до 1 см результаты измерений осреднялись в течение 3 с. Для опознавания точек визирования использовался дополнительный гелиево-неоновый лазер мощностью 0,5 мВт. Процесс измерений был полностью автоматизирован. Результаты измерений выдавались на семиразрядное табло с точностью до миллиметра. Увеличение тру-бы искателя прямого изображения 25х, расстояние наименьшего визирования 2 м. Дальность действия при работе с отражателем 2,5 км, масса 3,6 кг.

Дальномер имеет крепление для установки на теодолит и предназначен для измерения расстояний до недоступных и труднодоступных объектов при выполнении топографо-геодезических и землеустроительных работ.

В нашей стране импульсные лазерные дальномеры невысокой точности выпускает НИИ «Полюс». Технические характеристики этих дальномеров приведены в табл. 2.3, а внешний вид их показан на рис. 2.16.

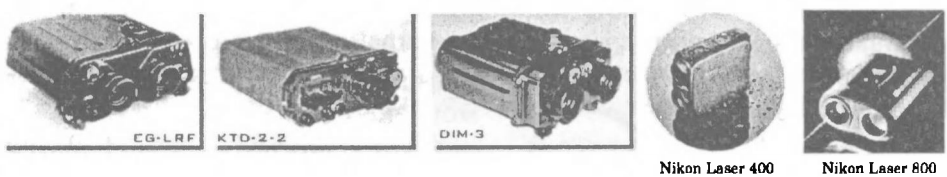


Рис. 2.16. Внешний вид лазерных дальномеров, выпускаемых в НИИ «Полюс» и фирмой Nikon (Япония) совместно с фирмой Trimble (США)

Лазерные дальномеры этой серии просты в использовании и способны работать в жестких климатических условиях. Аналогичные технические характеристики имеет бинокль LRB 7x50 со встроенным лазерным дальномером, выпускаемый фирмой Nikon. Новые перспективы применения появляются при использовании безопасных для зрения лазеров на стекле, легированных ионами эрбия.

Примерно такую же дальность действия и точность имеют лазерные дальномеры Nikon Laser 400 и Nikon Laser 800, выпускаемые Trimble

совместно с Nikon, а также Yardage Pro Sport, Yardage Pro 500, Yardage Pro 1000 (Laser Technology), выполненные в виде монокуляров (таблица 2.3).

Таблица 2.3

Технические характеристики импульсных лазерных дальномеров

Модель	РФ НИИ «Полюс» EG-LRE	РФ НИИ «Полюс» ДИМ-3	РФ НИИ «Полюс» КТД-2-2	Nikon LRB 7x50	Nikon Laser 800 Trimble	Nikon Laser 400 Trimble
Лазер	Стекло с Er	АИ:Nd	АИ:Nd	ArGa	ArGa	ArGa
Диапазон измерения	50 м ... 2,5 км	50 м ... 2,5 км	0,1... 1,0 км	15 м ... 1 км	16...800 м	10...400 м
Точность, м	5	3,5	0,5	5	1	0,5–1
Увеличение	7,5^x	7,5^x	7,5^x	7^x	8^x	8^x
Диапазон рабочих температур, ° С		–40...+50	–40...+50		–20...+40	
Выходной интерфейс	RS-232	serial-parallel code				
Питание, В	12			9	4 батарейки 1,5 В	3
Размер, мм	220x 200x 90	75x 145x 155	260x 200x 90	210x 150x 80	122x 92x 60	96x 36x 72
Масса, кг	1,9	1,3	2,7	1,35	0,27	0,195

Для измерений небольших длин порядка 20–30 м могут быть использованы ультразвуковые дальномеры, принцип действия которых основан на измерении времени распространения звукового импульса. Расстояние L до изучаемого объекта определяется по скорости прохождения звука в среде:

$$L = \Delta t\, c/2, \qquad (2.32)$$

где Δt – время прохождения зондирующего сигнала до цели и обратно. При температуре 0 °С и нормальном атмосферном давлении скорость распространения звука в воздухе равна 331 м/с. Запыленность и влажность воздуха практически не влияют на скорость звука в воздухе. На скорость звука оказывает влияние изменение давления и температуры воздуха. Эта зависимость определяется следующей эмпирической формулой:

$$c\,(t, H) \cong 331(1 + 1{,}8 \cdot 10^{-3}t)\,(1 - 0.95 \cdot 10^{-5}H), \qquad (2.33)$$

где t – температура воздуха, а H – высота над уровнем моря.

Как видно из формулы (2.33), поправка на каждые 100 м высоты составляет 0,1 %, а поправка на t – 1,8 % при изменении температуры

на 10 °С. С помощью звуколокации расстояние можно определять фазовым, частотным, импульсным способами либо их сочетаниями.

При фазовом способе излучатель посылает звуковой сигнал одной и той же частоты, который, отразившись от объекта локации, возвращается обратно. Разность фаз (модуляция) между излучаемым и принимаемым сигналами будет пропорциональна расстоянию до лоцируемой поверхности. Для решения неоднозначности модуляцию осуществляют на двух или трех частотах. По сдвигу фаз и частоте определяют сдвиг во времени и расстояние, соответствующее этому сдвигу. Точность определения расстояний этим способом составляет ±0,2 мм, но реализовать такую точность довольно сложно.

Сущность частотного способа состоит в том, что на излучатель посылают сигнал, модулированный по частоте, линейно изменяемой от некоторого начального значения до максимального, а потом вновь возвращаемой к первоначальному своему значению. Цикл повторяется. Сравнивая частоты на приеме и излучении, определяют время прохождения зондирующего сигнала. Погрешности в определении расстояний этим способом около 2 %. Использовать его можно для локации поверхностей, не имеющих ступенчатых неровностей со скачкообразно меняющейся дальностью.

Импульсный способ измерения расстояний основан на импульсной модуляции излучаемого сигнала, при которой расстояние определяется по времени прохождения звукового импульса до цели и обратно. Погрешности в определении расстояний посредством этого способа составляют от 0,5 до 3,0 %.

Выпускаемые ультразвуковые дальномеры удобны и компактны, но обеспечивают невысокую точность измерений порядка 1 %. На рис. 2.17 показан светодальномер BOSCH DUS 20 plus (ФРГ), дальность действия которого 20 м (минимальное расстояние – 0,6 м), а точность 1–1,5 %. Ультразвуковые дальномеры в основном используются вместо рулеток при технических обмерах внутри зданий. Эти дальномеры, как правило, не могут быть использованы для точных измерений вне помещений, так как их точность и дальность действия в значительной степени зависят от внешних условий.

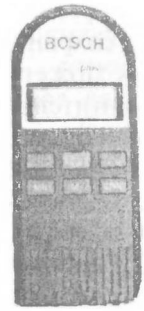


Рис. 2.17. Ультразвуковой дальномер BOSCH DUS 20 plus

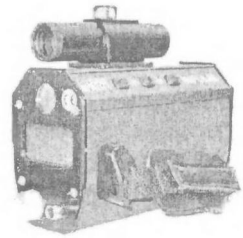


Рис. 2.18. Внешний вид светодальномера «Impulse»

Для выполнения разнообразных геодезических работ могут использоваться лазерные светодальномеры серии «Impulse» (рис. 2.18),

выпускаемые фирмой Laser Technology Inc (США). Основным достоинством дальномеров этой серии является способность измерять большие расстояния без использования отражателей. Например, дальномер «Impulse-200» позволяет измерять расстояния до 570 метров, при этом точность измерения расстояния составляет 3–5 см, что вполне допустимо при проведении изыскательских работ, сбора данных для ГИС, трассировании, наблюдений при проведении GPS-съемки, в горном деле, лесоводстве. «Impulse-200» снабжен встроенным инклинометром, позволяющим измерять (кроме наклонного расстояния) горизонтальное проложение, превышение и высоту объекта. Результаты измерений могут быть представлены в различных единицах измерений (метры, футы – для линейных величин; градусы, проценты – для углов наклона). Дальномеры «Impulse» имеют модульную систему, что позволяет комбинировать их с другими устройствами, например с MapStar Compass (электронный компас для автоматического измерения азимута) или с MapStar Angle Encoder (электронный измеритель углов). Используя эти комбинации, получают подобие электронного тахеометра для выполнения геодезических работ, не требующих высокой точности. Оснащение дальномера жидкостным инклинометром и компасом позволяет измерять составляющие наклонного расстояния по осям, выполнять сложение и вычитание расстояний, вычисление горизонтальных проложений, превышений и приращений координат, определение уклонов, площадей и объемов и решать в полевых условиях различные практические задачи. Дальномеры «Impulse» имеют ударопрочный и водонепроницаемый алюминиевый корпус, удобный при выполнении полевых работ. Все результаты измерений отображаются на жидкокристаллическом четырехстрочном дисплее, снабженном подсветкой для работы в темное время суток. Специальная система позволяет закреплять дальномер на вешке. В дальномерах «Impulse» имеется коммутационный порт RS-232 для обмена данными с другими устройствами (MapStar Compass, MapStar Angle Encoder) и для сохранения результатов на внешнем накопителе (в качестве накопителя может быть использован калькулятор HP48). Также в качестве дополнительного устройства может использоваться GPS-приемник, с помощью которого определяют координаты станции, а с помощью «Impulse» выполняют съемку ситуации. В этом случае измерения, выполненные лазерным дальномером, сохраняются совместно с данными GPS-приемника в одном файле. В качестве метода определения координат точек может использоваться линейная или линейно-угловая засечка с нескольких пунктов. Значение магнитного азимута может вводиться как в ручную, так и автоматически при использовании цифрового компаса в случае линейно-угловой засечки. Данные светодальномера распознаются как текстовое поле, единым блоком. Результаты измерений записываются в следующем порядке:

наклонное расстояние, угол наклона, горизонтальное проложение, превышение, единицы измерения. По последовательному порту, которым обычно снабжаются лазерные дальномеры, все данные легко перенести в GPS-приемник или ЭВМ для дальнейшей обработки в картографических и ГИС программах.

Фазовые светодальномеры. В современных фазовых дальномерах в качестве излучателей обычно используют полупроводниковые лазеры на арсениде галлия.

В некоторых фазовых дальномерах используют лазеры, работающие в импульсном режиме, что позволяет существенно повысить мощность сигнала. При этом излучаемые световые импульсы модулируют по поляризации или интенсивности. Если разность фаз измеряют непосредственным сравнением фаз получаемого и принимаемого световых потоков, то длительность импульса должна удовлетворять условию:

$$\tau < 2S/v.$$

Если же разность фаз определяют путем сравнения электрического модулирующего сигнала и принимаемого светового потока, то

$$T > 2S/v,$$

где T – период частоты модуляции.

В России светодальномеры изготавливаются согласно стандарта ГОСТ 23543. К ним предъявляются следующие требования:

- светодальномеры, как и отражатели, должны быть снабжены устройствами для их взаимного ориентирования и оптическими центрирующими устройствами;
- питание светодальномеров должно осуществляться от источников с номинальным напряжением 6 или 12 В;
- светодальномеры должны сохранять работоспособность при изменении напряжения источника питания на 10 %;
- светодальномеры топографические должны работать при воздействии на них следующих климатических факторов:
- рабочая температура –20 ... +50 °С; относительная влажность не более 95% при +20 °С; атмосферное давление – 600–1070 гПа (450–800 мм рт. ст.);
- средний срок сохранности светодальномеров – не менее 8 лет.

Отечественной промышленностью в настоящее время выпускается светодальномер 4СТ3 (рис. 2.19.), который предназначен для измерения расстояний при выполнении геодезических работ. Преимущественная область применения светодальномера 4СТ3 – измерение длин сторон в трилатерации и полигонометрии IV класса, в полигонометрии 1-го разряда и в инженерно-геодезических работах. Светодальномер можно устанавливать на теодолиты отечественного производства серии 3Т для одновременного измерения углов и расстояний.

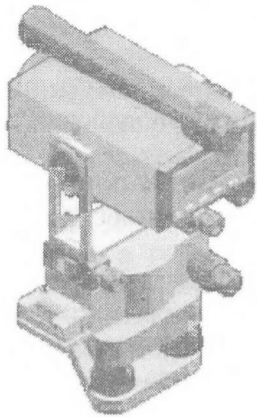
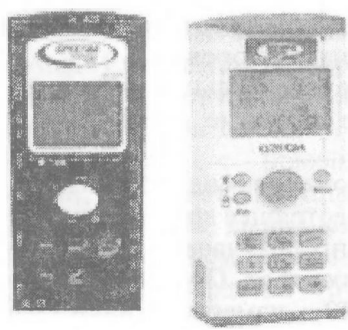


Рис. 2.19. Светодальномер 4СТ3

Таблица 2.4

Технические характеристики светодальномера 4СТ3

Температура окружающего воздуха, °С	−30...+40
Относительная влажность воздуха при температуре + 25°С,%	< 98
Атмосферное давление, гПа (мм рт. ст.) (630...800)	840−1067
Память	5000 точек
Диапазон измеряемых расстояний, м	0,2−5000
Измерение расстояния 5000 м обеспечивается с 18-призменным отражателем при метеорологической дальности видимости (МДВ) не менее 40 км, слабой солнечной засветке и слабой турбулентности атмосферы.	
Средняя квадратическая погрешность измерения расстояния одним приемом, мм	<=(3+3xDx10^{-6})
Предельные углы наклона измеряемых линий	± 25°
Зрительная труба светодальномера	
Увеличение	10х
Поле зрения	3°
Диапазон визирования, м	15 ...
Диапазон фокусирования окуляра, диоптр.	−5 ... +5
Изображение в трубе	прямое
Оптический центрир светодальномера	
Увеличение	2,5х
Диапазон визирования, м	0,6...
Цена деления цилиндрического уровня	30″
Оптический центрир для отражателя	
Увеличение	2,3х
Угловое поле	5°
Диапазон визирования, м	0,8 ... 6
Цена деления цилиндрического уровня	2′
Цена деления круглого уровня	10′
Цена деления круглого уровня вехи	10′
Масса, кг, не более	4,5



а) б)

Рис. 2.20. Лазерные рулетки фирмы Trimble
а) PB360; б) 4HD150

За рубежом также выпускаются лазерные светодальномеры, обеспечивающие такую же точность измерений. Из-за ограниченного спроса выпуск их незначителен.

В основном выпускаются ручные фазовые дальномеры, так называемые лазерные рулетки (рис. 2.20), которые очень удобны в эксплуатации, так как имеют малые габариты и массу и обеспечивают высокую точность измерений (~3 мм) расстояний в диапазоне от 0,3 до 150 м без установки отражате-

лей. Они находят широкое применение при выполнении различных инженерно-геодезических работ. В нашей стране широко используются лазерные рулетки фирмы Trimble (США) различной модификации, например, Trimble HD360 – легкий и компактный лазерный дальномер. Прибор позволяет выполнять математические операции. Trimble HD360 имеет большой и легкочитаемый дисплей, флуоресцентная подсветка которого позволяет снимать отсчет в темноте, не разряжая батареи.

Другой аналогичный компактный ручной светодальномер – Trimble HD-150. Он также имеет большой и легкочитаемый дисплей с флуоресцентной подсветкой. Помимо математических операций, дальномер может выполнять вычисление высоты объекта, вывод на дисплей минимального/максимального измерения из серии измерений. Память на 100 последних измерений делает более удобным выполнение математических операций. Алфавитно-цифровая клавиатура помогает выполнять запись данных и организовать их для дальнейшего использования. Наличие дополнительного спектра функций делает возможными такие операции, как детальные измерения фасада здания, измерения со слежением, вывод минимального/максимального измерения из серии измерений, вычисление среднего из 8 измерений, вычисление площади треугольника, вычисление угла наклона потолка и другие функции.

Технические характеристики лазерных рулеток приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Технические характеристики лазерных рулеток

Технические характеристики	Ошибка измерений	Диапазон без отражателя	Время измерения	Длина волны	Рабочий диапазон температур	Стандарт влаго- и пылезащиты	Элементы питания	Количество измерений от одного комплекта батарей	Масса (с батареями)
Trimble HD360	3 мм	от 0,3 до 60 м	от 0,5 до 3 сек.	видимый 635 нм	–10 ... –50 °С	IP54	Type AA 4x1,5V	5000	500 г
Trimble HD150	3 мм	от 0,3 до 150 м	от 0,5 до 3 сек.	видимый 635 нм	–10 ... –50 °С	IP54			

Точность измерений с помощью фазовых дальномеров в значительной степени зависит от точности определения показателя преломления на трассе. Наиболее точно среднее интегральное значение показателя преломления определяют с помощью дисперсионного метода, который был предложен в 1956 г. М.Т. Прилепиным (СССР) [125–127] и в 1965 г. разработан П. Бендером и Д. Оуэнсом (США).

Согласно этому методу вместо измерения метеорологических элементов измеряют разность оптических путей двух длин волн света, которая зависит от среднего интегрального значения показателя преломления. Средние интегральные значения показателей преломления воздуха $\langle n_1 \rangle$ и $\langle n_2 \rangle$ для длин волн λ_1 и λ_2 вследствие дисперсии не равны, поэтому оптические пути D_1 и D_2 этих волн на трассе длиной S также неодинаковы, т. е.:

$$\Delta D = D_1 - D_2 = S(\langle n_1 \rangle - \langle n_2 \rangle), \qquad (2.34)$$

где

$$\langle n_1 \rangle = (1/S) \int_0^S n_1(x)dx; \quad \langle n_2 \rangle = (1/S) \int_0^S n_2(x)dx.$$

Здесь $n_1(x)$ и $n_2(x)$ – текущие значения показателей преломления на трассе для длин волн λ_1 и λ_2.

Средние интегральные значения индексов показателей преломления связаны с разностью оптических путей следующими выражениями:

$$\langle N_1 \rangle = \langle n_1 \rangle - 1 = A_1 \Delta D/S, \qquad (2.35)$$

$$\langle N_2 \rangle = \langle n_1 \rangle - 1 = A_2 \Delta D/S, \qquad (2.36)$$

где $A_1 = N_{01}/\Delta n_0$, $A_2 = N_{02}\Delta n_0$ – постоянные для длин волн коэффициенты, которые можно определить, предварительно вычислив индексы показателей преломления N_{01} и N_{02} для стандартных условий, воспользвавшись дисперсионной формулой (1.22), характеризующей зависимость показателя преломления от длины волны.

Таким образом, для того чтобы определить среднее интегральное значение показателя преломления на трассе, необходимо измерить разность оптических путей ΔD для двух длин волн λ_1 и λ_2, а также расстояние S (измерять метеоэлементы не требуется). Точность определения $\langle N \rangle$ этим методом в значительной степени зависит от точности определения разности оптических путей ΔD, так как расстояние S можно получить с достаточной точностью из светодальномерных измерений:

$$m_{\langle N \rangle} = (A/S)m_{\Delta D}. \qquad (2.37)$$

Чем больше разнесены по спектру длины волн λ_1 и λ_2, тем больше разность Δn_0 и тем меньше A_n, тем меньше, следовательно, допуск на точность измерения оптических путей ΔD.

В двухволновых светодальномерах целесообразно выбирать меньшую длину волны как можно короче, так как индекс показателя преломления $N(\lambda)$ быстрее изменяется для коротких волн. Вместе с тем при выборе длины волны возникают ограничения, связанные с пропусканием атмосферы и применяемой оптикой, которая практически не пропускает волны короче 0,2 мкм.

Волны длиннее 0,8 мкм выбирать также не следует, так как изменение $N_0(\lambda)$ в зависимости от изменения λ для более длинных волн очень мало. Поэтому в двухволновых светодальномерах используются гелие-

во-неоновые (λ = 0,63 мкм) и гелиево-кадмиевые (λ = 0,44 мкм) лазеры.

Как показывают расчеты, чтобы определить среднее интегральное значение показателя преломления с относительной погрешностью порядка 10^{-6} на трассе длиной 10 км, необходимо измерять разность оптических путей для длин волн λ = 0,63 и 0,44 мкм с погрешностью не более 0,5 мм.

Следует отметить, что более строгая формула для вычисления индекса показателя преломления на основании измерений разности оптических путей двух длин волн должна учитывать зависимость этой величины от вариаций влажности вдоль пути (температура и давление практически не оказывают влияния):

$$<N> = A\Delta D/S + B<e/T>, \qquad (2.38)$$

где $B = \Delta\mu_0(A - A_e)$, $A_e = \Delta(\mu_0 - 1)/\Delta\mu_0$, μ_0 – показатель преломления водяных паров для той длины волны, по которой вычисляется <N>; $\Delta\mu_0$ – разность величин μ_0 для λ_1 и λ_2.

Достаточно знать приближенное, осредненное для всей трассы значение e/T отношения влажности и температуры, полученное на основании измерений влажности и температуры лишь на концах линии.

Метод определения среднего интегрального значения показателя преломления с учетом влажности по измерениям в конечных точках трассы обеспечивает точность измерений <n> до $1 \cdot 10^{-7}$. Расстояние, измеренное двухволновым методом, может быть найдено с помощью выражения:

$$S = D_1 - A_1\Delta D - B_1(e/T)S', \qquad (2.39)$$

или

$$S = D_2 - A_2\Delta D - B_2(e/T)S', \qquad (2.40)$$

где S' – приближенное значение измеряемого расстояния, которое можно измерить на четыре порядка менее точно, чем <N>.

Для еще более точного определения <N> (точнее, чем 10^{-7}) измерений температуры и влажности в двух точках трассы недостаточно, так как необходимо более точное знание среднего интегрального значения влажности. В этом случае используют трехволновый вариант дисперсионного метода, в котором, помимо двух длин волн оптического диапазона, используют третью, лежащую в диапазоне сантиметровых волн.

Выбор третьей длины волны в радиодиапазоне обусловлен тем, что влияние влажности на показатель преломления радиоволн на два порядка больше, чем на показатель преломления оптического диапазона. Обобщенная структурная схема двухволнового дальномера приведена на рис. 2.21.

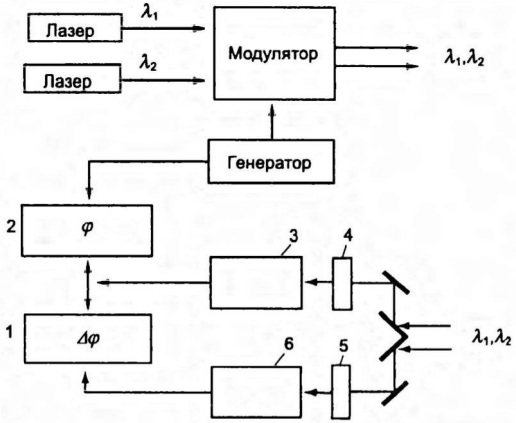


Рис. 2.21. Структурная схема двухволнового дальномера
1 и 2 – фазометры; 3 и 6 – фотоприемники; 4, 5 – оптические фильтры

Световые пучки от лазеров, генерирующих на длинах волн λ_1 и λ_2 соответственно, проходят модулятор, на который подается модулирующий сигнал от генератора. Световые сигналы после прохождения трассы поступают в приемный объектив дальномера, где разделяются на два пучка, каждый из которых проходит через свой оптический фильтр 4 или 5 и затем попадает на фотоприемники 3 и 6. Для определения оптического пути с помощью фазометра 2 измеряют разность фаз опорного сигнала и сигнала с выхода одного из фотоприемников, а для получения разности оптических путей для длин волн λ_1 и λ_2 с помощью фазометра 1 измеряют разность фаз с выходов фотоприемников 3 и 6. Так как разность оптических путей должна быть измерена значительно точнее, чем оптический путь, то требуется высокая точность фазовых измерений.

Чтобы снизить требования к точности фазовых измерений, увеличивают частоту модуляции, которая у существующих двухволновых приборов достигает порядка 3 ГГц. К таким дальномерам относят «Терраметр», обеспечивающий измерение расстояний от 1 до 20 км с точностью $1 \cdot 10^{-7}$. В качестве источников света в нем используется гелиево-кадмиевый лазер, излучающий мощность 10 мВт на длине волны 0,4416 мкм, и гелиево-неоновый лазер с длиной волны 0,6328 мкм и выходной мощностью 5 мВт. Световые пучки от обоих лазеров с помощью поляризационной призмы Волластона объединяются в один пучок и направляются в СВЧ-модулятор на кристалле КДР, который модулирует пучок на частоте 2,7 ГГц. Далее модулированный световой пучок, формируемый телескопом, посылается на зеркально-линзовый отражатель, установленный в конечной точке трассы. Отраженный пучок поступает на тот же модулятор, который является демодулятором. После демодулятора пучок вновь проходит призму Волластона, служащую для совмещения и разделения двух цветных пучков. Она имеет угол расхождения лучей около 12° и выполняет функции поляризатора при передаче цветных пучков и анализатора при их приеме.

Сигналы, поступающие на модулятор от СВЧ-генератора, непрерывно регулируются с помощью системы автоподстройки таким образом, чтобы в измеряемом расстоянии укладывались целые числа полуволн модуляции как для $\lambda_1 = 0{,}4416$ мкм, так и для $\lambda_2 = 0{,}6328$ мкм.

Измерения выполняют в течение 10 с попеременно на длинах волн λ_1 и λ_2 с частотой переключения 500 Гц, что обеспечивает однородность условий измерений на разных длинах волн λ_1 и λ_2.

«Терраметр» является полностью автоматизированным прибором. Данные о приближенном значении расстояния и метеоэлементах в точке стояния вводят с помощью соответствующих переключателей на переднюю панель прибора. Все вычислительные операции выполняются микропроцессором, вплоть до получения корректированного расстояния, значение которого в метрах высвечивается на цифровом табло. Двухволновый дальномер «Георан-1» имеет такую же дальность действия, как и «Терраметр» (не менее 20 км), а его точность равна $3 \cdot 10^{-7}$.

В этом дальномере использованы две спектральные линии излучения $\lambda_1 = 0{,}458$ мкм (синяя) и $\lambda_2 = 0{,}514$ мкм (зеленая), одновременно генерируемые одним лазером на аргоне. Модуляция на частоте 500 МГц осуществляется с помощью модулятора на кристалле ДКДР (дидейтерийфосфат калия). В качестве демодулятора применен такой же кристалл. В дальномере использованы две оптические линии задержки (в синем и зеленом каналах). Отсчет выполняют до 0,01 мм.

Благодаря высокой точности двухволновые дальномеры применяют не только для высокоточных геодезических измерений, но и на геодинамических полигонах для исследований деформаций земной коры, которые имеют величину не менее 10^{-6} в год. При этом наблюдения можно выполнять на участках значительной протяженности.

2.5. Лазерные интерферометры

Наиболее точные измерения расстояний (порядка 10^{-8}—10^{-11}) выполняют с помощью интерферометров, которые используют для компарирования мерных приборов, определения деформаций сооружений, изучения поверхности материалов, исследования современных движений земной коры, земных приливов и других измерений, где необходима очень высокая точность [124].

Интерферометрами называют приборы, служащие для пространственного разделения двух световых лучей и создания между ними определенной разности хода с целью получения интерференционной картины, по которой определяют измеряемое расстояние или изменение расстояния. Если в обычных условиях экран освещают два источника света, то освещенность экрана равна суммарной освещенности, создаваемой отдельными источниками. При наличии интерференции этот закон нарушается, так как световая энергия перераспределяется таким образом, что одни участки имеют большую освещенность, чем суммарная, а другие — значительно меньшую.

Интерференция возникает при сложении двух когерентных или более световых волн и зависит от разности фаз складывающихся колебаний. Широкое развитие интерферометрии связано с использованием лазеров. До появления лазеров в интерферометрии применяли источники света с узким волновым спектром. В том случае, если в интерферометре используется широкополосный источник света, полученная интерференционная картина окрашена и менее ярка по сравнению с картиной, создаваемой лазерным интерферометром, так как для различных длин волн положение максимумов (или минимумов) смещено друг относительно друга.

С увеличением разности хода и ширины полосы излучения увеличивается величина смещения интерференционной картины для различных длин волн.

Лазерные источники света обладают значительно большей длиной когерентности, чем другие, так как линия излучения лазеров очень узка. Например, легко достижима ширина линии излучения газового лазера порядка 1 МГц, что соответствует времени когерентности $\Delta t = 1/1\text{МГц} = 10^{-6}$ с, и следовательно, длина когерентности $\Delta L = c\Delta t = 3 \cdot 10^{8} \cdot 10^{-6} = 300$ м.

Например, одномодовые гелиево-неоновые лазеры имеют кратковременную ширину излучения ~2 Гц, а обычные источники света в лучшем случае имеют ширину излучения порядка 200 МГц, что соответствует длине когерентности порядка 3 м.

Точность измерений интерферометра зависит от ряда факторов. Одним из основных является нестабильность частоты источника света, так как эталоном длины является длина волны света. При уходе частоты меняется длина волны света, т. е. меняется эталон длины, и, следовательно, возникают погрешности измерений. Нестабильность частоты излучения характеризует относительная величина $\Delta\nu/\nu$, где ν – средняя частота излучения лазера; $\Delta\nu$ – изменение частоты за время наблюдений. Хотя естественная ширина спектра излучения газовых лазеров может быть очень узкой (~2 Гц), центр этой узкой линии может с течением времени смещаться так, что для периодов, сравнимых с временем жизни лазеров (несколько месяцев), относительная величина нестабильности частоты составит $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-6}$–$10^{-7}$.

В настоящее время разработаны методы стабилизации частоты излучения лазеров. С помощью одной группы методов частоту лазерного излучения «привязывают» к атомным линиям, которые довольно узки или имеют узкие составляющие; с помощью других методов стабилизация осуществляется путем использования пассивных резонаторов.

Например, использование дисперсной стабилизации позволяет получить стабильность порядка 10^{-11} за период, равный 8 ч, а стабилизация с использованием пассивных оптических резонаторов обеспечи-

вает стабильность 10^{-12}. Следовательно, потенциальная точность измерения длины с помощью лазерного интерферометра может быть охарактеризована такой же величиной. Изменение частоты излучения лазера обычно вызвано изменением оптической длины лазерного резонатора:

$$\Delta\nu/\nu = \Delta(n)/nL = \Delta L/L + \Delta n/n, \qquad (2.41)$$

где n – показатель преломления на пути распространения колебаний; L – длина резонатора. Отношение $\Delta L/L$ определяется механической стабильностью конструкции резонатора и его тепловым расширением, которое следует контролировать. Отношение $\Delta n/n$ зависит от изменения плотности плазмы и остаточного промежутка в резонаторе лазера. Изменение плотности плазмы обусловлено степенью ионизации газа, которой управляют, регулируя ток накачки и соотношение давлений газов He и Ne в плазменной трубке. Скорости диффузии этих газов различны, и поэтому контроль соотношения газов не поддается тонкой регулировке. Для сохранения постоянства показателя преломления воздушного промежутка необходима стабилизация давления и температуры.

Как уже отмечалось, лазерные источники света обладают рядом преимуществ по сравнению с другими источниками, ранее применяемыми в интерферометрах: лазеры обеспечивают большую интенсивность излучения, монохроматичность и когерентность. С появлением лазеров интерференционные методы измерений интенсивно развиваются по двум направлениям: квантовая интерферометрия и интерферометрия с лазерными источниками света.

Сущность квантовой интерферометрии заключается в том, что объект измерений является частью лазерного резонатора или располагается внутри него. Квантовые интерферометры бывают двух типов: с трехзеркальными резонаторами и основанные на принципе гетеродирования частот.

Для высокоточных измерений длины и скорости движения объекта наибольшее распространение получил интерферометр с лазерным источником света, выполненный по стандартной схеме Майкельсона (рис. 2.22), который является лазерным интерферометром.

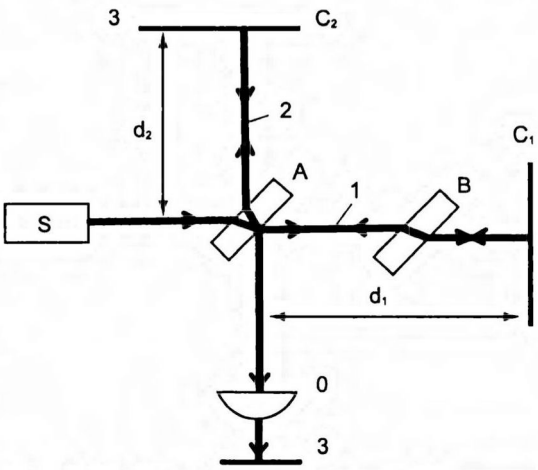


Рис. 2.22. Схема интерферометра Майкельсона

Параллельный пучок света от источника S делится полупрозрачной плоскопараллельной пластиной А на два пучка 1 и 2, направленные под прямым углом друг к другу.

Световой пучок 1 попадает на зеркало C_1, отразившись от которого, вновь возвращается на пластинку А и, отразившись еще раз, попадает в объектив О прибора. Световой пучок 2 достигает зеркала C_2 и, отразившись от него, проходит полупрозрачную пластинку А и попадает в объектив О. Вследствие разности хода d_1 и d_2 световых лучей 1 и 2, они интерферируют между собой. На экране Э наблюдается интерференционная картина, состоящая из светлых полос или колец (если угол между пучками 1 и 2 не равен 90°, то наблюдается система полос, если этот угол прямой – то система колец).

На пути светового пучка 1 устанавливают пластину В той же толщины, что пластина А. Эта пластина играет роль компенсатора, уравнивающего оптическую длину плеч интерферометра, так как пучок 1 прошел пластину А один раз, а пучок 2 – три раза.

Вид интерференционной картины зависит от степени параллельности осей сигнального и опорного пучков, падающих на приемник, и от угловой расходимости каждого пучка. Число колец интерференционной картины в поле зрения приемника увеличивается с увеличением угловой расходимости. Кольца превращаются в полосы, когда оси интерферирующих пучков не параллельны. При смещении зеркал на экране наблюдается смещение полос интерференционной картины, причем перемещение зеркала на половину длины волны вызывает сдвиг картины на одну полосу. Зная длину волны излучения и подсчитав число переместившихся полос, определяют величину смещения зеркала при условии, что другое зеркало остается неподвижным. Число полос подсчитывают визуально или с помощью фотоприемника, перед которым установлена диафрагма, пропускающая только одну полосу. При автоматической регистрации на выходе фотоприемника регистрируют изменение сигнала при смещении полосы (максимум сигнала соответствует максимуму освещенности). При решении ряда задач требуется выполнять измерения с точностью, значительно большей, чем длина волны излучения. Повысить точность измерений можно, например, многократно измеряя ток на выходе фотодетектора интерферометра и осредняя результаты измерений.

Интенсивность E интерференционной картины определяется формулой:

$$E = 2E^* (1 + \cos 2\pi\Delta/\lambda), \qquad (2.42)$$

где E^* – интенсивность первого и второго интерферирующих пучков; Δ – разность хода. Обычно для регистрации смещения интерференционной картины перед детектором устанавливают диафрагму в виде узкой щели, ширина которой значительно меньше ширины полос интерференционной картины.

Энергию света Ω, проходящего через диафрагму шириной b, можно вычислить по формуле:

$$\Omega = 2E_0 \int_{x_0-b/2}^{x_0+b/2} (1 + \cos 2\pi x/a)dx =$$

$$= 2E_0 (b + (a/\pi) \sin\pi(b/a)\cos 2\pi(x_0/a)), \qquad (2.43)$$

где a — ширина интерференционной полосы. На рис. 2.23 приведена кривая распределения нормированной интенсивности света E/E_0 в интерференционной картине с шириной полосы, равной a.

Энергия света, проходящего через диафрагму шириной b, пропорциональна заштрихованной на рисунке площади. Максимум и минимум энергии зависят от положения щели:

$$\Omega_{max} = 2E_0[b + (a/\pi b) \sin b/a], \qquad (2.44)$$

где E_0 — максимальная интенсивность света.

$$\Omega_{min} = 2E_0[b - (a/\pi b) \sin b/a]. \qquad (2.45)$$

Следовательно, контрастность полос

$$k = (\Omega_{max} - \Omega_{min}) / (\Omega_{max} + \Omega_{min}) = [\sin\pi (b/a) / (\pi b/a)]. \qquad (2.46)$$

При изменении разности хода на dΔ ток на выходе фотодетектора изменится на величину, пропорциональную

$$dE = -(4\pi E/\lambda) [\sin 2\pi(\Delta/\lambda)d\Delta]. \qquad (2.47)$$

Максимальное значение dE наблюдается при $\sin 2\pi(\Delta/\lambda) = 1$, т.е. при $\Delta = k\lambda + \lambda/4$, где k — целое число. При усреднении результатов измерений на выходе фотодетектора уменьшаются искажения электрического сигнала, вносимые различными шумами и помехами при работе на постоянном токе, но увеличиваются погрешности измерения, связанные с медленным смешением полос.

Если осреднять результаты измерений, производимых в течение 2–3 с, то погрешность измерения сигнала составляет 3–5 %, и следовательно, наименьшее значение, которое может быть измерено, равно 0,005λ.

Для повышения чувствительности интерференционного мето-

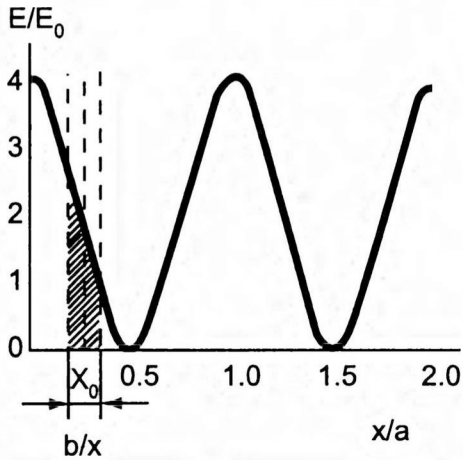


Рис. 2.23. Кривая распределения нормированной интенсивности света E/E_0 в интерференционной картине
a – ширина полосы интерференционной картины; b – ширина щели диафрагмы

да измерений сигнал, поступающий на вход фотодетектора, предварительно модулируют. Модуляцию можно осуществлять различными устройствами, например, с помощью пьезоэлемента, жестко связанного с одним из зеркал интерферометра.

При периодических смещениях зеркала интерферометра с помощью пьезоэлемента происходят колебания полосы интерференционной картины относительно щели (рис. 2.24).

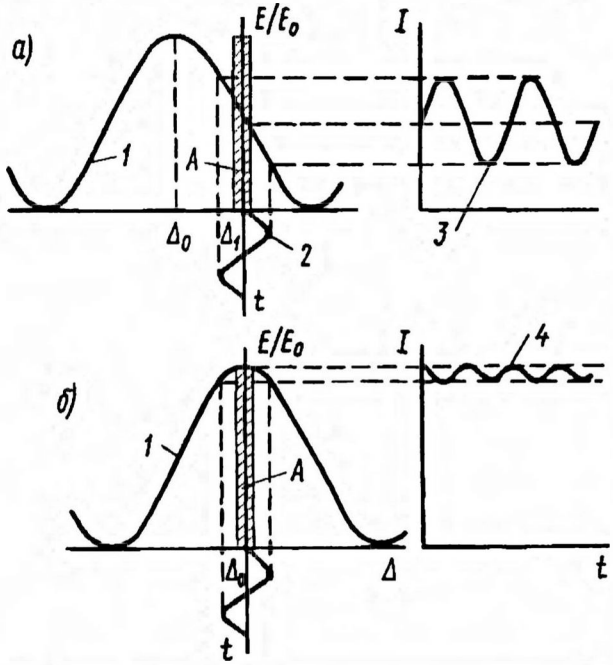


Рис. 2.24. К пояснению модуляционного метода наведения на интерференционную полосу

1 – кривые, характеризующие относительное распределение интенсивности в двухлучевой интерференционной картине; 2 – кривая, характеризующая зависимость изменения разности хода Δ от времени t при периодических колебаниях полосы относительно неподвижной щели; 3 и 4 – переменные составляющие фототока

Кривые 1 характеризуют относительное распределение интенсивности. При этом ток 3 на выходе фотодетектора имеет сложную форму, а переменная составляющая фототока с большой степенью точности может быть выражена первой гармоникой разложения Фурье. Кривая 2 характеризует зависимость изменения разности хода от времени t при периодических колебаниях полосы около неподвижной щели А.

Если середина полосы (максимум интенсивности) совпадает со щелью (рис. 2.24, б), то переменная составляющая фототока 4 не содержит первой гармоники и приближенно может быть описана второй гармоникой. Чтобы измерить изменение разности хода $\Delta = \Delta_1 - \Delta_0$, можно с помощью узкополосного электрического фильтра выделить первую гармонику и измерить ее амплитуду, которая связана с разностью хода Δ линейной зависимостью.

Величину Δ можно также измерить и другим методом, например, подавая на пьезозлемент постоянное напряжение, добиваясь при этом минимального значения амплитуды первой гармоники фототока.

Чувствительность этого метода высока (порядка $1 \cdot 10^{-3}$ мкм) и ограничена дробовым шумом фотодетектора.

Как правило, в настоящее время в интерферометрах используют гелиево-неоновые лазеры с длиной волны излучения 0,6328 мкм. Для упрощения юстировки плоские зеркала обычно заменяют уголковыми отражателями, с помощью которых также устраняют обратное влияние на лазер отраженного излучения. В этом случае отраженные лучи не совпадают с падающими, а идут параллельно им и, следовательно, не попадают в лазер. Увеличение допусков на наклоны и боковые смещения отражателя обеспечивается за счет уменьшения угловой расходимости пучка, что достигается расширением диаметра пучка в 4-8 раз с помощью телескопа.

На рис. 2.25 изображена схема лазерного интерферометра Майкельсона, который содержит лазер, телескоп, светоделительную пластинку 1, уголковые отражатели 2, 3 и фотоприемник.

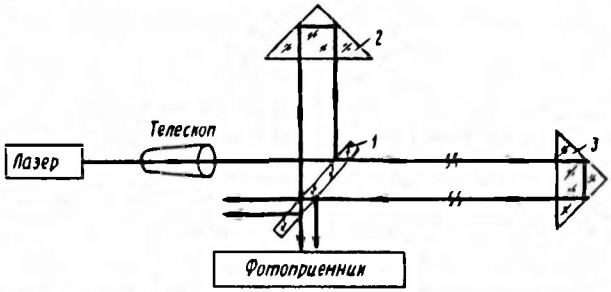


Рис. 2.25. Схема лазерного интерферометра Майкельсона с уголковыми отражателями
1 – светоделительная пластинка; 2, 3 – уголковые отражатели

Если свет от отражателя попадает на вход лазера, то частота выходного излучения будет затягиваться к пику резонатора интерферометра. Это объясняется тем, что образуются два связанных резонатора. Внешний резонатор, образуемый резонатором интерферометра, влияет на частоту выходного излучения лазера. Значительная длина внешнего резонатора приводит к тому, что аксиальные моды очень близко расположены, и его резонансный максимум находится внутри ширины линии резонатора лазера. По этой причине частота выходного излучения лазера всегда будет затягиваться по направлению к пику резонатора интерферометра, и следовательно, при изменении длины плеча интерферометра, полосы интерференционной картины остаются неподвижными, а частота лазера изменяется. Таким образом, измерения смещений, основанные на подсчете полос, окажутся невозможными. Для уверенного выполнения измерений необходимо, чтобы отношение мощности излучения лазера к входящему в него излучению было не менее 10.

Для блокировки отраженного света в интерферометр вводят призмы Глан-Томпсона (типа призмы Николя) и четвертьволновые пластинки.

Основные трудности при выполнении высокоточных измерений с помощью интерферометра обусловлены разрушением интер-

ференционной картины из-за турбулентности атмосферы. Поэтому прецизионные измерения длин, начиная с нескольких десятков метров до 1 км, выполняют, используя вакуумный световод, представляющий собой герметичную трубу, в которой создан вакуум. Создание вакуумных световодов длиной более 1 км связано со значительными техническими трудностями, и поэтому интерференционными методами большие расстояния, как правило, не измеряют.

Лазерный интерферометр с вакуумным световодом, разработанный в Хабаровском филиале ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), имеет следующее технические характеристики:

Максимально измеряемое расстояние S, м	50
Длина волны излучения лазера, мкм	0,6328
Мощность лазерного излучения P, мВт	0,5
Угловой раствор пучка излучения на выходе	
из лазера, угл.мин.	6
из коллиматора, утл.с.	36
Ширина спектра излучения Δf, МГц	менее 0,5
Дрейф средней частоты, МГц/ч	0,8
Пороговая чувствительность, мкм/ч	1
Точность отсчета, мкм	0,01
Максимальная скорость дрейфа, мкм/с	2

Схема этого лазерного интерферометра с вакуумным световодом представлена на рис. 2.26.

Интерферометр содержит лазер 5, телескоп 6, светоделительную пластинку 7, диафрагму 4 с отверстиями а и б, вакуумный световод 10, отражатель 11, устанавливаемый на исследуемом объекте, зеркало 8,

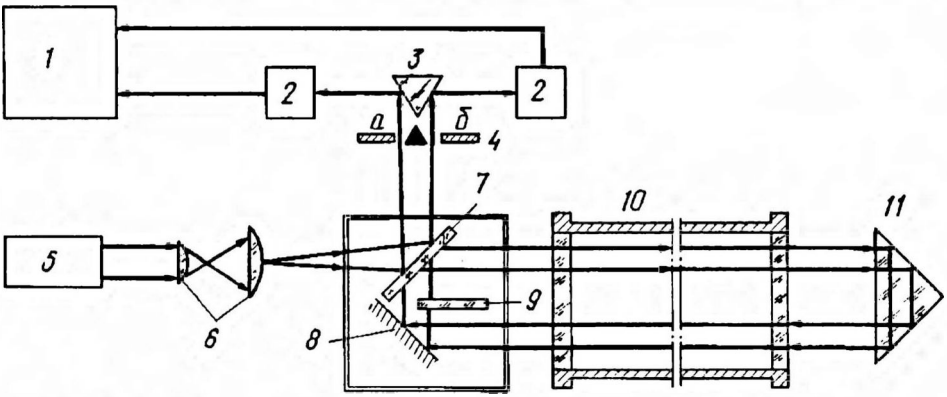


Рис. 2.26. Схема лазерного интерферометра с вакуумным световодом
1 – регистрирующее устройство; 2 – фотоприемники; 3 – светоделительная призма; 4 – диафрагма с отверстиями а и б; 5 – лазер; 6 – коллиматор; 7 – светоделительная пластинка; 8 – зеркало; 9 – стеклянная пластинка; 10 – вакуумный световод; 11 – отражатель, установленный на исследуемом объекте

стеклянную пластину 9, светоделительную призму 3, фотоприемники 2, регистрирующее устройство 1.

Направление перемещения отражателя определяется знаком разности фаз интерференционных картин, которые наблюдаются в сечениях а и б диафрагмы.

Чтобы обеспечить разность фаз интерференционных картин в сечениях а и б, между светоделительной пластинкой 7 и зеркалом 8 помещена стеклянная пластина 9, сдвигающая разность фаз интерферирующих лучей на $\pi/4$. Для регистрации интерферирующих лучей используются два фотоэлектронных умножителя 2, лучи на которые направляются с помощью светоделительной призмы 3, установленной за диафрагмой 4. Сигналы с ФЭУ регистрируются с помощью регистрирующего устройства.

Отражатель может перемещаться с помощью микрометренного винта. Величина измеряемого смещения равна произведению числа периодов на величину $\lambda/2$ (рис. 2.27).

Вакуумный световод представляет собой трубу диаметром 60 см, собранную из секций длиной 3,5 м каждая, соединенных между собой через вакуумный уплотнитель. Внутри световода для исключения влияния внешних условий создан вакуум порядка 1 Па.

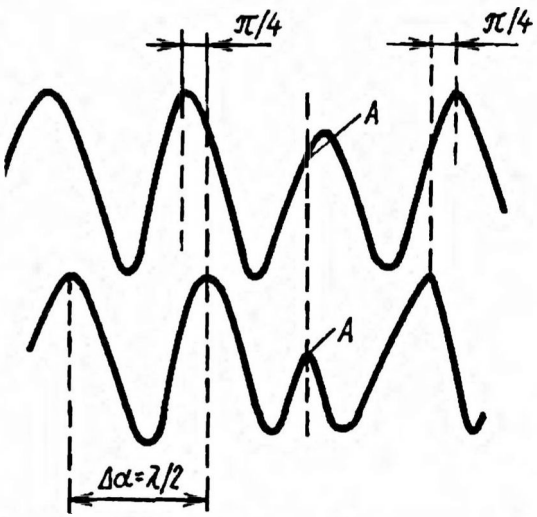


Рис. 2.27. Фрагмент записи информации о движении объекта на ленте самописца (в точке А произошло изменение направления движения объекта)

Одним из основных факторов, влияющих на результаты измерений, являются температурные деформации фундамента, на котором установлен интерферометр. За время измерений дрейф частоты излучения должен быть меньше $\nu\Delta L/L$, где ν – средняя частота генерации; ΔL – измеряемое смещение отражателя. Максимально измеряемая скорость смещения обусловлена быстродействием регистрирующей аппаратуры (самописца).

Очень высокую точность измерений ($\sim 10^{-10}$) обеспечивает 800-метровый лазерный интерферометр Майкельсона, который используется в качестве эталона длины и находится в Калифорнийском университете (рис. 2.28).

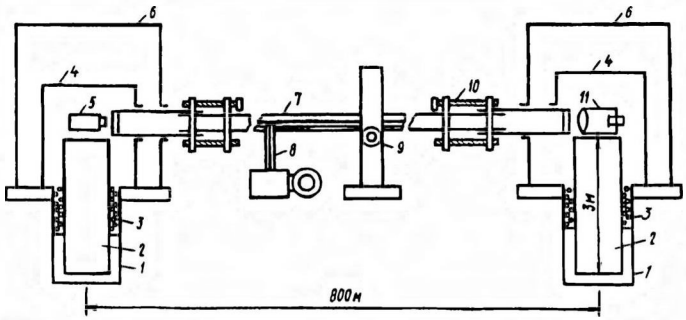


Рис. 2.28. Схема лазерного интерферометра, установленного между системами разломов Сан-Андреас и Сан-Джаменто

1 – бетон; 2 – столб из черного гранита; 3 – пеностирол; 4 – сооружение с контролируемой температурой; 5 – лазерный интерферометр; 6 – изолирующий корпус; 7 – вакуумный световод; 8 – вакуумный насос; 9 – суппорт; 10 – сервоуправление длиной трубы; 11 – удаленный отражатель

Он установлен в Национальном парке Сан-Бернардино, расположенном между системами разломов Сан-Андреас и Сан-Джасинто.

В качестве источника света в интерферометре использован гелиево-неоновый лазер с мощностью излучения 100 мкВт. Резонатор лазера, образованный плоским и сферическим зеркалами, выполнен из инвара, благодаря чему достигнута высокая стабильность к температурным и акустическим возмущениям. Управление частотой излучения осуществляют, изменяя длину резонатора с помощью пьезоэлемента, на котором укреплено сферическое зеркало резонатора.

Для возможности задания требуемого направления лазер, светоделитель и коллиматор смонтированы на подвижном основании, которое может вращаться вокруг вертикальной и горизонтальной осей. Более точное наведение пучка лазерного излучения достигается с помощью зеркала, установленного между лазером и коллиматором. Это зеркало смонтировано на карданном подвесе и может перемещаться с помощью микрометренных винтов. Дистанционное управление зеркалом осуществляется с помощью сервопривода.

Конечные точки интерферометра являются опорными. Для их закрепления в земле на глубину 3 м пробурены шурфы 1, в которых установлены трехметровые гранитные колонны 2, зацементированные снизу примерно на 1 м и имеющие поперечное сечение 1x1 м. Чтобы изолировать колонны от поверхностного слоя земли, температура которого может изменяться в значительных пределах и вызывать термоупругие деформации, в остальную часть шурфа положен изолирующий материал 3. Самый верхний слой, толщиной 50 см, совершенно не уплотнен и поэтому обеспечивает хорошую температурную изоляцию. Колонны установлены не на коренную породу, которая находится примерно в 10 м от поверхности земли, а на полутвердый гранит, который постепенно переходит в коренную породу.

Каждая из колонн заключена в массивный кожух 4, обеспечивающий тепловую и звуковую изоляцию. Вокруг каждой колонны построено изолирующее сооружение 6, в котором температура поддерживается с точностью до 3 °С. Изменения температуры колонны оценивается с погрешностью до 5 °С.

Вакуумный световод, имеющий длину 800 м, представляет собой алюминиевую трубу 7, в которой двумя насосами 8 создан вакуум (давление не более 1 Па). Труба собрана из трехметровых секций, скрепленных между собой кольцами, и опирается на землю в трех точках – в центре и по краям, причем в конечных точках она опирается на роликовые суппорты 9, которые позволяют ей свободно смещаться в пределах ±25 см на каждом конце при изменении внешней температуры. Длина трубы поддерживается постоянной с погрешностью $5 \cdot 10^{-3}$ см с помощью телескопических соединений, имеющих сервопривод 10 и установленных на ее концах. Часть светового пучка от лазера, установленного в начальной точке, направляется на местный отражатель, другая – через вакуумный световод – на отражатель 11, установленный в конечной точке трассы. В качестве отражателей используют зеркально-линзовые системы.

Перед местным отражателем установлен фазовращатель, представляющий собой пластинку, состоящую из четырех секторов (квадрантов), причем два противолежащих квадранта покрыты диэлектриком, смещающим фазу приходящего пучка на 45°, а два других квадранта являются прозрачными. Таким образом, часть пучка, падающего на местный отражатель, проходит фазовращатель дважды (в прямом и обратном направлениях), и его фаза сдвигается на 90° по сравнению с другой частью пучка, которая проходит через прозрачные квадранты этого же элемента. Благодаря этому можно определить направление движения полос интерферирующей картины.

После смещения опорного и измерительных пучков сигналы разделяются квадрантным делителем и подаются на два ФЭУ, один из которых регистрирует интерференционную картину, сдвинутую по фазе на 90°, а другой – интерференционную картину без сдвига.

Чувствительность цифрового электронного устройства такова, что обеспечивает регистрацию смещения отражателя на величину 10^{-10} (L = 800 м), т.е. 0,08 мкм.

В интерферометре Майкельсона в образовании интерференционной картины участвуют только два пучка, которые получаются при делении пучка полупрозрачной пластиной А (см. рис. 2.22), поэтому такой интерферометр называют двухлучевым.

В действительности на пластинке А имеет место многократное отражение лучей, которые имеют меньшую по сравнению с начальным пучком интенсивность, и поэтому практически не влияют на освещенность интерференционной картины. В других типах интерферометров,

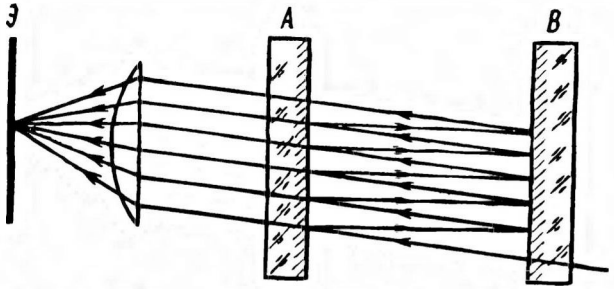


Рис. 2.29. Интерферометр Фабри-Перо
А и В – зеракала; Э – экран

называемых многолучевыми, учитывается влияние многократных отражений. К таким приборам относят интерферометр Фабри-Перо (рис. 2.29), который состоит из двух плоских или сферических зеркал (А и В), обращенных друг к другу зеркальными покрытиями. Интерференционная картина, наблюдаемая на экране, образуется лучами, многократно отраженными от первого и второго зеркал. Чтобы интерференционная картина была резкой, отражающий слой делают тонким, а коэффициент отражения должен быть наибольшим. Если зеркала расположены параллельно друг другу, то на экране наблюдается интерференционная картина, состоящая из чередующихся светлых и темных колец. При изменении расстояния между зеркалами эти кольца на экране смещаются, что можно наблюдать визуально, регистрировать с помощью фотоприемника или фотографировать.

Схема интерферометра Фабри-Перо, у которого в качестве источника света использован лазер, приведена на рис. 2.30. Пучок излучения от лазера проходит светоделительную пластинку 1 и направляется в систему из двух зеркал А и В. Зеркало А обычно плоское, а зеркало В – сферическое и имеет радиус кривизны, равный расстоянию АВ. Зеркало А – полупрозрачное, а зеркало В, жестко установленное на исследуемом объекте, — полностью отражающее.

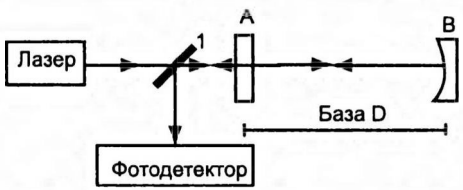


Рис. 2.30. Схема интерферометра Фабри-Перо, у которого в качестве источника света использован лазер
А – плоское полупрозрачное зеркало интерферометра; В – сферическое зеркало, устанавливаемое на исследуемом объекте; 1 – светоделительная пластинка

Часть светового пучка, отразившись от полупрозрачного зеркала А и светоделительной пластинки 1, попадает на фотодетектор и образует опорный пучок, другая часть отражается от зеркала В и частично проходит зеркало А, повторяя далее путь опорного пучка.

Многократные отражения лучей между зеркалами А и В создают в плоскости фотодетектора многолучевую интерференционную картину. Чтобы исключить влияние резонатора, образован-

ного зеркалами А и В, на частоту излучения лазера, между лазером и светоделительной пластинкой 1 устанавливают оптический элемент, не пропускающий ту часть светового пучка, которая проходит от интерферометра к лазеру.

Эталонами Фабри-Перо называют интерферометры с неподвижными зеркалами. Обычно эти эталоны применяют в интерференционных измерениях по методу оптического умножения расстояний. С помощью эталона, длина которого известна, измеряют длины эталонов и других изделий, отличающихся от длины исходного эталона в целое число раз. Комбинируя интерферометр Майкельсона и эталон Фабри-Перо, можно измерять длины больших концевых мер.

Как уже отмечалось, помимо интерферометров с лазерными источниками света широкое распространение получили квантовые интерферометры. Квантовые интерферометры используют при решении ряда научно-технических задач, связанных с прецизионными измерениями значительных расстояний, определением скорости перемещения, контролем шероховатости поверхности материалов, оценкой отступления поверхности от заданной формы и т. д.

Использование резонатора лазера в качестве измерительного интерферометра основано на определении разностей частоты между близлежащими резонансными частотами оптического резонатора, являющейся функцией измеряемого расстояния. При этом способе измерения отпадает необходимость в подсчете числа интерференционных полос, так как расстояние L определяется измерением разностной частоты f_p излучения лазера:

$$L = v/2\, f_p, \qquad (2.48)$$

где L — длина резонатора (измеряемое расстояние); f_p — разностная частота; v — скорость света в резонаторе. Схема одного из первых квантовых интерферометров для измерения длин приведена на рис. 2.31.

Зеркало 2 резонатора лазера закреплено неподвижно, а зеркало 3 можно перемещать вдоль оси резонатора. Диафрагма с регулируемым по диаметру отверстием помещена в резонатор и служит для получения одномодового режима работы лазера. Пучок лазера проходит систему линз 1 и фокусируется на чувствительной поверхности фотоприемника, сигнал с выхода которого усиливается с помощью настраиваемого усилителя и поступает на вход частотомера, который измеряет разностную частоту f_p. В результате по формуле (2.48) определяют длину резонатора L.

Рассмотренный способ измерений может быть реализован с помощью достаточно простого устройства, но при этом возможны трудности, так как фактически обеспечить устойчивый двухчастотный режим работы лазера очень сложно, а также необходимо учитывать,

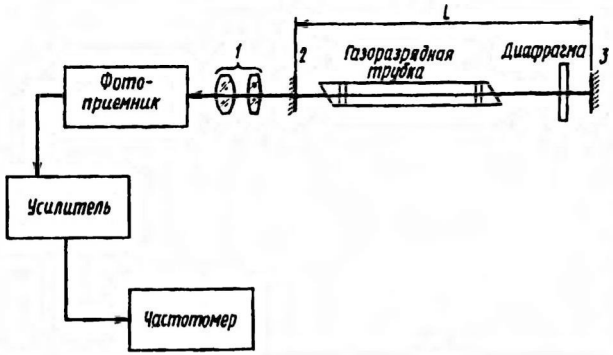


Рис. 2.31. Схема лазерного интерферометра для измерения длины
1 – система линз; 2, 3 – зеркала резонатора; L – длина резонатора лазера

что на разностную частоту в лазере влияет дисперсия активной среды, что приводит к затягиванию частот.

В общем случае показатель преломления n связан с мощностью накачки частотного излучения сложной зависимостью. Следовательно, изменение мощности накачки или перемещение частот вдоль доплеровского контура линии может изменить разностную частоту в лазере с резонатором длиной 1 м на 20 Гц, что существенно снижает точность измерений.

Существуют квантовые интерферометры, в которых использован способ гетеродирования двух лазерных излучений, а также квантовые интерферометры на основе лазеров с трехзеркальным резонатором. Эти приборы применяют в основном в качестве датчиков вибраций, для диагностики плазмы, измерения ускорений и при других исследованиях. Например, созданный в Колорадском университете интерферометр, принцип действия которого основан на измерении частоты биений, создаваемых при смешении излучения двух лазеров, используют для изучения деформаций земной коры. Этот интерферометр, имеющий тридцатиметровое измерительное плечо, установлен в одной из шахт штата Колорадо (США). Частота одного лазера стабилизируется с помощью метановой ячейки, а частота другого – с помощью резонатора Фабри-Перо. После смешения излучения этих лазеров один из компонентов результирующего сигнала имеет амплитуду, пропорциональную разностной частоте излучений обоих лазеров:

$$\nu_{биен} = \nu_{изм.кан} - \nu_{мет}, \qquad (2.49)$$

где $\nu_{изм.кан}$ – резонансная частота измерительного канала; $\nu_{мет}$ – частота излучения лазера, стабилизированного метановой ячейкой.

Измеряемая деформация ε находится с помощью выражения:

$$\varepsilon = \Delta L / L = -\nu_{биен} / \nu_{изм.кан}, \qquad (2.50)$$

где L – длина измерительного канала. Для подсчета частоты биений за некоторый период интегрирования использована цифровая система, которая позволяет регистрировать деформацию порядка 10^{-14} L за период интегрирования 1 с.

2.6. Измерение разностей расстояний на основе эффекта Доплера

Доплеровский метод измерения расстояний обычно используют в спутниковой геодезии и для высокоточных интерференционных измерений. Эффект Доплера заключается в том, что при относительном перемещении приемника или передатчика частота принимаемого сигнала изменяется:

$$f_D = f(1 \pm v_b/c) \quad \sqrt{1-\frac{v_b^2}{c^2}} = f(1 \pm v_b/c - \tfrac{1}{2}(v_b^2/c^2), \qquad (2.51)$$

где v_b – относительная скорость перемещения; с – средняя скорость электромагнитных волн.

Если измерения выполняют с использованием отражателя, то для практических целей при относительном перемещении передатчика и отражателя можно воспользоваться соотношением:

$$f_D = f(1 \pm v_b/c). \qquad (2.52)$$

При этом сдвиг частот

$$\Delta f = f_D - f = \pm 2\, v_b/\lambda, \qquad (2.53)$$

$$\lambda = c/f, \qquad (2.54)$$

а относительная скорость:

$$v_b = \pm(\lambda/2)\Delta f. \qquad (2.55)$$

При измерении разностей расстояний на основе эффекта Доплера по разностной частоте определяется относительная скорость v_b, которая интегрируется по времени, в результате находят пройденный путь. Поэтому данный метод используют только для измерения разностей расстояний, а не абсолютных измерений.

Использование эффекта Доплера в интерферометрах позволяет уменьшить их чувствительность к турбулентности воздуха, так как изменение расстояния определяют не по интерференционной картине, которая очень чувствительна к турбулентности, а по изменению частоты, которая меньше чувствительна к изменениям амплитуды, вызываемым турбулентностью атмосферы и вибрациями.

Для измерений может быть использован интерферометр фирмы «Хьюлетт-Паккард», в котором осуществляется тот же принцип измерений, что и в интерферометре Майкельсона; отличие состоит в том, что при изменениях длины плеча интерферометра регистрируется не перемещение интерференционных полос, а используется эффект Доплера (рис. 2.32).

В этом интерферометре для создания двух частот излучения f_1 и f_2 со встречной поляризацией использован эффект Зеемана, согласно которому происходит расщепление спектральных линий под действием внешнего магнитного поля.

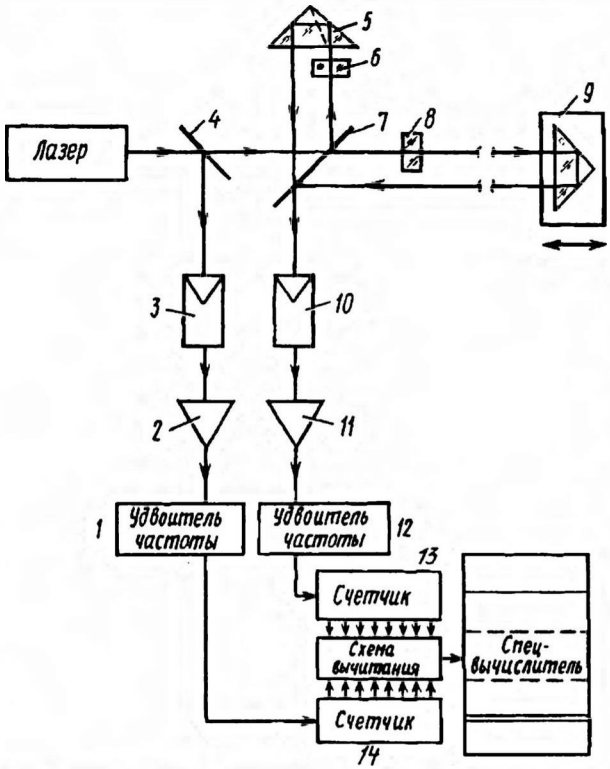


Рис. 2.32. Схема интерферометров фирмы «Хьюлетт-Паккард», основанный на эффекте Доплера
1 – удвоитель частоты; 2 – усилитель; 3 – опорный фотодиод; 4 и 7 – светоделительные пластинки; 6 и 8 – оптические фильтры; 5 – уголковый отражатель; 9 – исследуемый объект с отражателем; 10 – фотоприемное устройство; 11 – усилитель; 12 – удвоитель частоты; 13 – счетчик частоты f_1; 14 – счетчик частоты f_2

Разностная частота зависит от напряженности магнитного поля и составляет 1,8 МГц. Стабильность частоты излучения лазера поддерживается постоянной с помощью сервосистемы, регулирующей длину резонатора.

Пучок излучения от лазера попадает на первый светоделитель 4. Этот светоделитель отделяет малую часть излучения лазера, которая направляется на опорный фотодиод 3.

В результате на выходе опорного фотодиода 3 получают опорный сигнал, имеющий частоту f_2, который для повышения точности измерений усиливается в усилителе 2. Далее этот сигнал поступает на удвоитель частоты 1 и на счетчик 14, измеряющий частоту f_2 опорного сигнала. После первого светоделителя сигнал большей мощности, чем опорный, поступает в интерферометр, который состоит из светоделителя 7, отражателей 5 и 9, поляризационных светофильтров 6 и 8 и сигнального фотоприемника 10. С помощью двух поляризационных светофильтров 6 и 8 излучение с частотой f_1 фильтруется от излучения с частотой f_2. Излучение с частотой f_2 от второго (рис. 2.32.) светоделителя 7 направляется на неподвижный отражатель 5, который является опорным, а излучение с частотой f_1 направляется на отражатель 9, установленный на подвижном объекте.

Смещение отражателя приводит к тому, что возникает доплеровское смещение частоты $\pm\Delta f$. Пучки излучения с опорной частотой f_2 и час-

тотой $f_1 \pm \Delta f$, смешиваясь, образуют разностный сигнал, $f_1 - f_2 \pm \Delta f$, которая находится в пределах 1,8 ±1,55 МГц.

Этот сигнал после усиления в усилителе 11 и удвоения частоты в блоке 12 поступает на счетчик 13. Схема вычитания обеспечивает получение доплеровского сдвига частот Δf по разности показаний счетчиков, измеряющих частоты сигналов с измерительного и опорного фотодиодов. Для обработки информации служит процессор. Величина Δf положительна при перемещении отражателя по направлению к лазеру и отрицательна в случае обратного перемещения.

На основании измеренных значений Δf встроенный процессор вычисляет скорость перемещений отражателя, а также изменение длины измеряемой линии. При этом автоматически удваивается изменение длины волны излучения в зависимости от показателя преломления воздуха. Для измерения скорости в определенные промежутки времени снимаются показания со схемы вычитания. Например, при интервале опроса 1 с:

$$v_b = \pm \Delta f \lambda / 4. \qquad (2.56)$$

Преобразование скорости в длину также осуществляется автоматически суммированием отдельных значений v в течение всего промежутка измерений, поэтому изменение длины:

$$\Delta S = (\lambda/4) \int_{t_1}^{t_2} \Delta f \, dt. \qquad (2.57)$$

Максимально измеряемая скорость составляет 0,3 м/с при разрешении 0,002 мм/с, а максимально измеряемая разность расстояний ~60 м. Такие доплеровские измерители используют при измерении медленных смещений геотектонических плит в зонах разломов, при изучении движения ледников и деформаций сооружений.

2.7. Оптические теодолиты

Одним из массовых видов геодезических работ являются угловые измерения, которые обычно выполняют с помощью теодолитов, обеспечивающих измерение вертикальных и горизонтальных углов с точностью порядка 1″–60″.

Главной частью теодолита является угломерный круг, который может быть металлическим либо стеклянным. Согласно ГОСТ 10529-96 от 07.01.98 [44], отечественная промышленность выпускает только оптические теодолиты со стеклянными кругами. Аналогичные приборы выпускает и Украина. В зависимости от допускаемой погрешности измерения горизонтального угла одним приемом в лабораторных условиях теодолиты подразделяют на следующие типы и группы:

– Т1 – высокоточные;
– Т2 и Т5 – точные;
– Т15, Т30 и Т60 – технические.

В зависимости от конструктивных особенностей различают теодолиты следующих исполнений:

- с уровнем при вертикальном круге (традиционные, обозначение не применяется);
- К – с компенсатором углов наклона (компенсатор углов наклона применяется вместо уровня при вертикальном круге);
- А – с автоколлимационным окуляром (автоколлимационные);
- М – маркшейдерские;
- Э – электронные;
- П – теодолит имеет трубу прямого изображения.

Допускается сочетание различных вариантов исполнения в одном приборе. Для современных модификаций теодолитов перед обозначением типа теодолита указывается порядковый номер модели, например, 4Т30П. В табл. 2.6 приведены основные параметры выпускаемых теодолитов.

Таблица 2.6

Технические характеристики теодолитов, выпускаемых отечественной промышленностью

Параметр	Значение для теодолита типа					
	Т1	Т2	Т5	Т15	Т30	Т60
1. Допускаемая средняя квадратическая погрешность измерения угла одним приемом: горизонтального угла m_β вертикального угла m_α	1″ 1,2″	2″ 2,5″	5″ 8″	15″ 25″	30″ 45″	60″ 90″
2. Диапазон измерения углов 2.1. горизонтальных 2.2. вертикальных: для маркшейдерских теодолитов для остальных теодолитов	360° от –90 до +90° от –55 до +60°					
3. Увеличение зрительной трубы, не менее	40х	30х		25х	20х	15х
4. Диаметр входного зрачка, мм, не менее	50	35			25	
5. Наименьшее расстояние визирования, м, не более	1,0			0,8	0,5	
6. Номинальная цена деления цилиндрического уровня при алидаде горизонтального круга	10″	15″	20″	30″	45″	60″
7. Масса, кг, не более	11	4,7	4,3	3,5	2,5	2,0

Отечественная промышленность выпускает в основном теодолиты Т2, Т5 и Т30, которые пользуются наибольшим спросом.

Конструкции теодолитов обеспечивают проведение в полевых условиях поверки и юстировки коллимационной погрешности, места нуля (зенита), сетки нитей, уровней, оптического центрира, визиров для предварительного наведения трубы на цель, а также регулировки подъ-

емных винтов подставки без полной или частичной разборки теодолита. Все высокоточные оптические теодолиты должны работать в диапазоне температур от минус 30 до плюс 50° С, относительной влажности 95 % при температуре +20° С. Точные и технические теодолиты должны работать в диапазоне температур от минус 40 до плюс 50 °С, относительной влажности 98 % при температуре 20 °С. Необходимо отметить, что в настоящее время крупные зарубежные приборостроительные фирмы (Nikon, Sokkia, Topkon и др.) практически прекратили выпуск оптических теодолитов, предпочитая выпускать только цифровые (электронные) теодолиты. Оптические теодолиты зарекомендовали себя как приборы, обеспечивающие высокую стабильность результатов измерений, надежность в работе, имеющие малую массу и размеры, простоту в обращении. Практически все оптические теодолиты, кроме технических, имеют компенсатор при алидаде вертикального круга, который заменяет уровень при алидаде вертикального круга, что позволяет обеспечить автоматическую стабилизацию места нуля прибора. Благодаря этому отпадает необходимость каждый раз перед производством отсчета по вертикальному кругу устанавливать пузырек уровня в нуль-пункт. Принцип действия компенсатора (рис. 2.33) основан на том, что призма, установленная на маятниковом подвесе, под действием силы тяжести стремится занять отвесное положение, компенсируя этим ошибку установки теодолита.

На рис. 2.33-а показано исходное положение теодолита, при ко-тором ось вращения XX_1 отвесна, а визирная ось ww′ зрительной трубы горизонтальна. При этом штрих «О» вертикального круга с помощью линз $Л_1$ и $Л_2$ и двух зеркал $П_1$ и $П_2$ проецируется в точку О′ шкалы отсчетного микроскопа. Если ось вращения теодолита XX_1 наклонить на угол γ (рис. 2.33, б), то все элементы оптической системы компенсатора, кроме зеркала $П_2$, также отклонятся на этот угол. Зеркало $П_2$ останется в том же положении под действием собственной массы и благодаря малой величине упругого момента гибкой подвески в точке закрепления. Штрих «О» вертикального круга вновь проецируется в точку О′ шкалы отсчетного микроскопа, если зрительную трубу вновь установить горизонтально. Условие компенсации сохраняется в том случае, если при

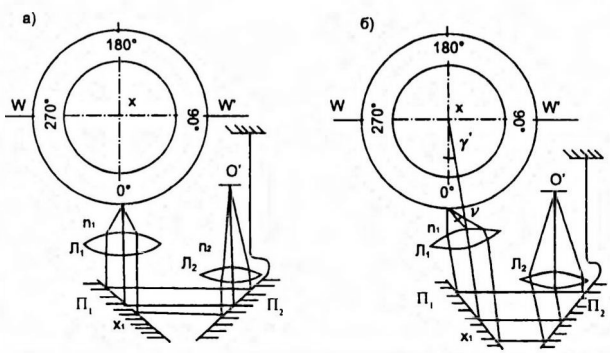


Рис. 2.33. Схема действия оптического компенсатора теодолита

наклоне теодолита падающий на линзу $Л_2$ пучок лучей будет оставаться параллельным ее оптической оси. Условие параллельности будет обеспечено, если фокусное расстояние первой линзы равно половине радиуса вертикального круга R, т.е.

$$f_1' = R/2. \qquad (2.58)$$

Это равенство сохраняется для малых углов наклона, когда упругий момент подвески пренебрежимо мал по сравнению с моментом компенсатора. Подвижность маятника компенсатора и скорость его успокоения проверяют, слегка постукивая по колонке теодолита или вращая алидаду на небольшой угол в ту или другую сторону и одновременно наблюдая изображение штрихов вертикального лимба. Остановка колебаний изображения штриха из-за «прилипания» маятника к винтам упорам недопустима. Время успокоения колебаний маятника должно не превышать 2 с. Компенсаторы угла наклона имеют характеристики, приведенные в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Технические характеристики компенсаторов угла наклона

Характеристики	Значение для теодолитов типа					
	Т1	Т2	Т5	Т15	Т30	Т60
Диапазон компенсации, не менее	±2′	±3′	±4′			
Допустимая систематическая погрешность компенсации на 1′ наклона оси теодолита	±0,4″	±0,8″	±2″			

Компенсатор обеспечивает не только удобство и быстроту действий, но также исключает ошибки, вызванные неточностью установки пузырька уровня, и дает возможность производить теодолитом нивелирование.

Сетки нитей зрительных труб имеют вид, указанный на рис. 2.34. Коэффициент нитяного дальномера в трубах с сетками вида б и г дальномерных штрихов должен быть 100±0,5 %, асимметрия дальномерных штрихов – не более 0,2 %.

Предел разрешения оптической системы зрительной трубы φ в угловых секундах в центре поля зрения составляет:

$$\varphi = 144/D_{вх}, \qquad (2.59)$$

где $D_{вх}$ – диаметр объектива зрительной трубы в мм.

В настоящее время выпускается технические теодолиты 4Т30П (четвертая модификация теодолита Т30, Россия). Цифра 30 означает среднюю квадратическую ошибку измерения угла одним приемом, выраженную в секундах и характеризующую инструментальную составляющую ошибок измерений. Буква П означает, что теодолит создает прямое изображение объекта, а не астрономическое (перевернутое).

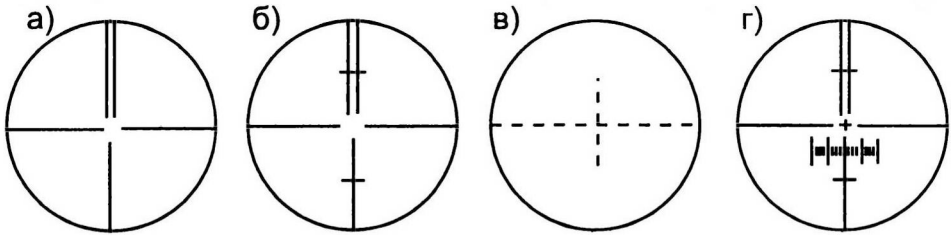


Рис. 2.34. Сетки нитей зрительных труб теодолитов
а) для высокоточных теодолитов; б) для точных и технических теодолитов; в) для теодолитов с автоколлимационным окуляром; г) для маркшейдерских теодолитов

Теодолит 4Т30П (рис. 2.35) – оптический штриховой теодолит с односторонней системой отсчета по лимбу. Он предназначен для измерения вертикальных и горизонтальных углов с точностью 30″, измерения расстояний по нитяному дальномеру, определения магнитных азимутов, нивелирования горизонтальным лучом визирования с помощью уровня при трубе. Уровень, входящий в комплект, устанавливают на зрительную трубу теодолита вместо визира. Для удобства наблюдения предметов, расположенных под углами более 45° к горизонту используется окулярная насадка. Она представляет собой призму, заключенную в оправу, свободно вращающуюся в обойме. Насадка изменяет на-

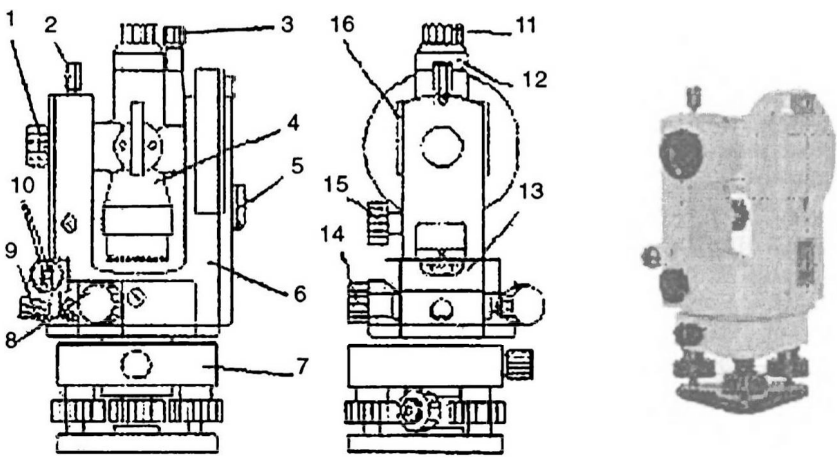


Рис. 2.35. Внешний вид теодолита 4Т30П
1 – кремальера; 2 – закрепительный винт трубы; 3 – окуляр микроскопа; 4, 16 – визир; 5 – зеркало подсветки; 6 – колонка; 7 – подставка; 8 – рукоятка перевода лимба; 9 – закрепительный винт алидады; 10 – юстировочный винт; 11 – диоптрийное кольцо окуляра; 12 – колпачек; 13 – уровень при алидаде; 14 – наводящий винт алидады; 15 – наводящий винт трубы

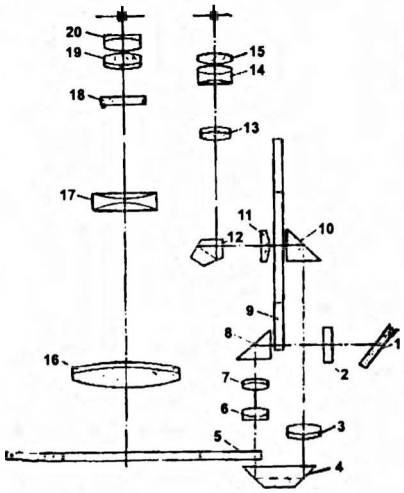


Рис. 2.36. Оптическая схема теодолита 4Т30П

1 – зеркало; 2 – матовое стекло; 3, 6, 7, 13 – линзы объектива отсчетной системы; 4 – призма; 5 – горизонтальный круг; 8, 10 – призмы; 9 – вертикальный круг; 11 – коллектив-сетка; 12 – пентапризма; 14, 15 – линзы окуляра оптической системы; 16 – объектив зрительной трубы; 17 – фокусирующая линза зрительной трубы; 18 – сетка; 19, 20 – линзы окуляра зрительной трубы

правление визирной оси на 80°. Откидной светофильтр насадки используется при наблюдениях на Солнце. Оптическая схема теодолита показана на рис. 2.36.

Технические характеристики теодолита 4Т30П приведены ниже:

Изображение	прямое
Увеличение зрительной трубы, крат	20
Наружный диаметр оправы объектива, мм	38
Поле зрения, град	2
Пределы визирования, м	1,2...
Коэффициент дальномера, К	100±0,5
Цена деления лимбов	1°
Цена деления шкал микроскопа	
для варианта (а)	5′
для варианта (б)	10′
Погрешность снятия отсчетов с лимбов, не более	30″
Цена деления уровня при алидаде	45″
Габаритные размеры, мм:	
теодолита	140x130x230
футляра	285x245x2205
Масса теодолита (с футляром), кг	2,3 (3,8)

Корпус зрительной трубы представляет собой единое целое с горизонтальной осью, установленной в лагерах колонки 6. Коллимационные визиры 4, 16 предназначены для грубой наводки на цель. Перестановку участков горизонтального круга между приемами проводят рукояткой 8 после нажатия на нее вдоль оси вращения.

Отсчет снимается с одной стороны лимба с точностью до 30″. В верхней части поля зрения отсчетного микроскопа, обозначенной буквой В, видны штрихи вертикального круга (рис. 2.37). В нижней части, обозначенной буквой Г, – штрихи лимба горизонтального круга. Горизонтальный и вертикальные круги разделены на 1°. Горизонтальный круг имеет круговую оцифровку от 0 до 359°, а вертикальный – секторную от 0 до 75° и от 0 до –75°.

Индексом для отсчитывания служит штрих лимба, отсчет производят по шкалам с округлением до 30″.

Наибольшая точность измерения углов обеспечивается при выполнении измерений полными приемами (при положениях теодолита «круг слева» и «круг справа»). При измерении углов только полуприемами результаты измерений будут искажены за счет влияния эксцентриситета алидады горизонтального круга, коллимационной ошибки и наклона горизонтальной оси. Эти инструментальные погрешности исключаются при измерении полными приемами. Вертикальные углы вычисляются по одной из формул:

$$\alpha = 0{,}5\,(Л - П), \qquad (2.60)$$

$$\alpha = Л - МО, \qquad (2.61)$$

$$\alpha = МО - П, \qquad (2.62)$$

где Л и П — показания лимба вертикального круга при положениях КЛ и КП, МО — место нуля вертикального круга, которое определяют согласно формуле:

$$МО = 0{,}5\,(Л + П). \qquad (2.63)$$

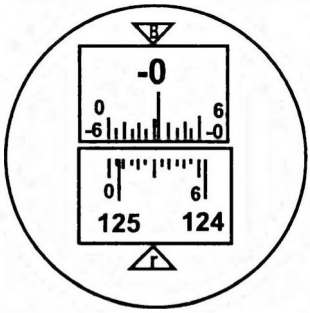


Рис. 2.37. Поле зрения микроскопа теодолита 4Т 30П с кругами, разделенными на 360° и с ценой деления шкал микроскопа 5′.

Показания лимба горизонтального круга — 125°05,5′.

Показания лимба вертикального круга — – 0°26′

Перед отсчетом по вертикальному кругу необходимо следить за тем, чтобы пузырек уровня при алидаде горизонтального круга был на середине.

Если значение МО необходимо уменьшить, на вертикальном круге устанавливают отсчет Л — МО и затем с помощью юстировочных винтов сетки нитей смещают ее до тех пор, пока перекрестие не совпадет с точкой, на которую визировали при определении МО.

Для определения расстояния L между теодолитом и рейкой с помощью нитяного дальномера обычно применяют формулу:

$$S = L\cos 2\alpha, \qquad (2.64)$$

где L — количество сантиметровых делений рейки между дальномерными штрихами рейки; α — угол наклона измеряемой линии.

Поверки теодолита

1. Ось цилиндрического уровня при алидаде горизонтального круга должна быть перпендикулярна вертикальной оси вращения инструмента.

При выполнении этой поверки уровень устанавливают по направлению двух подъемных винтов и, вращая их в различные стороны, приводят пузырек уровня в нуль-пункт. После этого алидаду поворачивают на 90° и третьим подъемным винтом приводят уровень на середину. Поворачивают алидаду на 180°. Если пузырек уровня отклонится от нуль-пункта больше, чем на одно деление, то выполняют юстировку юс-

тировочными винтами уровня на половину дуги отклонения и двумя подъемными винтами выводят пузырек уровня в нуль-пункт. При необходимости поверку повторяют. Поставленное условие считается выполненным, если при поворотах алидады по азимуту пузырек будет оставаться в нуль-пункте или отклонится не более, чем на одно деление. При выполнении последующих поверок вертикальную ось инструмента приводят в отвесное положение по отъюстированному уровню.

2. Визирная ось зрительной трубы должна быть перпендикулярна горизонтальной оси вращения трубы.

Несоблюдение этого условия влечет за собой коллимационную ошибку, под которой понимается угол между визирной осью и перпендикуляром к оси вращения зрительной трубы. Зрительную трубу при горизонтальном положении наводят на какой-нибудь удаленный предмет и берут отсчет $Л_1$ по горизонтальному кругу, затем переводят трубу через зенит, наводят на ту же точку и берут отсчет $П_1$. Так как теодолит 4ТЗОП имеет одностороннюю систему отсчитывания, то для исключения эксцентриситета горизонтального круга необходимо взять еще два отсчета $П_2$ и $Л_2$ предварительно повернув алидаду на 180°.

Двойная коллимационная ошибка:

$$2c = [(П_1 - Л_1 \pm 180) + (П_2 - Л_2 \pm 180)]0{,}5. \qquad (2.65)$$

Если значение двойной коллимационной ошибки превышает двойное значение ошибки отсчета по шкале микроскопа, то ее исправляют. В этом случае вычисляют среднее значение из отсчетов, полученных при двух положениях вертикального круга. Вращением винта наводящего устройства алидады устанавливают вычисленный отсчет ($Л_2 + c$) и смотрят в трубу: перекрестие сетки нитей сместилось с наблюдаемой точки. Тогда боковым юстировочным винтом сетки нитей наводят центральное перекрестие на точку. Затем поверку повторяют вновь до тех пор, пока коллимационная ошибка не будет превышать двойной точности прибора.

3. Ось вращения трубы должна быть перпендикулярна вертикальной оси вращения инструмента.

Для поверки этого условия теодолит устанавливают на расстоянии 10—20 м от какого-либо высокого предмета, в верхней части которого выбирают точку: на нее наводят зрительную трубу. После этого опускают трубу вниз, отмечают на предмете проекцию этой точки и получают вторую проекцию этой же точки, предварительно перевернув зрительную трубу через зенит. Если проекции точки не совпадают менее, чем на ширину биссектора сетки нитей, то условие считается выполненным.

В противном случае для юстировки инструмент сдают в специальные мастерские.

4. Вертикальный штрих сетки нитей при вертикальном положении оси вращения теодолита должен занимать отвесное положение. Установив вертикальную ось вращения теодолита в отвесное положение,

наводят центр сетки нитей на какую-нибудь точку и вращают трубу вокруг ее горизонтальной оси. Если при этом вертикальный штрих сетки нитей не сходит с изображения точки, то условие считается выполненным. Если изображение точки смещается больше, чем на треть величины биссектора, то сетку нитей необходимо развернуть. При юстировке необходимо снять колпачок, закрывающий юстировочные винты сетки, слегка ослабить винты, скрепляющие окуляр с корпусом трубы, и развернуть окуляр вместе с сеткой нитей. После исправления поверку повторяют.

5. Ось цилиндрического уровня, укрепленного на зрительной трубе, должна быть параллельна ее визирной оси.

Соблюдение этого условия позволяет правильно определить превышение при выполнении геометрического нивелирования с помощью оптических теодолитов, поэтому эта поверка аналогична поверке основного геометрического условия нивелира.

Теодолит 3Т5КП (рис. 2.38) – оптический шкаловой теодолит повторительного типа. Температурный диапазон работы от –40 до +50 °С. При эксплуатации теодолита необходимо периодически выполнять поверки, которые приведены выше.

Теодолит 3Т5КП имеет устройство точного приведения места нуля к нулю с помощью юстировочного винта, доступ к которому осуществляется через отверстие в боковой крышке.

Таким образом, отсчет по вертикальному кругу остается одним и тем же, независимо от угла наклона прибора (в пределах 4′) при неизменном положении зрительной трубы.

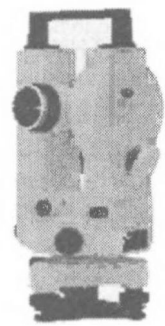


Рис. 2.38. Теодолит 3Т5 КП

Технические данные теодолита 3Т5КП приведены ниже:

Средняя квадратическая погрешность измерения угла одним приемом	5″
Диапазон измерения вертикальных углов	–55...+60°
Зрительная труба	
Изображение	прямое
Увеличение	30х
Поле зрения	1°35′
Наименьшее расстояние визирования, м:	
без дополнительной насадки	1,5
с линзовой насадкой	0,9
Коэффициент нитяного дальномера	100 ± 0,5
Постоянное слагаемое нитяного дальномера	0
Наружный диаметр оправы объектива, мм	48
Отсчетное устройство	
Цена деления:	
лимбов	1°
шкал микроскопа	1′

круга-искателя	10°
Диапазон работы компенсатора при вертикальном круге	±4′
Систематическая погрешность компенсации на 1′ наклона	1,5″
Уровни	
Цена деления уровней:	
цилиндрического	30″
круглого	5′
Оптический центрир	
Изображение	прямое
Увеличение	2,5x
Угловое поле	4°30′
Наименьшее расстояние визирования, м	0,6
Масса, кг	
Теодолит	3,7
Трегер	0,7
Теодолит в футляре с принадлежностями	8,8
Штатив	5,6
Габаритные размеры, мм	
Теодолит с трегером	345x183x123
Футляр	470x240x210
Штатив	160x(1000–1600)
Высота горизонтальной оси от опорной плоскости трегера	232

Горизонтальный и вертикальный круги разделены и оцифрованы через 1°. Изображение штрихов и цифр проецируются на плоскость отсчетных шкал микроскопа, при чем изображение горизонтального круга имеет желтый фон, а вертикального – голубой. Вид поля зрения отсчетного микроскопа показан на рис. 2.39.

В его верхнюю часть, отмеченную буквой В, проецируется изображение шкалы и вертикального лимба, а в нижнюю, отмеченную буквой Г, – изображение шкалы и горизонтального лимба. Каждое деление шкалы соответствует одной угловой минуте. Доли деления оцениваются на глаз с округлением до 0,1 интервала, что соответствует 6″. Индексом для отсчета служит штрих лимба. Когда в пределах шкалы находится штрих вертикального круга со знаком «–», используется весь ряд цифр со знаком «–». Когда штрих вертикального круга не имеет знака, используется «+» и весь ряд сопряженных с ним цифр. Информация о положении теодолита во время отсчета отображается в попеременно закрывающихся окошках с нанесенными на них обозначениями Л (круг слева) и П (круг справа).

Изображение одного деления лимба должно быть равно 60 делениям шкалы микроскопа. Разность между одним делением лимба и 60 делениями шкалы микроскопа является реном, который определяют, совмещая штрих А лимба с нулевым штрихом шкалы микроскопа, и берут отсчет по штриху (А – 1°).

Значение рена на данном участке круга определяют как разность отсчетов, полученных по штрихам А и (А – 1°).

Рен вертикального круга определяют на участках 0°, 2° и –2° при положении теодолита «круг слева» и «круг справа». Рен горизонтального круга определяют на участках через 60°. Из шести определений получают среднее арифметическое значение рена, которое не должно превышать 3″, а расхождение между значениями рена для разных участков круга не должно превышать 9″.

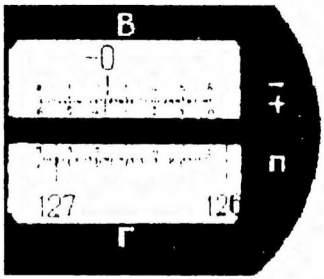


Рис. 2.39. Поле зрения отсчетного микроскопа теодолита 3Т5КП

Отсчет по вертикальному кругу – 0°23,2′, по горизонтальному – 127°05,4′.

Для устранения рена необходимо переместить линзы объектива микроскопа, закрепленные винтами 10 и 11 для горизонтального круга и винтами 6, 12 для вертикального круга (рис. 2.40). Если изображение круга необходимо уменьшить, обе линзы перемещают вверх, а если увеличить – вниз.

Наименьшая погрешность измерения углов обеспечивается при выполнении измерений полными приемами (при положениях теодолита «круг слева» и «круг справа»). Для уменьшения влияния погрешности диаметров после каждого приема следует переставлять горизонтальный круг на 180°/n (n– количество приемов).

При измерении угла полуприемами (при одном положении теодолита) результаты будут искажены влиянием эксцентриситета алидады горизонтального круга, а при измерении угла между целями, расположенными под разными углами относительно горизонта, кроме того, будут искажены влиянием коллимационной погрешности и наклона горизонтальной оси.

Среднее значение коллимационной погрешности допускается не более 15″. Исправление коллимационной погрешности осуществляется вращением клинового кольца с помощью юстировочного ключа или смещением сетки нитей горизонтальными юстировочными винтами, расположенными под колпачком.

Вертикальный угол вычисляется по формуле

$$\alpha = (Л + П)\,0{,}5, \qquad (2.66)$$

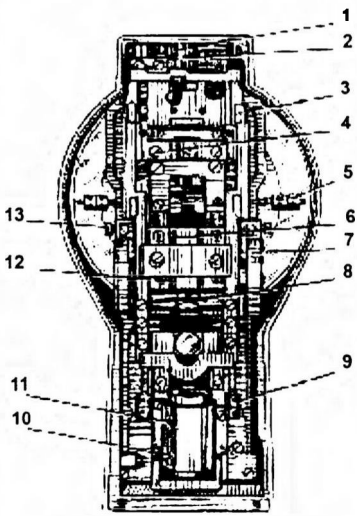


Рис. 2.40. Колонка теодолита 3Т5КП без боковой крышки

1, 8 – кронштейн; 2 – пружинный подвес; 3 – рамка; 4, 6, 10, 11, 12 – винты; 5, 9 – гайки; 7 – воздушный успокоитель; 13 – винт-упор

где Л, П – отсчеты по вертикальному кругу при его положении слева и справа. При выполнении работ, не требующих высокой точности измерений (с допускаемой погрешностью до 20″), измерения вертикальных углов могут производится полуприемами.

Вертикальные углы определяют из соотношений:

$$\alpha = Л - МО, \qquad (2.67)$$

$$\alpha = МО - П, \qquad (2.68)$$

где МО – место нуля вертикального круга, определяемого визированием на удаленную цель при двух положениях теодолита.

$$МО = (Л + П)\,0{,}5. \qquad (2.69)$$

Измерение МО выполняют дважды и вычисляют его среднеарифметическое значение. Если среднеарифметическое значение МО больше 15″, то его исправляют.

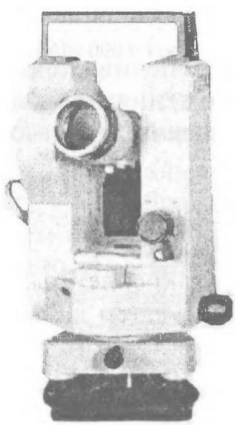


Рис. 2.41. Точный теодолит 3Т2КП

Точный теодолит 3Т2КП (рис. 2.41) предназначен для измерения углов в триангуляции и полигонометрии и использования в прикладной геодезии. На теодолит может устанавливаться светодальномер 4СТ3 для измерения расстояний с высокой точностью.

Теодолит 3Т2КП сконструирован по модульному принципу и имеет следующие технические характеристики:

Средняя квадратическая погрешность измерения угла одним приемом:	
горизонтального угла	2″
вертикального угла	2,4″
Погрешность ориентирования по буссоли	30′
Диапазон измерения зенитных расстояний	30–145°
Зрительная труба	
Изображение	прямое
Увеличение	30х
Поле зрения	1°35′
Наименьшее расстояние визирования, м:	
без дополнительной насадки	1,5
с линзовой насадкой	0,9
Коэффициент нитяного дальномера	100 ± 0,5
Постоянное слагаемое нитяного дальномера	0
Наружный диаметр оправы объектива, мм	48
Отсчетное устройство	
Диаметр лимбов, мм	90
Цена деления:	
лимбов	20′ (оцифрован через 1°)
шкалы микрометра	1″
круга-искателя	10°

Диапазон работы компенсатора при вертикальном круге	±3′
Систематическая погрешность компенсации на 1′ наклона	0,8″
Уровни	
Цена деления уровней:	
цилиндрического	15″
круглого	5′
Оптический центрир	
Изображение	прямое
Увеличение	2,5х
Угловое поле	4°30′
Наименьшее расстояние визирования, м	0,6
Масса, кг	
Теодолит	4,0
Трегер	0,7
Теодолит в футляре с принадлежностями	9,2
Штатив	5,6
Габаритные размеры, мм	
Теодолит с трегером	345х183х123
Футляр	470х240х210
Штатив	160х(1000–1600 В)
Высота горизонтальной оси от опорной плоскости трегера, мм	232

Вертикальная ось теодолита – полукинематического типа с опорой на шарики в верхней части, что обеспечивает высокую точность измерений горизонтальных углов, в том числе при визировании на цели, зенитные расстояния которых значительно отличаются.

Горизонтальная ось установлена в лагерах, закрепленных на стойках колонки. Наружный и внутренний диаметры лагер являются эксцентричными, что позволяет вращением одной из лагер изменять наклон горизонтальной оси.

Отсчетная система теодолита позволяет брать отсчет с противоположных сторон угломерных кругов, что исключает влияние эксцентриситета на результаты измерений. Вертикальный и горизонтальный круги разделены через 20′ и оцифрованы через 1°. Отсчетные устройства позволяют брать отсчет с противоположных сторон угломерных кругов, что исключает влияние эксцентриситета на результаты измерений. Изображения горизонтального и вертикального кругов вводятся в отсчетный микроскоп по двум независимым оптическим каналам. Переключение каналов производится поворотом на 90° рукоятки, установленной на одной из колонок.

В центральном окне поля зрения отсчетного микроскопа (рис. 2.42) находятся изображения диаметрально противоположных штрихов лимба, отделенные разграничительной линией.

В верхнем окне поля зрения микроскопа показаны цифры градусов, а ниже – шесть цифр (от 0 до 5), указывающие десятки минут, в правом окне – шкала микрометра, в котором левый ряд цифр соот-

ветствует единицам минут, а правый – десяткам секунд (каждое деление шкалы – одной секунде).

Перед отсчетом необходимо тщательно совместить рукояткой микрометра средние линии верхнего и нижнего изображений бифилярных штрихов лимба. Если в верхнем окне видны два градусных числа, то рабочим является число, находящееся в пределах цифр десятков минут. Цифра, расположенная под серединой числа градусов, показывает количество десятков минут. К ним нужно добавить единицы минут (из левого ряда цифр) и десятки секунд (из правого ряда цифр), а также единицы секунд со шкалы микрометра. В поле зрения отсчетного микроскопа, изображенного на рис. 2.42, отсчет соответствует 375°34′15,0″.

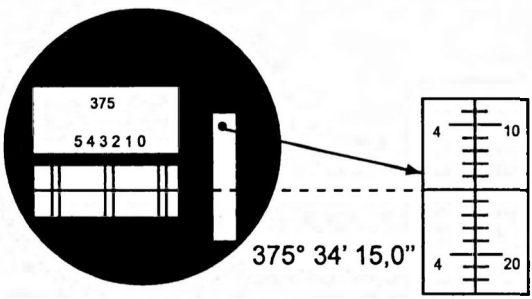


Рис. 2.42. Поле зрения отсчетного микроскопа теодолита 3Т2КП

Наибольшая точность измерения углов достигается при выполнении измерений полными приемами. Горизонтальные углы рекомендуется измерять четным числом приемов. После каждого приема круг переставляют на 180°/n (n – число приемов) для уменьшения влияния погрешностей диаметров лимба. Отсчетная система вертикального круга смонтирована на одной плате, что обеспечивает удобство сборки, юстировки и ремонта теодолита.

На плате отсчетного модуля на пружинном подвесе установлен маятник самоустанавливающегося компенсатора, колебания которого гасятся двумя успокоителями (демпферами), расположенными по обеим сторонам рамки маятника. В качестве оптического элемента компенсатора используется призма-крыша, и на этой же плате находится поворотный сектор с оптическими деталями.

Зенитные расстояния вычисляют по одной из формул:

$$Z = 0{,}5\ (Л - П + 360°), \qquad (2.70)$$

$$Z = Л - MZ, \qquad (2.71)$$

$$Z = MZ - П + 360°, \qquad (2.72)$$

где Л и П – отсчеты по вертикальному кругу при его положении слева и справа от наблюдателя, MZ – место зенита вертикального круга, значение которого определяют визированием на удаленную цель четырьмя полными приемами.

$$MZ = 0{,}5\ (Л + П - 360°). \qquad (2.73)$$

Вертикальные углы вычисляют по формуле:

$$\alpha = (П - Л) - 90^\circ \qquad (2.74)$$

или

$$\alpha = 90^\circ - z. \qquad (2.75)$$

Перед началом эксплуатации теодолита необходимо выполнить его поверки, а также определить рен отсчетного устройства с целью определения поправок к отсчетам по шкале микрометра. Необходимо отметить, что большинство зарубежных фирм выпускает ограниченное число моделей оптических теодолитов; в основном выпускаются цифровые теодолиты.

2.8. Цифровые (электронные) теодолиты

Теодолиты, содержащие преобразователь «угол-код» и позволяющие во время наблюдений получать результаты измерений на цифровом табло, называют цифровыми или электронными. Они позволяют автоматизировать процесс угловых измерений. Предшественниками цифровых теодолитов являлись кодовые теодолиты с фотографической регистрацией.

В цифровых теодолитах используют не традиционную систему деления угломерных кругов на грады или градусы, а такую систему обозначений, чтобы число знаков для передачи информации было наименьшим и чтобы получаемую информацию можно было ввести автоматически в вычислительное устройство.

Например, угол может быть представлен в двоичном коде исчислений: при этом лимб делят на чередующиеся черные и белые полосы, соответствующие двум знакам двоичного кода (0 и 1). При просвечивании такого лимба возникают только два сигнала, которые автоматически принимаются и передаются для дальнейшей обработки с помощью фотоэлектрического устройства. В простейшем случае (рис. 2.43, а) ошибка в определении направления может достигать 180°. Для повышения точности на лимбе делают кодовые дорожки в виде кольца из чередующихся прозрачных и непрозрачных полей, причем на каждой дорожке число полей удваивают (рис. 2.43, б).

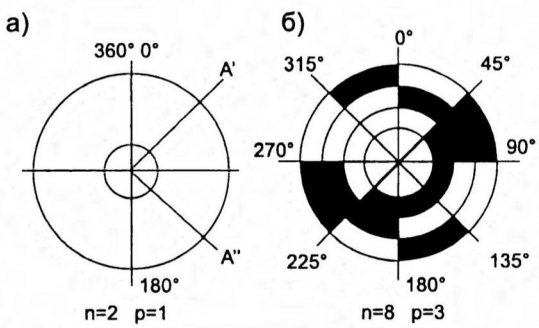


Рис. 2.43. Кодовые диски
а – разделенный на две части; б – с кодовыми дорожками

Имея лимб с двадцатью кодовыми дорожками, получают цену деления меньшего разряда (двадцатой кодовой дорожки), близкую к 1″, т. е. $\Delta = 360^\circ/2^{20} \sim 1{,}2''$.

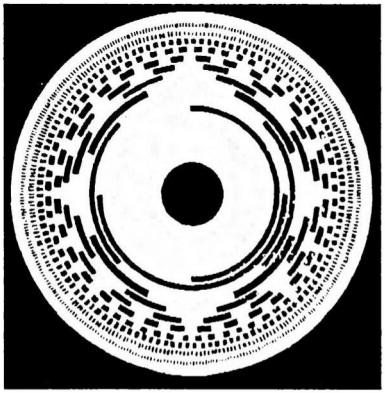


Рис. 2.44. Кодовый диск 11-разрядного (10′) преобразователя «угол-код»

Для записи значения направления в двоичном коде с такой точностью потребуется 20 двоичных знаков.

В цифровых теодолитах используют такие методы кодирования лимбов, где обозначают отдельные участки лимба кодовыми комбинациями, расположенными по окружности.

При разработке кодовых лимбов (кодовых масок) возникают трудности, зависящие от конструирования и технологии. Обычно из-за конструкторских ограничений диаметр кодовой дорожки младшего разряда не превышает 400 мм, а минимальный интервал делений может быть меньше нескольких мкм, что обусловлено шириной щели для считывания информации. Поэтому кодовые лимбы с 20 разрядами изготовить очень сложно.

В качестве примера на рис. 2.44 показан 11-разрядный (10′) кодовый диск, установленный в фотоэлектрическом преобразователе «угол-код».

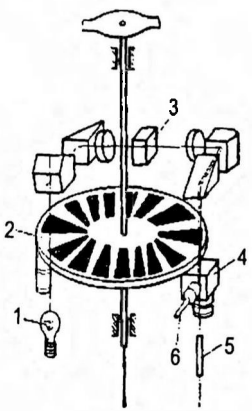


Рис. 2.45. Схема считывающего фотоэлектрического устройства
1 – источник света; 2 – кодовый диск; 3 – поляризующая призма Волластона; 4 – разделительный блок; 5 и 6 – фотоэлементы

Кодовый диск представляет собой стеклянный круг, по конструкции не отличающийся от стеклянных лимбов, на который нанесена кодовая маска в виде концентрических кодовых дорожек с прозрачными и непрозрачными зонами. Рисунок кодовой маски отображает принятый в преобразователе цифровой код, который считывается с помощью фотоэлементов (рис. 2.45).

Для уменьшения влияния эксцентриситета изображение одной половины кодового диска совмещают с изображением другой, диаметрально противоположной. Совмещение достигается при помощи оптической системы с увеличением, равным единице.

Для уменьшения числа делений электронного теодолита применяют устройства, позволяющие считывать порядковый номер интервала, а также измерять часть интервала. Для измерения части интервала его заполняют гар-

моническими колебаниями или импульсами с частотой, соответствующей требуемой ошибке. Значение измеряемого направления получают, подсчитывая число целых интервалов и прибавляя число квантующих импульсов, соответствующих части интервала, или измеряя фазу колебаний, по которой вычисляют величину части интервала.

В электронных теодолитах в основном используются пространственные фотоэлектрические преобразователи «угол-код», рассмотренные выше, что позволяет очень просто устанавливать начальный отсчет на ноль как по вертикальному, так и по горизонтальному кругу.

Встроенная система подсветки позволяет работать в условиях малой освещенности. Как правило, все цифровые теодолиты имеют функцию энергосбережения, выключающую теодолит автоматически в зависимости от того, на какое время установлен таймер. Время установки таймера обычно составляет от 10 до 30 минут. Эта функция позволяет сохранить заряд батарей во время полевых работ.

Цифровые теодолиты не требуют визуального снятия отсчетов. Чтобы получить значения углов, достаточно просто навести теодолит на цель, и текущие значения отсчетов сразу будут показаны на экране. Исключаются ошибки при взятии отсчетов, повышаются производительность и качество полевых работ. Эти приборы имеют водонепроницаемый корпус, что позволяет выполнять измерения при любой погоде, которая может быть в поле.

Все цифровые теодолиты имеют цилиндрический уровень, который используется для приведения теодолита в рабочее положение. Кроме того, большинство цифровых теодолитов снабжено датчиком угла наклона, который автоматически компенсирует наклон вертикальной оси. Принцип действия этого датчика поясняется на рис. 2.46.

В цилиндрическую ампулу, имеющую прозрачное дно, заливается прозрачная жидкость. Ниже ампулы на корпусе прибора жестко закрепляется источник света (светодиод). На поверхность жидкости снизу падает световой пучок, который затем засвечивает линейную ПЗС-матрицу, с помощью которой фиксируется положение светового пятна на его поверхности. При точности определения положения проекции (изображения) пузырька порядка 1 мкм точность определения угла наклона вертикальной оси теодолита составляет ~1″. Диапазон работы такого датчика, как правило, составляет 3′...5′. Для того чтобы контролировать угол наклона по двум осям (X и У), устанавливают такой же датчик, ось цилиндрического уровня которого пер-

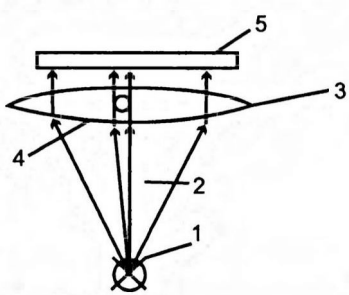


Рис. 2.46. Схема электронного уровня

1 – источник света; 2 – световой пучок; 3 – цилиндрический уровень; 4 – пузырек уровня; 5 – матрица ПЗС

пендикулярна первому. Аналогичные датчики могут работать и на отражение от поверхности жидкости.

Как известно, отклонение вертикальной оси вращения прибора от отвесной линии вызывает ошибки при измерении горизонтальных углов. Величина этой ошибки зависит от следующих факторов:

1) угла наклона вертикальной оси вращения прибора;
2) высоты цели (угла возвышения);
3) величины горизонтального угла между плоскостью наклона вертикальной оси вращения прибора и направлением на цель.

Ошибка Δ_v, обусловленная наклоном вертикальной оси, находится из выражения

$$\Delta_v = \nu \cdot \sin\alpha \, \mathrm{tg}\beta, \qquad (2.76)$$

где ν– угол наклона вертикальной оси; α– горизонтальный угол между направлением на цель и плоскостью наклона вертикальной оси вращения прибора; β – угол возвышения цели.

Например, если угол наклона вертикальной оси вращения прибора составляет 30″, направление на цель перпендикулярно (90°) к плоскости наклона вертикальной оси и угол возвышения 10°, то

$$\Delta_v = 30'' \sin 90^\circ \, \mathrm{tg}10^\circ = 30'' \cdot 1 \cdot 0{,}1763 = 5{,}29''.$$

Как видно из формулы (2.76), ошибка Δ_v возрастает при увеличении угла возвышения цели и достигает максимума, когда плоскость наклона вертикальной оси вращения прибора и направление на цель – перпендикулярны ($\sin 90^\circ = 1$). Ошибка будет минимальной, когда цель находится близко к горизонту ($\beta = 0^\circ$, $\mathrm{tg}0^\circ = 0$) и в том же самом направлении, что и плоскость наклона вертикальной оси ($\alpha = 0$, $\sin 90^\circ = 0$).

Двухосевой датчик наклона фиксирует наклон оси вращения инструмента по осям X и У и обеспечивает автоматическое исправление отсчетов на поправку $\Delta\nu$. Двухосевая компенсация особенно важна для случаев, когда наблюдается большой угол возвышения цели. Функция исправления коллимационных ошибок автоматически вводит коррекцию в измеряемые направления. По этой причине угловые измерения можно выполнять при одном положении круга без снижения точности результатов измерений. Диапазон работы двухосевого датчика наклона обычно составляет 3–5′ (в зависимости от конструкции), что позволяет, во-первых, ускорить установку цифрового теодолита в рабочее положение (достаточно горизонтировать уровни с точностью до 3–5′) и, во-вторых, производить измерения на слабокачающемся основании.

Современные цифровые теодолиты имеют водостойкую защиту, обеспечивающую бесперебойную работу прибора в условиях повышенной влажности. Стандартная рабочая температура составляет от –20 °С до +50° С.

В настоящее время различными фирмами выпускается широкий спектр цифровых теодолитов, начиная от высокоточных, обеспечивающих точность измерений 1–2″, и кончая техническими, имеющими точность 20–30″ (табл. 2.8 приложения). Например, фирма Sokkia выпускает модельный ряд цифровых теодолитов DT210, DT510 и DT610, которые обеспечивают точность измерения горизонтальных и вертикальных углов 2″, 5″ и 7″ соответственно. Вертикальные и горизонтальные углы выводятся каждые 0,5 сек. на двухстрочный жидкокристаллический дисплей. Зрительная труба с подсветкой сетки нитей имеет увеличение 30х. Эти приборы имеют высокую степень влаго- и пылезащищенности – IP66, и поэтому надежно работают в неблагоприятных условиях, например, при внезапных ливнях, продолжительной изморози или высокой влажности на подземных строительных площадках. Благодаря внедрению новых технологий продолжительность работы с одним комплектом стандартных алкалиновых батарей С-типа (две шт.) увеличена до 110 час. Использование цифровых теодолитов вместо оптических позволяет существенно повысить производительность работ (до 75%).

Еще большими возможностями обладают лазерные цифровые теодолиты типа LDT50 Sokkia (Япония), которые, помимо стандартных функций теодолита, имеют возможность задавать пучком лазерного излучения визирную линию (рис. 2.47).

LDT50 используется для автоматизации геодезического контроля при управлении строительными машинами и механизмами и контроля направления горнопроходческим щитом. В этом приборе одним нажатием клавиши переключают режим параллельного пучка на сфокусированный и обратно. В нем в качестве излучателя используется лазерный диод с двухступечатой выходной мощностью, обеспечивающей дальность действия порядка 400 м. Параллельный лазерный пучок обычно используют для контроля направления при выемке грунта. Сфокусированный лазерный пучок – для точного визирования и определения местоположения при управлении горнопроходческим щитом. Точность измерения горизонтальных и вертикальных углов составляет 5″.

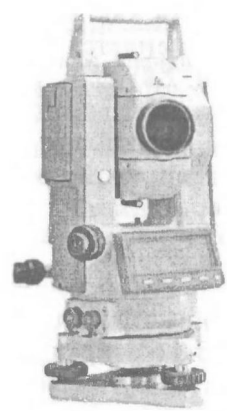


Рис. 2.47. Внешний вид лазерного цифрового теодолита LDT50, выпускаемого фирмой Sokkia (Япония)

Оптический центрир позволяет осуществлять центрирование прибора на расстоянии 20 см, что удобно при работе с прибором в стесненных условиях (тоннели, коллекторы). Технические характеристики лазерного цифрового теодолита LDT50 представлены ниже:

Точность измерения углов	5″
Увеличение зрительной трубы, крат	30
Минимальное расстояние фокусирования, м	1,3
Диапазон работы лазерного визира, м	до 400
Компенсатор / диапазон работы компенсатора	двухосевой / ±3′
Клавиатура	5 клавиш
Дисплей	ЖК, 4 строки по 20 символов, с двух сторон
Пыле- и влагозащита	IPX4
Рабочая температура, °С	от –20 до +50
Время работы от штатной батареи, часов	>5
Вес, кг	5,7
Гарантийный срок	2 года

В России также имеется опыт разработки цифровых теодолитов. Так, УОМЗ выпускается цифровой теодолит Т10Е, который имеет следующие технические характеристики:

Увеличение	20х
Изображение	прямое
Поле зрения	2°
Мин. расстояние фокусировки,м	1,2
Средняя квадратическая ошибка измерения угла	10″
Время работы с одной батареей, час.	12
Диапазон рабочих температур, °С	–20...+50
Габариты, мм	145х145х195
Масса прибора, кг	2,5

2.9. Применение лазеров для угловых измерений

При использовании лазеров для измерения углов можно использовать как метод пространственного кодирования, который широко применяется в цифровых теодолитах и других геодезических приборах (см. 2.8), так и метод, основанный на преобразовании временного интервала в код [52, 55].

Во втором случае используется строгая зависимость между углом поворота α и временем τ. В простейшем случае, когда угловая скорость ω постоянна,

$$\alpha=\omega\tau. \qquad (2.77)$$

При этом методе в устройстве задается опорное направление с помощью фотоприемника А, связанного с основанием прибора, и светового пучка, вращающегося с постоянной угловой скоростью (рис. 2.48).

Другой фотоприемник – В – жестко связан со зрительной трубой. За один оборот сигнал от источника света попадает через щель на опорный фотоприемник и фотоприемник зрительной трубы. При этом регистрируют два сигнала: один при засветке опорного (неподвижного фотоприемника, а другой – при засветке сигнального (подвижного) фотоприемника, связанного со зрительной трубой. Временной интервал τ между двумя импульсами, регистрируемыми на вы-

ходе фотоприемников, прямо пропорционален измеряемому углу α. Для получения высокой точности угловых измерений необходимо измерять время с относительной ошибкой порядка 10^{-6}. В этом случае ошибка измерения угла в пределах 360° составит 1,3″ при условии, что скорость вращения постоянна.

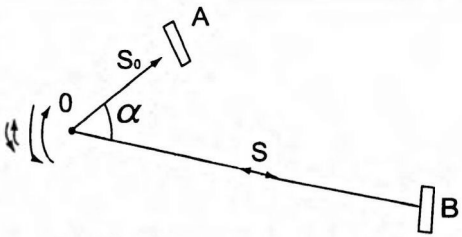


Рис. 2.48. Измерение угла на основе сканирования с постоянной угловой скоростью

А – неподвижный «опорный» фотоприемник; В – фотоприемник, жестко связанный со зрительной трубой. Световой пучок вращается с постоянной угловой скоростью и периодически облучает фотоприемники А и В

Для обеспечения такой высокой точности измерения времени преобразуют временной интервал в код. Схема аналого-цифрового преобразователя «угол-время-код» представлена на рис. 2.49.

Во время работы вращающееся зеркало, установленное на вертикальной оси теодолита, отражает узкий световой пучок в горизонтальной плоскости. Так как зеркало вращается, пучок периодически засвечивает то фотоприемник, установленный на визирной цели, то опорный фотоприемник, жестко связанный со зрительной трубой.

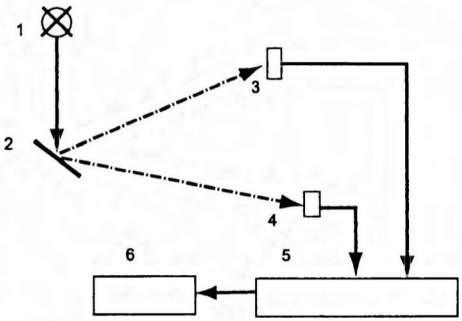


Рис. 2.49. Схема аналого-цифрового преобразователя «угол-время-код»

1 – излучатель; 2 – вращающееся зеркало; 3 – опорный фотоприемник; 4 – фотоприемник, жестко связанный со зрительной трубой; 5 – измеритель-формирователь временных интервалов; 6 – процессор

При этом старт-импульс от опорного фотоприемника 3 поступает в измеритель-формирователь временных интервалов 5. При облучении сигнального фотоприемника 4 от него на вход измерителя формирователя 5 поступает «стоп-импульс». По этим импульсам формируется временной интервал, соответствующий измеряемому углу, который сразу же измеряется. Для обработки информации служит процессор 6.

Частота вращения n и частота квантующих импульсов $f_{кв}$ связаны соотношением:

$$f_{кв} = 2\pi n/\Delta\varphi, \qquad (2.78)$$

где $\Delta\varphi$ – цена квантующих импульсов. Например, при частоте вращения $n = 100\ с^{-1}$ и $\Delta\varphi = 1''$ частота квантующих импульсов должна быть не меньше $360 \times 60 \times 30'' \times 100\ с^{-1} = 129{,}6$ МГц.

При этом методе измерений должна обеспечиваться высокая стабильность угловой скорости вращения. Эта задача решается путем использования синхронных многополюсных электродвигателей, частота питания которых стабилизирована от кварцевого генератора.

Применяя в качестве источника подсветки лазер, можно использовать метод временного кодирования при выполнении угловых измерений [111]. В этом случае на визирной цели необходимо установить отражатель, а для упрощения поиска цели пучок лазерного излучения трансформируют, придав ему веерообразную форму либо осуществляя построчное сканирование. Так как визирная цель при угловых измерениях находится автоматически (подсвечивается лазером), то необходимость в визировании на цель отпадает, и следовательно, скорость угловых измерений зависит только от скорости сканирования и составляет, как правило, доли секунды независимо от количества наблюдаемых визирных целей, находящихся в плоскости сканирования.

Точность угловых измерений может составлять 1″ в диапазоне 1°, а скорость – 50 измерений в секунду (см. 8.8). Благодаря высокой точности и скорости угловых измерений, прибор, реализующий этот принцип измерений, был разработан в 80-х годах прошлого столетия и использован при исследованиях вертикальной рефракции (см. 8.6), так как позволял выполнять измерения с частотой, превосходящей больше чем на порядок основную частоту флуктуаций показателя преломления воздуха на исследуемой трассе.

Необходимо отметить, что при измерении углов этим методом возникают искажения, обусловленные запаздыванием сигнала на трассе. За счет запаздывания на трассе временной интервал τ, соответствующий измеряемому углу, будет увеличен (или уменьшен) на величину $\Delta\tau$, пропорциональную разности расстояний до наблюдаемых визирных целей (рис. 2.50).

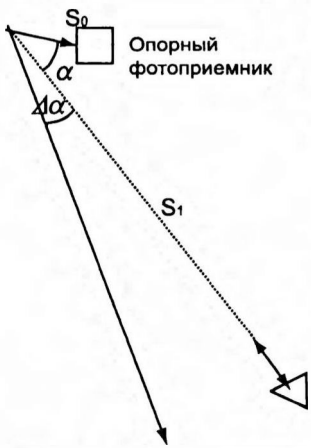


Рис. 2.50. Искажение угла, вызываемое запаздыванием сигнала на трассе

Если угол измеряется между задаваемым в приборе опорным направлением и визирной целью, то величину можно вычислить из соотношения:

$$\Delta\tau = 2S_1/V - 2S_0/V, \qquad (2.79)$$

где S_1 – расстояние до визирной цели, S_0 – расстояние до опорного фотоприемника. Например, при дальности до визирной цели 1 км и скорости сканирования (вращения) пучка 100 об/с, измеряемый угол между опорным направлением (величина которого порядка

3—10 см) и направлением на цель будет искажен за счет запаздывания сигнала на величину:

$$\Delta\alpha = \omega \cdot \Delta\tau = \omega \cdot 2S_1V = 100 \times 360 \times 60 \times 60 \times 2 \times 1000 : 3 \times 10^5 = 864''.$$

При этом запаздывание сигнала на опорном направлении (10 см), но с противоположным знаком будет составлять $3 \cdot 10^{-9}$ с. При увеличении или уменьшении скорости сканирования величина искажения в измеряемом угле за счет запаздывания сигнала будет пропорционально увеличиваться или уменьшаться.

Чтобы исключить этот эффект, необходимо осуществлять сканирование в прямом и обратном направлениях с равными по модулю угловыми скоростями. В этом случае угловые искажения, возникающие при прямом и реверсивном сканировании, будут равны по модулю, но противоположны по знаку, а следовательно, среднее значение угла, полученное из двух полупериодов сканирования, будет свободно от искажений, вызванных запаздыванием зондирующего сигнала.

Другой метод исключения влияния запаздывания сигнала связан с измерением одного и того же угла при различной скорости сканирования и вычислении соответствующих поправок в измеряемый угол.

Сканирование пучком лазерного излучения можно осуществлять не только по линейному закону, но, например, по синусоидальному, пилообразному и т. д.

Выбор того или иного закона сканирования зависит от конкретных условий поставленной задачи, а также от простоты реализации выбранного закона сканирования. Как правило, при угловых измерениях наиболее целесообразно использовать линейный закон сканирования, который позволяет сравнительно легко переходить от измеренных временных интервалов к определяемым углам.

Например, с помощью сравнительно несложных средств (используя электромеханический или электромагнитный дефлектор) можно в пределах 360° осуществлять по линейному закону круговую развертку пучка лазерного излучения.

Частота сканирования пучком лазерного излучения при угловых измерениях обычно составляет десятки, сотни и даже тысячи герц. При выборе частоты сканирования должно соблюдаться условие, при котором период сканирования $T > 2S/v$. Следовательно, при расстоянии до визирной цели 1 км период сканирования должен быть больше $0{,}7 \cdot 10^{-5}$ с, и, следовательно, частота сканирования — не более 140 кГц. Принципиально возможно, используя этот метод измерений, определять и дальность до визирных целей [111].

Пучок лазерного излучения попадает на сканирующий узел, с помощью которого осуществляется построчное сканирование пространства в горизонтальной (вертикальной) плоскости в прямом и обратном направлениях. При этом за один период сканирования каждая

точка пространства облучается пучком дважды: первый раз при сканировании в определенном направлении (например, по часовой стрелке), а второй раз – в обратном направлении. Оба электрических сигнала на выходе фотоприемника, соответствующие световым сигналам, отраженным от одной и той же точки, будут несколько отличаться друг от друга за счет искажений, возникающих при прохождении в атмосфере и в электрических цепях, однако их отождествить можно. Следовательно, за один период сканирования можно получить два значения угла, образованного направлением на опорный фотоприемник и направлением на облучаемую точку в плоскости сканирования. Эти углы будут отличаться друг от друга на величину, обусловленную запаздыванием $2\Delta\tau$ зондирующего сигнала на трассе (если скорость сканирования в прямом и обратном направлениях постоянны и равны по модулю). Для этого случая можно написать:

$$\Delta\alpha = \alpha^{\rightarrow} - \alpha^{\leftarrow} = \omega \times 2\Delta\tau = \omega \times 4S/v \qquad (2.80)$$

при условии $\omega = |\omega^{\rightarrow}| = |\omega^{\leftarrow}|$.

Чтобы получить не искаженное направление на измеряемую точку, необходимо взять среднее значение из двух значений углов, полученных при прямом и реверсивном сканировании. Расстояние до измеряемой точки можно определять также по разности временных интервалов $(\tau^{\leftarrow} - \tau^{\rightarrow})$, соответствующих измеряемым углам на одну и ту же точку, полученным при прямом и реверсивном сканировании, т.е.:

$$S = (\tau^{\leftarrow} - \tau^{\rightarrow})v/4, \qquad (2.81)$$

где v – скорость света в атмосфере.

Точность измерения расстояния до измеряемой точки зависит от точности измерения временных интервалов $\tau^{\leftarrow}$ и $\tau^{\rightarrow}$, стабильности угловой скорости сканирования и точности определения скорости света воздухе. Относительные ошибки измерения временных интервалов и определения скорости света в атмосфере примерно одинаковы и составляют $\sim 10^{-7}$. Относительная ошибка скорости сканирования примерно на порядок больше $\sim 10^{-6}$, и поэтому точность определения расстояния в первую очередь будет зависеть от этой величины. В том случае, когда на определяемой точке установлен отражатель, направления, полученные при прямом и реверсивном сканировании, легко отождествить. Если же во время измерений фиксируется сигнал от точек профиля, представляющих собой диффузные цели, то точность отождествления направления на одну и ту же точку во многом определяется возможностью применяемого математического аппарата, осуществляющего корреляцию и анализ (по амплитуде и пространственному спектру) принятых зондирующих сигналов.

Чтобы определить угол наклона плоскости сканирования, необходимо использовать электронный уровень и аналого-цифровой преобразователь «угол-код» для измерения углов в вертикальной плос-

кости. Последовательно наклоняя плоскость сканирования (осуществляя сканирование построчно), можно создавать цифровое изображение снимаемых предметов местности и осуществлять топографическую съемку практически непрерывно [53].

Метод угловых измерений с применением лазеров, при котором угловое положение пучка определяется с помощью фотоэлектрического пространственного аналого-цифрового преобразователя «угол-код», принцип действия которого описан выше (см. 2.7), используется в геодезической практике более широко в цифровых теодолитах, электронных тахеометрах и лазерных сканерах (см. 2.10; 2.11; 2.12).

2.10. Электронные тахеометры

При производстве большинства геодезических работ, как правило, требуется выполнять как угловые, так и линейные измерения, для чего обычно использовались оптические тахеометры. Еще в конце XIX века венгерский геодезист Тихи ввел в обиход слово «тахеометр», которое в переводе с греческого языка означает «быстроизмеряющий».

Позднее для этих целей стали использовать светодальномеры и теодолиты. Когда были созданы компактные светодальномеры, то конструкция их предусматривала возможность установки на теодолит. И в настоящее время конструкции светодальномеров, выпускаемых Уральским оптико-механическим заводом, предусматривают возможность их установки на теодолит. Позднее начали выпускаться приборы в общем корпусе для оптического теодолита и светодальномера. Мощным толчком в геодезическом приборостроении стал выпуск электронного тахеометра AGA-136 (Швеция), в котором оптическая система отсчета углов была заменена на электронную, т. е. в едином корпусе размещался прибор, который совмещал функции светодальномера и цифрового теодолита. В дальнейшем в электронный тахеометр был введен полевой компьютер, открыв тем самым начало выпуска компьютезированных электронных тахеометров. Использование электронных тахеометров позволило полностью отказаться от ведения полевого журнала.

В современные приборы начали встраивать мощные полевые компьютеры для обработки результатов измерений и решения непосредственно в поле типовых геодезических задач, расширились потенциальные возможности приборов за счет значительного улучшения технических характеристик.

Каждый электронный тахеометр имеет зрительную трубу, блок измерения расстояний (светодальномер), блок измерения углов (цифровой теодолит) и спецвычислитель, в который встроены программы для решения непосредственно в поле типовых геодезических задач. Конструктивные элементы современного электронного тахеометра показаны на рис. 2.51.

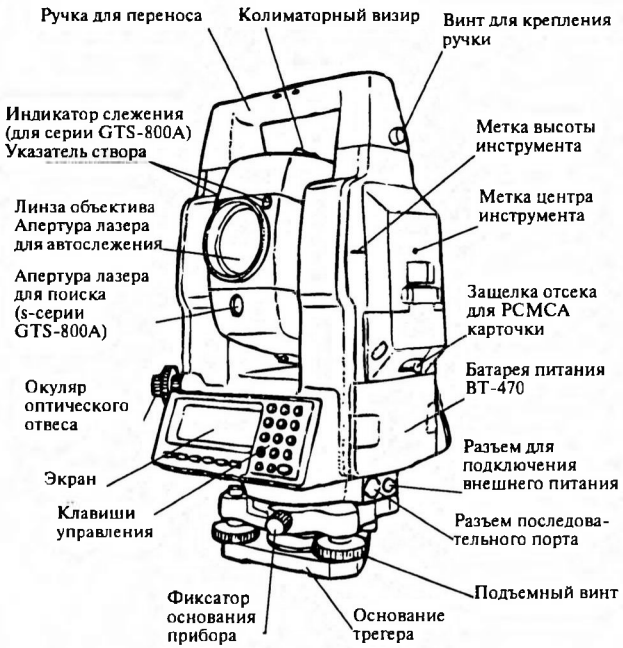


Рис. 2.51. Конструктивные элементы современного электронного тахеометра

Встроенное программное обеспечение большинства электронных тахеометров позволяет решать целый ряд геодезических задач. Например, электронные тахеометры фирмы Sokkia (Япония), которые отличаются высокой надежностью и точностью, имеют программное обеспечение, позволяющее решать следующие задачи:

– определять горизонтальное проложение и превышение;

– решать прямую и обратную геодезические задачи;

– выполнять контроль замыкания ходов;

– вычислять превышения и расстояния между неприступными точками, определять высоту объектов, на которые невозможно установить отражатель, например, линии электропередачи, высотные здания, стены и т.д.;

– выполнять расчет площади и периметра снимаемого участка;

– помещать в отдельный список для последующего быстрого поиска выносимые в натуру точки;

– осуществлять вынос в натуру точек по углу и расстоянию, по координатам, по створу между двумя точками на задаваемую вертикальную или наклонную плоскость.

Помимо встроенного программного обеспечения, есть специализированные программы, которые поставляются отдельно (например, программы, используемые при изысканиях и строительстве дорог «Road», программы для геометрических построений «COGO» и т.д.).

На рис. 2.52 показан типичный представитель электронных тахеометров серии 10 SET (Sokkia). Электронные тахеометры этой серии удобны в работе и имеют большой набор встроенных программ. При необходимости быстрого ввода названий точек и координат можно использовать беспроводную клавиатуру SF 14, имеющую 37 клавиш (стандартная клавиатура имеет 15 клавиш). Объем внутренней памяти –

10 000 точек. Для работы при низких температурах может быть использована модель, работающая при температуре –30 °С.

Фирма Sokkia впускает большой модельный ряд электронных тахеометров, технические характеристики которых приведены в табл. 2.9 Приложения. Кроме того, в этой таблице приведены технические характеристики электронных тахеометров других зарубежных фирм, которые наиболее широко используются в нашей стране. Средняя квадратическая ошибка измерения угла для высокоточных приборов составляет 1″. Выпускаются также электронные тахеометры, обеспечивающие точность угловых измерений 2″, 3″, 5″ либо 6″ (в зависимости от модели прибора), а точность линейных измерений ~2–3·10^{-6} D (D – длина трассы в мм). Большинство электронных тахеометров фирмы Sokkia имеет встроенные безотражательные светодальномеры.

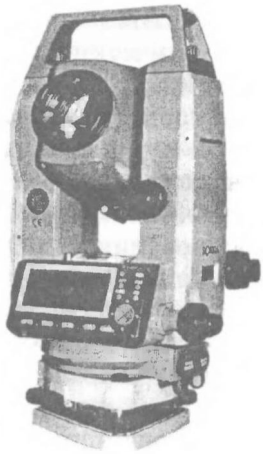


Рис. 2.52. Электронный тахеометр фирмы Sokkia (Япония)

Особый ряд приборов представляют собой электронные тахеометры с сервоприводом и автоматическим наведением на визирную цель (рис. 2.53). К таким электронным тахеометрам относятся электронные тахеометры фирмы Sokkia серии 110M SET 411DM/311DM. При наведении на визирную цель оператору достаточно видеть в поле зрения зрительной трубы отражатель (трипельпризму). Точное наведение на цель производится автоматически при измерении расстояния. Использование электронных тахеометров с сервоприводом позволяет выносить точки с гораздо большей скоростью, чем при использовании приборов с визуальным наведением. на цель. Для задания створа такие приборы снабжены створоуказателями, задающими створ двумя световыми пучками – красным и зеленым. Если точка находится справа от визирной оси, виден красный цвет, а если слева – зеленый.



Рис. 2.53. Электронный тахеометр SET 311DM

В нашей стране серийно выпускается электронный тахеометр 3Та5С. Он оснащен двухосевым компенсатором наклона инструмента с диапазоном работы ±5′, автоматическим аттенюатором, четырехстрочным жидкокристаллическим экраном с подсветкой и 12-клавишной клавиатурой, при помощи которой производится управление всеми режимами измерений, вычислений, записи и передачи данных. Резуль-

таты измерений могут сохраняться на PCMCIA карте памяти и передаваться в компьютер. Программный комплект CREDO может автоматически производить соединение с тахеометром и получать данные без предварительного сохранения файла на диске компьютера. Электронным тахеометром можно производить измерения полярных и прямоугольных координат, высотных отметок, площадей земельных участков, а также горизонтальных проложений. Области применения: геодезические работы в строительстве; развитие геодезического обоснования; вынос в натуру проектных точек, городской кадастр.

Технические характеристики прибора приведены в табл. 2.9 Приложения.

Как уже отмечалось, в последние годы появились электронные тахеометры, работающие без отражателей с дальностью действия более 1 км и наиболее сложные, с автоматическим поиском цели. Как правило, все электронные тахеометры с сервоприводом сейчас могут включать в себя опции безотражательного дальномера. При безотражательном режиме работы с прибором работает один человек. Применение таких приборов особенно эффективно на закрытых территориях. При этом очень быстро производятся измерения до различных вертикально стоящих объектов, например, зданий, деревьев, столбов и т. д., так как не требуется переставлять отражатель. В том случае, когда тахеометр с безотражательным дальномером оснащен еще и системой самонаведения на призму и радиомодемом (конфигурация Robotic), необходимость в реечнике отпадает совсем, так как нет необходимости вручную поворачивать инструмент, потому что прибор отслеживает положение отражателя.



Рис. 2.54. Устройство серводвигателя, обеспечивающего быстрое и точное вращение осей без трения роботизированного электронного тахеометра Trimble S6

При создании роботизированных тахеометров использованы новейшие достижения науки и техники. Так, например, роботизированный электронный тахеометр Trimble® S6 [99, 174] снабжен сервосистемой вращения осей без трения, при создании которой впервые в мировой практике исполь-

зована технология MagDrive™ Servo. Эта система позволяет установить сервомоторы двигателя непосредственно на горизонтальной и вертикальной осях, исключив необходимость в дополнительных механических передачах. Серводвигатель (рис. 2.54) состоит из держателя, содержащего области магнитов и мягкого металла, размещенных в двух концентрических цилиндрах, разделенных воздушным зазором. Воздушный зазор имеет достаточное пространство для цилиндрической трехфазной обмотки мотора, которая обеспечивает высокоточную скорость и направление вращения. К достоинствам используемого сервопривода относятся: малое потребление энергии, снижение шума при вращении и малый износ инструмента.

Увеличение скорости вращения по сравнению с аналогичными электронными тахеометрами других фирм достигается также за счет интеграции совмещения сервомоторов с датчиками углов, что позволяет повысить скорость считывания углов поворота осей и быструю их обработку сервопроцессором. Сервосистема обеспечивает бесконечное вращение в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также бесконечную точную наводку без использования механических закрепительных винтов.

Датчик угла (рис. 2.55) состоит из стеклянного лимба, на котором нанесены грубая и точная кодовые дорожки, что обеспечивает единую точность и разрешение по всему кругу. Обе дорожки подсвечиваются лазером и считываются ПЗС-матрицей. Для повышения точности и надежности измерений, а также уменьшения влияния эксцентриситета считывающие датчики расположены на диаметрально противоположных сторонах диска.

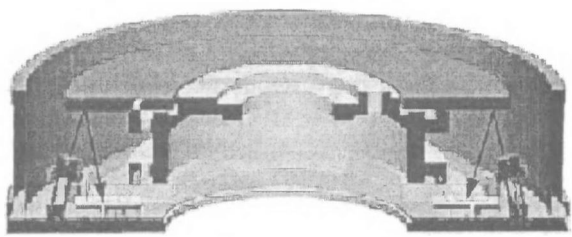


Рис. 2.55. Разрез блока датчика угла

Бесконтактное вращение прибора осуществляется за счет электромагнитной силы, заставляющей вращаться магниты и держатель:

$$F = B \times I \times L \times \sin\alpha,$$

где F – вектор силы; B – индукция магнитного поля; I – ток в обмотке; L – длина обмотки провода в магнитном поле; α – угол между направлением тока и магнитным полем.

В свою очередь, рабочий крутящий момент M равен силе F, умноженной на радиус цилиндра R магнитного держателя.

Электронный тахеометр Trimble® S6 обеспечивает не только быстрое и точное измерение углов, но и осуществляет автоматически ком-

пенсацию ошибок за наклон вертикальной и горизонтальной осей вращения, коллимационной ошибки. Кроме того, с целью уменьшения ошибок отсчета и наведения прибор выполняет усреднение результатов.

Эти приборы широко применяются для автоматизации управления строительными машинами и механизмами (см. 5.3). Необходимо отметить, что использование безотражательных электронных тахеометров не только увеличивает производительность работ, но при этом повышается и безопасность их выполнения. Последнее особенно важно, когда выполняются работы вблизи мест оживленного движения транспорта. Безотражательные электронные тахеометры позволяют геодезистам измерять объекты, оставаясь вне опасных зон. С помощью этих приборов легко измерять недоступные обычному дальномеру точки, производить съемку на опасных для установки отражателя объектах, например, дорогах, мостах и т. д., так как нет необходимости перекрывать движение транспорта и при этом соблюдается полная безопасность работ. Способность выполнять безотражательные измерения на большие расстояния особенно важна при съемке фасадов здания с высокой точностью. Эти приборы могут применяться для задания и развития съемочного обоснования, выноса проекта в натуру, управления и слежения за строительной техникой, а также для съемочных работ и др.

С 2005 г. фирма Topcon (Япония) начала выпускать новые приборы – фототахеометры GPT-7000i, которые позволяют получать на экране тахеометра изображение, создаваемое зрительной трубой (рис. 2.56). Например, при выносе в натуру, глядя в видоискатель, оператор четко выводит своего помощника с призмой на выносимые точки. Кроме того, встроенная дополнительная цифровая камера позволяет получать мелкомасштабные снимки местности. Объектив этой камеры размещен над объективом зрительной трубы. Тахеометры GPT-7000i созданы на базе уже известной в России серии безотражательных тахеометров GPT-7000 с добавлением технологии цифровых изображений. GPT-7000i имеет встроенную операционную систему Windows CE и увеличенный объем памяти для хранения изображений.



Рис. 2.56. Внешний вид фототахеометра GPT-7000i японской фирмы Topcon

На дисплее оператор наблюдает изображение снимаемого объекта

Прибор позволяет сделать фотоснимок измеряемого объекта и сохранить его в памяти вместе с результатами измерений. Благодаря этому вместо создания традиционных схематичных планов для отображения результатов съемки можно использовать фотоснимок сни-

маемого объекта вместе с измеренными точками и линиями. Оператор может проконтролировать точки (линии), которые были или не были измерены, что позволяет избежать ошибок при выполнении полевых работ. Снимок местности, полученный с помощью фототахеометра, упрощает процедуру выноса точек в натуру, так как все выносимые точки отображаются на экране. Для серии GPT-7000i существуют 2 вида программного обеспечения. Основная программа – TopSURV ON Board, которая предназначена для решения общих задач съемки и используется для управления тахеометром. Она представляет полный набор процедур для выполнения съемки, выноса в натуру и решения тривиальных геодезических задач. Эта программа устанавливается на заводе изготовителе.

Дополнительная программа 3D Image Measurement обеспечивает работу с цифровыми изображениями и предназначена для трехмерного (объемного) моделирования.

Когда активна функция фотоизображения, измеряемые точки отображаются на экране как точки и линии. Можно провести линию, соединив измеренные точки. Измеренные точки также можно проверить посредством программы 3D Image Measurement, которая в основном используется для обработки цифровой фотосъемки, полученной с концов базиса, как это делается при фототеодолитной съемке. Фотосъемка местности выполняется с помощью широкоугольной цифровой фотокамеры с двух разнесенных точек (концов базиса), координаты которых известны. ПО 3D Image Measurement System позволяет автоматически обработать полученные снимки и получить с помощью этих стереоснимков цифровую модель местности, контурные лини и оценить объемы, ограниченные сложными поверхностями.

Таким образом, благодаря таким уникальным особенностям GPT-7000i при выполнении полевых работ:

- обеспечивается однозначность распознавания измеряемых точек в режимах измерений по призмам и без них;
- исключается необходимость наведения и фокусировки на каждую точку с помощью зрительной трубы;
- осуществляется простое наведение на близзенитные точки без использования дополнительных аксессуаров (ломаных окуляров);
- определяются области, где измерения, возможно, были пропущены;
- отображаются разбивочные точки, наложенные на реальное изображение объекта до начала выноса проекта в натуру;
- результаты выноса в натуру контролируются по отображению точек на экране.

При камеральных работах упрощается обработка и повышается качество полученных результатов, так как обзорный и детальный фото-

снимки могут быть записаны в памяти инструмента вместе с данными измерений.

Эти фотоснимки дают наглядное представление состояния и особенностей объекта для подготовки более подробной съемочной документации, а также помогают при камеральной обработке полевых измерений и избавляют от необходимости вести абрис во время съемки.

Благодаря этим качествам и возможности измерения расстояний без отражателя до 250 м тахеометры серии GPT-7000 могут быть использованы для решения специальных задач, например, таких как фасадные съемки. При этом обеспечивается представление на экране изображения фасада здания и простая идентификация точек, исключается необходимость ведения абрисов и дополнительного фотографирования зданий. Фотоснимки, полученные при измерениях, могут быть также использованы для более наглядного и подробного оформления материалов полевых работ.

Тахеометры серии GPT-7000i выполняют измерения без отражателя до углов зданий проще и точнее. Цифровые технологии используются для автоматического определения точек углов зданий и конструкций с более высокой точностью, чем при выполнении обычных измерений.

Основные характеристики тахеометров

Встроенная операционная система	Windows CE.NET, обеспечивающая совместимость с внешними устройствами и программными продуктами.
Серия GPT-7000i включает в себя четыре модели с точностью измерения углов 1″, 2″, 3″ и 5″.	
Каждая модель имеет:	
– графические, цветные сенсорные экраны с двух сторон инструмента (исключение: GPT-7005 – односторонний экран);	
– разъем для подключения карт памяти Compact Flash;	
– интерфейсный порт USB;	
– возможность использования Bluetooth для передачи данных по GSM/Internet;	
– внутреннюю память 128Мб.	
Светодальномер электронного фототахеометра имеет лазер класса 1 и позволяет измерять расстояния без призмы до 250 метров и 3000 м с призмой.	
Точность измерения расстояний без призмы	5 мм.
Для целеуказателя используется лазер класса 2.	
Точность измерения расстояний с призмой	±(2 мм+2 ppm).

Все приборы достаточно просты в управлении и, как правило, имеют двухстороннюю алфавитно-цифровую клавиатуру. Клавиши меню обеспечивают управление проектами съемки, функциями координатной геометрии, настройками инструмента, просмотром и редактированием данных и т. д. Электронные тахеометры снабжены ком-

пактными визирными трубами, служащими для приема и передачи оптических сигналов при светодальномерных измерениях. Они имеют совмещенную оптику, центральная часть которой является передающей, а периферийная – приемной. При использовании такой конструкции уровень сигнала, отраженного от марки или диффузного отражателя, не меняется (если угол наклона не более 30°), что позволяет обеспечить высокую точность линейных измерений. Зондирующий пучок лазерного излучения имеет малый диаметр, и поэтому позволяет выполнять измерения сквозь листву деревьев и сетчатые ограждения, а также при отражении от измеряемой поверхности под острым углом. В некоторых электронных тахеометрах используется видимый луч (световой гид) в качестве соосного лазерного целеуказателя, позволяющего выполнять измерения внутри помещений. Он безопасен для глаз даже при визировании на него с помощью зрительной трубы. В отдельных тахеометрах также используются дополнительные лазерные указатели. Такой указатель обычно устанавливают над объективом зрительной трубы. Он излучает два пучка красного цвета, один из которых непрерывный, а другой – мерцающий, что позволяет речнику быстро встать в створ. Эту устройство особенно эффективно при плохих условиях освещенности, так как помогает легко обнаружить цель, а также увеличивает скорость работ при выносе точек в натуру.

Для связи с компьютером можно использовать несколько форматов передачи данных, что обеспечивает работу прибора с различным программным обеспечением. С использованием простого программного обеспечения, входящего в комплект тахеометра, данные могут загружаться из компьютера в электронный тахеометр.

Как и цифровые теодолиты, электронные тахеометры снабжены двухосевыми датчиками угла наклона, работающими в диапазоне 3′–5′. Двухосевой датчик наклона автоматически отслеживает наклон инструмента по осям X и У, а поправки в отсчеты по вертикальному и горизонтальному кругам вводятся автоматически. В результате упрощается и ускоряется процесс приведения прибора в рабочее положение (приведение вертикальной оси вращения алидады в вертикальное положение). Функция исправления коллимационных ошибок автоматически вводит коррекцию в измеряемые направления. По этой причине угловые измерения можно выполнять при одном положении круга без снижения точности результатов измерений. Они снабжены оптическим или лазерным центриром.

Современные электронные тахеометры имеют водостойкую защиту, обеспечивающую бесперебойную работу прибора при условии повышенной влажности. Стандартная рабочая температура для элект-ронных тахеометров составляет от –20 °С до +50 °С. Для низкотемпературных модификаций приборов рабочий диапазон температур составляет от –30 °С до +50 °С.

Таким образом, современные электронные тахеометры являются всепогодными, так как работают в условиях экстремальных температур и повышенной влажности.

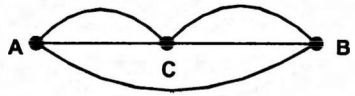


Рис. 2.57. Базис для поверки электронного тахеометра

Поверки электронного тахеометра

1. Поверка постоянной инструмента. При выполнении этой поверки определяется постоянная инструмента. Обычно постоянная инструмента имеет всегда неизменное значение. Необходимо разбить высокоточный базис длиной более 20 м (рис. 2.57) и с помощью электронного тахеометра провести на нем высокоточные линейные измерения. При этом следует учитывать, что на точность измерений влияет ошибка центрировки, ошибка призмы, ошибка собственно базиса, поправка за влияние атмосферы и при значительной длине базиса – поправка за рефракцию и кривизну Земли. При изменении базиса в здании следует помнить, что изменение температуры в здании в значительной степени влияет на длину измеряемого отрезка. Если в результате сравнительных измерений получилась разность 5 мм и более, то для определения постоянной инструмента необходимо выполнить следующее: на горизонтальном участке нужно выбрать отрезок AB длиной около 100 м и зафиксировать створную точку C. Измерить отрезки AC, AB и BC. Повторяя несколько раз измерения этих отрезков, определить постоянную инструмента. Постоянная инструмента $\Delta = AC + BC - AB$. В случае, если имеется расхождение между значением постоянной инструмента, которая записана в приборе, и расчетным значением, необходимо установить постоянную инструмента согласно описанию, которое дается в руководстве к прибору, и после этого вновь выполнить все измерения. Если после указанных измерений получена разность, превышающая 5 мм, то необходимо связаться с фирмой-изготовителем (или дилером).

2. Поверка совмещения оптических осей дальномерной и угломерной частей инструмента. Наибольшая степень автоматизации измерений достигается с помощью электронных тахеометров, у которых операция визирования также автоматизирована. Такие электронные тахеометры осуществляют слежение за визирной целью (отражателем) и по команде оператора, который имеет пульт и производит перестановку отражателя, производятся измерения. С таким прибором работу на станции может выполнять один человек. Роботизированный электронный тахеометр имеет дополнительный блок для автоматического поиска цели и визирования. Автоматическое наведение осуществляется с помощью лазера, которым осуществляется подсветка визирной цели (трипельпризмы).

Если цель подсвечивается пучком, то автоматическое наведение осуществляется быстро.

Когда на визирной цели установлен отражатель из нескольких призм, то автоматически наводится центр сетки нитей на оптический «центр тяжести» этой группы призм и ее отслеживает (рис. 2.58).

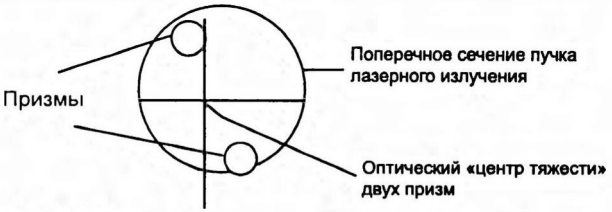


Рис. 2.58. Отслеживание оптического «центра тяжести» двух призм

Если же призма находится за пределами пучка лазерного излучения, т. е. не подсвечивается, то сначала осуществляется поиск для захвата в пучок призмы, а затем осуществляется наведение на нее. До начала работы обычно задают алгоритм поиска и диапазон по вертикали и горизонтали по обе стороны от точки, где была потеряна конкретная призма. На отслеживание может оказывать влияние наличие других предметов либо призм на пути лазерного пучка.

Для автоматического наведения удобно использовать отражатель, в котором трипельпризмы установлены по кругу, благодаря чему сигнал от электронного тахеометра может быть принят и переотражен по всем направлениям (в пределах 360°) на расстоянии до 400 м.



Рис. 2.59. Угловая расходимость пучка лазерного излучения при визировании на расстоянии менее 50 м

Для быстрого поиска расходимость пучка лазерного излучения изменяют в зависимости от дальности до цели. На небольших расстояниях – до 150 м – пучок лазерного излучения имеет расходимость порядка 2° (рис. 2.59). Для расстояний больше 150 м его расходимость не только уменьшают до 10′–15′, но иногда и трансформируют, т. е. расходимость пучка в горизонтальной плоскости делают несколько больше, чем в вертикальной (рис. 2.60).



Рис. 2.60. Угловая расходимость пучка лазерного излучения при визировании на расстоянии более 150 м

На скорости поиска и точности наведения, особенно на больших расстояниях, в значительной степени сказываются пульсации показателя преломления воздуха, которые, в свою очередь, вызывают флуктуации параметров пучка лазерного излучения. Благодаря

Пучок лазера имеет расходимость по вертикали 5′, по горизонтали – 7′

этому наблюдаются хаотическое изменение поперечного сечения пучка – «дыхание», флуктуации амплитуды сигнала – «мерцание», флуктуации углов прихода – «бегание» и др. (см. 8.1). Все эти эффекты могут привести к потере сигнала на трассе.

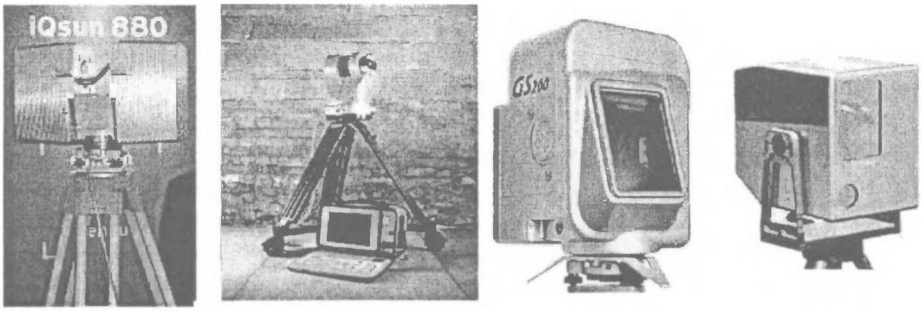
Чтобы проверить, совмещены ли оптические оси дальномерной и угломерной частей прибора, используют отражатель, на который наводят крест сетки нитей и берут отсчеты.

Затем осуществляют наведение и берут отсчеты, используя информацию об уровне принятого светодальномерного сигнала в момент его максимального значения при наведениях по часовой стрелке и против часовой стрелки. Из этих отсчетов вычисляют среднее. Эта процедура выполняется при наведении в горизонтальной плоскости, а затем в вертикальной. Если оптические оси дальномерной и угломерной частей прибора совмещены, полученные в первом и втором случаях отсчеты должны совпадать. Расхождение должно находится в пределах 1,5′. Более детально данная поверка приводится в инструкции к каждому электронному тахеометру с учетом соответствующей ему специфики. Поверки и юстировки цилиндрического и круглого уровней, сетки нитей и коллимационной ошибки проводятся так же, как соответствующие поверки теодолита (см. 2.7).

Ось круглого (установочного) уровня должна быть параллельна оси вращения нивелира. Тремя подъемными винтами пузырек круглого уровня приводят в нуль-пункт. Прицелившись поверх трубы и заметив на ее продолжении неподвижную точку какого-нибудь предмета, верхнюю часть электронного тахеометра поворачивают вокруг его оси на 180°. Если при этом пузырек останется в центре окружности на ампуле уровня, то условие соблюдено. При смещении пузырька более чем на 1/4 деления производят юстировку: действуя юстировочными винтами уровня, смещают пузырек в сторону нуль-пункта на половину дуги отклонения. С помощью подъемных винтов пузырек доводят до нуль-пункта (перемещая на вторую половину дуги отклонения) и вновь поворачивают трубу на 180°, т. е. повторяют поверку. Обычно поверку и юстировку повторяют два-три раза до выполнения условия с точностью до 0,1–0,2 деления. Тщательность этой юстировки особенно необходима для электронных тахеометров с компенсаторами.

2.11. Сканеры

Лазерные сканеры для наземных съемок являются более сложными приборами по сравнению с электронными тахеометрами, хотя в них заложены те же принципы определения координат точек, что используются и в электронных тахеометрах, которые основаны на автоматическом измерении углов и расстояний [53, 105, 160, 161, 175–178]. Внешний вид сканеров iQsun (Япония), Callidus (Германия), MENSI GS200 (Франция) и CYRAX 2500 CYRAX 2500 представлен на рис. 2.61.



а б в г

Рис. 2.61. Внешний вид лазерных сканеров
а) IQsun, Япония; б) Callidus, Германия; в) MENSI GS200, Франция; г) лазерный сканер CYRAX 2500

Основное отличие сканера от электронного тахеометра состоит в том, что каждая точка с помощью электронного тахеометра определяется индивидуально, и на каждую точку затрачивается время от единиц до десятков минут. Это связано с тем, что наблюдатель у прибора сначала находит точку визуально, затем визирует на нее зрительную трубу инструмента, вводит номер наблюдаемой точки и производит измерения, которые вводит в память (либо стирает). Практически эти же операции наблюдатель выполнит даже в том случае, если наведение на цель осуществляется автоматически, т. е. если используется роботизированный электронный тахеометр. При этом самые быстрые измерения выполняются со скоростью не более двух измерений в секунду.

Сканеры, в отличие от электронных тахеометров, осуществляют сканирование пространства лазерным пучком. Сканирование осуществляется построчно. За один период сканирования, который имеет длительность несколько сотых долей секунды, автоматически осуществляется измерение полярных координат точек профиля и осуществляется запись результатов непосредственно в спецвычислителе прибора, т. е. визирование наблюдатель не выполняет. Сканер обеспечивает значительно большую скорость измерений, так как сервопривод, автоматически поворачивающий измерительную головку в обеих (горизонтальной и вертикальной) плоскостях, позволяет выполнять до 5000 измерений в секунду, что соответствует плотности до десятков точек на 1 кв. см поверхности. Одновременно регистрируется уровень отраженного сигнала от каждой точки. Результаты измерений непрерывно записываются в реальном времени в память прибора на внешний или внутренний носитель. При работе со сканером отпадают такие операции, как поиск цели и визирование, а также необходимость нажимать на клавиши для выполнения и регистрации результатов измерений. После этого сканером осуществляется сканирование сле-

дующей строки в поле зрения прибора. Результаты также записываются в память и выводятся на дисплей прибора, где отображаются снятые точки местности с разрешением соответствующим разрешению сканера, которое выше графической точности. Перед началом съемки устанавливается область сканирования и плотность (вертикальное и горизонтальное расстояния до соседних точек). Сканер может самостоятельно найти и отсканировать с максимальной плотностью специальные визирные цели, которые служат для определения системы координат объекта, а также используются как геодезическое обоснование для уравнивания отдельных сканов. Таким образом, вся снимаемая местность (и предметы местности) в пределах поля зрения сканера оказывается равномерно покрыта точками, координаты которых определены с помощью сканера, и одновременно зарегистрирован уровень отраженного сигнала от каждой точки. В момент измерений на дисплее прибора воспроизводится изображение снятой с этой станции местности, т. е. получают как бы снимок местности и в цифровом виде.

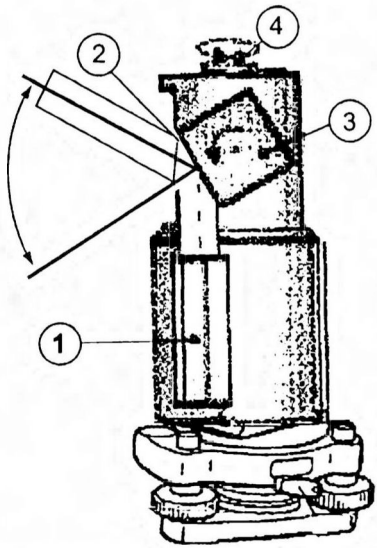


Рис. 2.62. Упрощенная схема сканера

1 – лазерный дальномер; 2 – развертка лазерного пучка; 3 – сканирующая призма; 4 – сканирующая головка

На рис. 2.62. показана схема, поясняющая принцип действия сканера. Основными узлами сканера являются: 1 – лазерный дальномер, в качестве излучателя в котором используется лазер, 3 – сканирующая призма, осуществляющая развертку лазерного пучка вертикальной плоскости, 4 – сканирующая головка, вращающаяся в горизонтальной плоскости. Для записи и обработки результатов служит компьютер.

Для съемки объектов некоторые сканеры имеют встроенную в корпус цифровую видеокамеру, с помощью которой получают одновременно с процессом сканирования панорамное изображение объекта, что позволяет в дальнейшем наложить на пространственную модель объекта высококачественную текстуру либо просто раскрасить все в реальные цвета.

Пучок лазерного излучения из лазерного дальномера 1 проходит оптическую систему и попадает в сканирующий узел, с помощью которого развертывается в вертикальной плоскости. Сканирующий узел представляет собой вращающуюся призму 3 или зеркало. Развертка пучка осуществляется с заранее заданным шагом (например, 0,1°) в

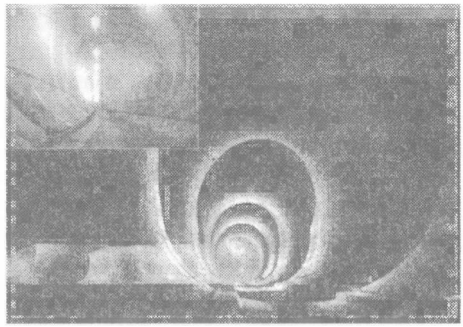


Рис. 2.63. Предварительные результаты съемки тоннеля – «облако точек». Съемка выполнена сканером Callidus, Германия (фирма Trimble)

секторе от нескольких десятков градусов до 280° (в зависимости от конструктивных особенностей прибора). При этом измеряется расстояние до сканируемой точки. Таким образом, в отдельно взятом вертикальном скане будут измерены все точки с дискретностью 0,1° (например, при максимальном вертикальном угле сканирования 280° их будет, соответственно, 2800). Затем сервопривод поворачивает сканирующую головку 4 в горизонтальной плоскости на угол, равный шагу измерения (при той же дискретности 0,1°). Углы поворота сканирующей призмы в вертикальной плоскости и угол поворота сканирующей головки в горизонтальной плоскости измеряют с помощью аналого-цифровых преобразователей. Таким образом, измеренное расстояние и два угла (вертикальный и горизонтальный) в конечном итоге дают возможность вычислить координаты сканируемой точки. Полный просмотр поля зрения сканера осуществляется построчно и содержит 3600 отдельных вертикальных плоскостей. Необходимо отметить, что технические параметры различных сканеров могут несколько отличаться от указанных выше.

Весь процесс съемки полностью автоматизирован. Полученные в момент съемки «сырые измерения» представляют собой набор («облако») точек (рис. 2.63), которые необходимо представить в виде чертежей, схем в CAD формате. На этом рисунке представлены результаты съемки сканером Callidus, Германия (фирма Trimble). Полученная после измерений модель объекта представляет собой большой набор точек (от сотен тысяч до нескольких миллионов), имеющих координаты с точностью в несколько миллиметров. В результате съемки лазерным сканером обычно получают несколько групп точек, которые обычно называют «облаками точек». Естественно, при сканировании можно видеть только одну часть объекта, которая находится в зоне прямой видимости. Чтобы снять объект полностью, его необходимо отсканировать со всех сторон. После уравнивания (объединения) всех «облаков точек» в единое геометрическое пространство получается единое описание объекта съемки. Процесс уравнивания здесь называется регистрацией. Далее происходит обработка сканов с целью создания единого скана для полного покрытия снятой поверхности. Для создания единого скана («сшивки») используется метод совмещения сканов по опорным точкам, которые отображаются на смежных сканах. Для этого во время съемки

на опорных точках устанавливаются отражатели (трипельпризмы), светоотражающие пластины или наклейки, имеющие более высокий коэффициент отражения, и потому вполне однозначно определяемые.

Для каждого скана координаты точек определяются в системе координат, центр которой совпадает с центром сканирования. Поэтому для связи координат объекта, полученных из разных сканов, необходимо выбрать единую систему координат, определить в ней центры сканирования для каждого случая (например, с помощью электронного тахеометра) и трансформировать все полученные координаты в единую систему. Распознавание объектов осуществляется оператором и во многом определяется поставленной конечной целью. Например, это может быть само облако точек, сложная поверхность, набор сечений, план, сложная 3D-модель либо просто набор измерений различных геометрических параметров (длины, периметры, диаметры, площади, объемы). Но в целом обработка состоит из нескольких основных этапов.

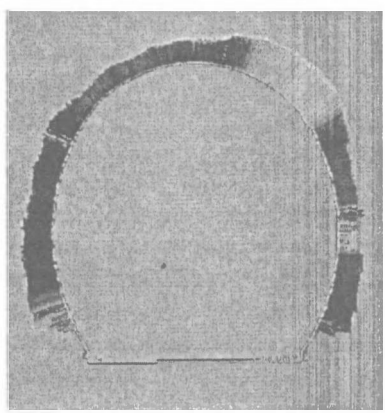


Рис. 2.64. Сравнение сечения тоннеля, полученного сканером, с проектным сечением

Получение поверхностей является одним из ответственных этапов обработки. Используя программное обеспечение, можно создать на основе «облака точек» простейшие правильные математические поверхности (плоскость, сфера, цилиндр и пр.) либо аппроксимировать сложную («неправильную») поверхность триангуляционным методом. Созданные подобным образом поверхности вполне представимы в стандартных форматах DXF, IGES, VRML, SAT, STL, DGN и, соответственно, могут быть экспортированы в любые CAD и 3D-приложения. Как уже упоминалось, если сканирование сопровождается цифровой видео- или фотосъемкой, то на этапе обработки можно совместить сканированное изображение объекта с его видеоизображением, придав скану реальные цвета и текстуру. Используя построенные модели поверхностей, можно получить поперечные сечения на заданных расстояниях (рис. 2.64) и просчитать поверхность целиком.

На основании полученных данных можно оценить отклонение геометрии сооружения от проектной и провести анализ его поверхности с целью выявления невыработанных областей поверхности, сделанных с нарушением проектного задания. Кроме того, в транспортном тоннеле, находящемся в слабых и насыщенных грунтах, который испытывает интенсивные воздействия подвижного состава, возможны смещения

компонентов сооружения и нарушение соседних элементов обделки. Для выявления локальных смещений взаимного положения соседних блоков обделки и провисания тоннеля периодически выполняются съемка и обследования геометрии тоннеля. До настоящего времени для этой цели обычно использовались электронные тахеометры, цифровые теодолиты и нивелиры, а также светодальномеры, оптические теодолиты и оптические нивелиры [32]. Применение лазерных сканеров позволило значительно сократить процесс съемки, которая выполняется при плохих условиях освещенности в узких подземных пространствах.

Съемку местности с помощью сканеров можно осуществлять с двух точек местности (с концов базиса), как это делается при фототеодолитной съемке. Обработку материалов съемки можно осуществлять, используя также фотограмметрические зависимости. Наземное лазерное сканирование может быть использовано при съемках и построении моделей рельефа и местности на локальные территории, где применение воздушной съемки не оправдано по экономическим соображениям либо необходимо отразить все микроформы и сложные участки рельефа. Традиционная съемка дает аппроксимированное представление о рельефе местности, и степень этой аппроксимации сильно зависит от опыта и квалификации исполнителя.

Лазерное сканирование позволяет зафиксировать все формы рельефа, присутствующие в зоне съемки, и в процессе постобработки уточнить необходимость отображения того или иного элемента.

Применение лазерных сканеров особенно эффективно для съемки горных карьеров, обрывов, в горной местности, резервуаров, фасадов зданий, архитектурных сооружений (рис. 2.65) и т. п.

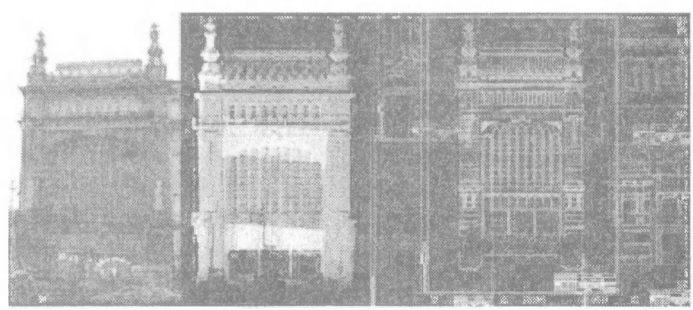


Рис. 2.65. Лазерное сканирование в реставрации (архитектурный обмерный чертеж)

Использование наземного лазерного сканирования для съемки фасадов и архитектурных памятников является развитием и совершенствованием наземной фотограмметрии. Учитывая возможность фиксации сканирующими системами истинного цвета или совмещение их с цифровыми фотокамерами, можно оперативно получать координированные модели объектов фото реалистического качества, строить по ним сечения и выделять структурные линии. Сведенные в одну систему результаты сканирования позволяют получить трехмерную модель здания, сделать комплексную оценку состояния и ис-

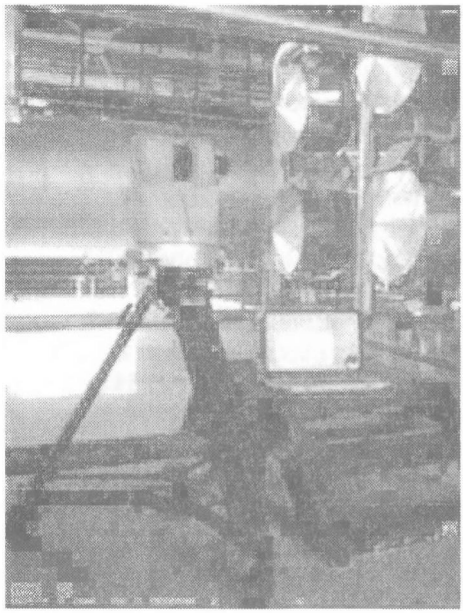


Рис. 2.66. Лазерное сканирование для построения трехмерных моделей сложных промышленных установок

пользовать модель для смежных задач: проектирования, реконструкции, визуализации планируемых изменений, строить сечения, рассчитывать количество строительных материалов для реставрации, реконструкции и пр.

Кроме того, с использованием технологии наземного лазерного сканирования можно выполнять съемку внутри инженерных сооружений (цехов и т. п.) (рис. 2.66), что в ряде случаев трудно или просто невозможно сделать традиционными методами.

Одним из перспективных направлений использования лазерных сканеров является съемка резервуаров. Как известно, существуют два основных метода калибровки резервуаров: согласно первому методу объем резервуара определяют с помощью счетчиков, регистрирующих количество вытекающей жидкости. Этот метод имеет малую производительность и практически не применим для больших резервуаров. Второй метод основан на вычислении объема на основании измерения размеров резервуара с помощью рулетки. При вычислении форма резервуара принимается за геометрически правильную, что практически не соответствует действительности из-за деформаций вследствие воздействия естественных факторов (термическое, ветровое воздействие, осадка и пр.).

Применение лазерного сканера для этой цели позволяет решать подобные задачи довольно эффективно: объем резервуаров может быть определен с погрешностью 0,07 %, а время измерений – не более часа. Полученные данные представляют собой цифровую модель стенок резервуара, состоящую из сотен тысяч точек, что позволяет учесть все неровности, дефекты стенок резервуара и вычислить объем с высокой точностью.

Затраты на проведение измерений в этом случае сокращаются в десятки раз, а получаемая точность соответствует принятым нормам.

Иногда в поле возникают проблемы в получении отдельных характеристик некоторых объектов, например, оценка провисания коммуникаций (проводов или наземных трубопроводов) между опорами, определение диаметра труб и мест смены диаметров труб на эстакадах, оценка линейных размеров объектов, не говоря уже об объектах,

имеющих сложные поверхности. Трехмерные модели таких объектов, используя традиционные технологии сбора данных, зачастую построить просто невозможно.

По данным сканирования эти вопросы решаются значительно легче, так как все материалы съемок находятся в едином трехмерном координатном поле, благодаря чему взаимное положение моделей объектов определяется с высокой точностью. Точность построения отдельных элементов модели и точность их взаимного положения определяется в основном точностью сканирующей системы.

В табл. 2.10 представлены основные технические характеристики некоторых лазерных сканеров, выпускаемых различными фирмами.

Таблица 2.10

Лазерные сканеры наземного базирования

Основные технические параметры	Сканеры наземного базирования				
	Riegl LMS-Z420i	Riegl LMS-Z420i	Callidus, Германия	Cyra HDS 2500, Швейцария	Mensi GS200 Trimble, Франция
Поле зрения сканера, °	360x80	360x90	360x280	40 x 40	360x60
Диапазон дальности до сканируемого объекта, м	до 1000	до 200	до32	160	350
Точность, мм	5	6	5	8	7
Время сканирования, мин	0.5	0.5			
Класс безопасности лазера	I	I	1		2
Частота сканирования, точек/сек.	10 000	12 000	1750	>1000	5000
Минимальный угловой шаг сканирования, °	0.01	0.01	0,1		
Класс защищенности прибора (пылевлагозащищенный)	IP 64	IP 64	IP 64		
Диапазон рабочих температур, °С	от –10 до +50	от –10 до +50	от –10 до +40	0 +50	0 +40
Основные области применения:					
Съемка технологических объектов нефте-газовой и электроэнергетической отрасли	+ +	+ +	+	+	+
Съемка открытых горных выработок	+	+	+ +	+	+
Съемка инженерных объектов	+	+	+	+	+
Съемка сложных и/или уникальных объектов	+ +	+ +	+	+	+
Мониторинг, диагностика		+		+	+
Съемка фасадов и застроенных территорий				+	+
Съемка внутрицеховых помещений			+		

2.12. Сканеры для выполнения аэросъемочных работ

Одновременно с наземными лазерными сканерами в 80-х годах были разработаны лазерные сканеры воздушного базирования, которые предназначены для воздушных съемок и устанавливаются на летательный аппарат (ЛА) (рис. 2.67). В свою очередь сканеры воздушного базирования разделяют на активные (лазерные) и пассивные сканеры. Эти приборы, установленные на борту ЛА, осуществляют сканирование местности вдоль маршрута. Ширина полосы съемки может меняться в широких пределах от 0 м до размера, равного 93 % высоты съемки. Обычно высота полета при съемке выбирается в пределах от 200 м до 3000 м. Точность определения высоты сканером составляет 5–15 см. Построчное сканирование пучком лазерного излучения осуществляют перпендикулярно маршруту со скоростью несколько тысяч точек в секунду.

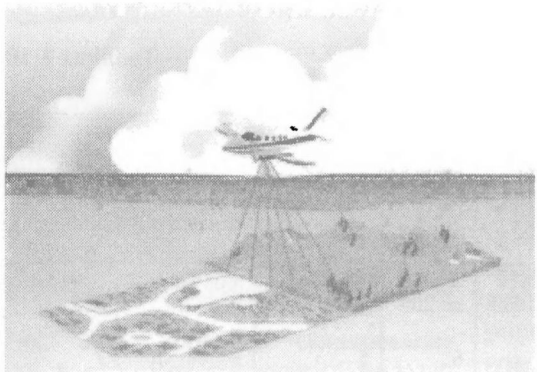


Рис. 2.67. Аэросъемка с помощью сканера

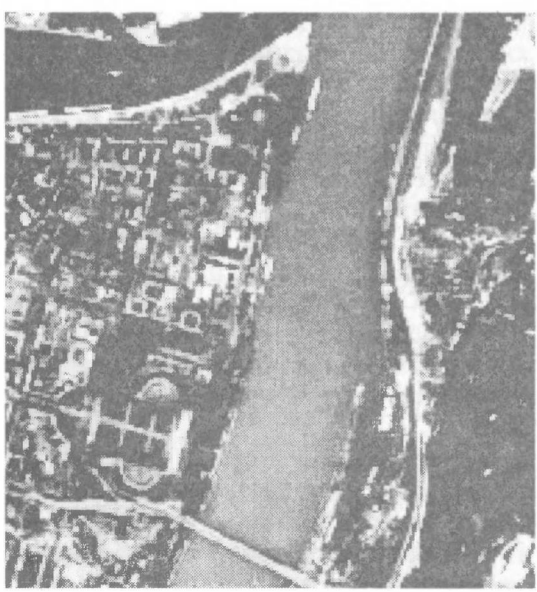


Рис. 2.68. Снимок городской территории, выполненный с помощью сканера

Траектория движения носителя регистрируется бортовым приемником GPS.

Таким образом определяются текущие координаты центра съемки. Для определения элементов ориентирования используется инерциальная система. Все эти устройства сопряжены по точности со сканером воздушного базирования (табл. 2.11). В сочетании с измеренными значениями наклонной дальности и угла сканирования эта точность определения позволяет непосредственно получить абсолютные геодезические

координаты точек пространства, вызвавших отражение зондирующего луча.

Точность изображения элементов рельефа и наземных объектов по результатам съемки, а также точность всех геометрических измерений составляет порядка 20 см—40 см (рис. 2.68). Поэтому полученные данные можно использовать для создания и обновления топографических карт и планов практически всех масштабов вплоть до 1:5000.

Таблица 2.11

Точность определения текущих координат центра съемки, элементов внешнего ориентирования и наклонной дальности (от центра съемки до точки)

Определяемый параметр	Используемая аппаратура	Точность
Пространственные координаты носителя	GPS	8—10 см
Наклонная дальность	Лазерный сканер	3—5 см
Угловые координаты зондирующего пучка лазерного излучения	Лазерный сканер	1 мрад
Ориентация прибора	Инерциальная система	1—2 мрад (ошибка позиционирования 15—30 см)
Суммарная ошибка определения координат точек	Весь бортовой комплекс	20—40 см

Производительность данного метода достаточно высока, так как за один аэросъемочный день можно выполнить съемку линейных объектов в 500—600 км. Камеральная обработка результатов съемки, как правило, по продолжительности сравнима со временем выполнения авиационных работ, что позволяет при необходимости быстро выполнить повторную съемку. Обработка материалов сканерной съемки отличается от традиционных аэрофотосъемочных технологий, которые требуют камеральной обработки, включающей фотограмметрические измерения.

По результатам съемки с помощью лазерного сканера всегда можно создать пространственный образ объекта на основании совокупности точек, координаты которых получены при отражении от поверхности объекта. Это облегчает визуальный анализ формы изображаемого объекта и позволяет выполнять все необходимые первичные (а в некоторых случаях и окончательные) геометрические измерения. Полученные данные могут быть использованы для программного анализа и построения векторных моделей.

Этот метод съемки, в отличие от классической аэрофотосъемки, меньше зависим от сезонных ограничений, связанных с наличием лиственного покрова, так как в большинстве случаев применим к съемке объектов, расположенных под кронами деревьев.

Съемка с помощью воздушного лазерного сканера может быть выполнена для территорий с отсутствующей или слабовыраженной текстурой поверхности, а именно: карьеров, тундры, песчаных пляжей, заснеженных и водных поверхностей. Отметим, что стереофотограмметрические измерения таких снимков сложны, так как отождествление соответственных точек в стереопаре затруднено.

По данным съемки выполняется камеральное дешифрирование и рисовки контурной части карты (плана). При выполнении съемки получают одновременно два вида данных: цифровую модель местности (ЦММ) с цветовым кодированием возвышения и соответствующие этой модели фрагменты изображения снимаемого объекта, полученные за счет регистрации интенсивности отраженного лазерного сигнала. Эти данные дополняют друг друга и способствуют повышению точности и достоверности работ по дешифрированию и выделению контуров. Действительно, если ЦММ представляет полную информацию по геометрии снимаемых объектов, то яркостное изображение по своим информационным свойствам соответствует классическому аэрофотоснимку, что позволяет оператору использовать методы традиционного дешифрирования.

Эти материалы могут быть получены непосредственно сразу после окончания аэросъемочных работ и использованы для камерального дешифрирования и создания цифровой модели рельефа, которая используется для ортотрансформирования снимков. Эта схема представляет собой технологически полную схему автоматического создания ортофотомозаики с точностью, удовлетворяющей требованиям топографического плана масштаба 1:5000 и мельче.

Результаты съемки можно использовать для семантического анализа данных, который предполагает автоматическое обнаружение, распознавание и позиционирование объектов различных классов. Например, можно практически без участия оператора создать модель линий электропередач, включающую опоры, провода и грозозащитные тросы, гирлянды изоляторов, пересекающие линии, и представить эту модель в CAD-овской форме, что, в свою очередь, позволяет числено оценить такие параметры, как стрела провеса, габариты, углы наклона гирлянд и др.

Также можно выполнять моделирование городских ландшафтов, автомобильных и железных дорог, инженерных коммуникаций, береговой линии. При выделении поверхности истинной земли из множества лазерных точек можно автоматически построить векторные модели лесных массивов, используемые для таксации леса и численной оценки лесотехнических характеристик.

По данным съемки могут решаться и некоторые землеустроительные задачи [105], а также может быть создана вся рельефная часть карты (плана). Этот процесс можно автоматизировать, а также создать

триангуляционную (TIN) и регулярную (GRID) модель поверхности рельефа. Такое представление рельефа позволяет выделять линии разлома и другие структурные компоненты. Полученные геоморфологические данные позволяют прогнозировать наводнения, оценивать объем снежной массы, осуществлять мониторинг карьеров, оценивать эрозию береговой линии и др.

Помимо активных (лазерных) сканирующих систем, для аэросъемки в Российской Федерации широко используются и пассивные сканирующие системы.

Из пассивных сканеров в нашей стране эффективно используются тепловизионные системы высокого разрешения – «Вулкан-4000» (рис. 2.69), «Зима» и «Икар-002» (рис. 2.70), разработанные ЗАО «Аэрогеофизика» [135].

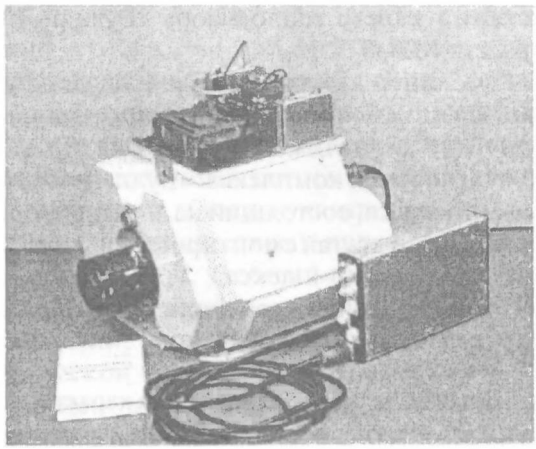


Рис. 2.69. Тепловизор «Вулкан-4000» с блоком управления



Рис. 2.70. Тепловизор «Икар-002» с блоком управления

Спектрозональная аэросъемка наряду с другими методами дистанционного зондирования играет важную роль при решении различных народнохозяйственных задач. С конца 70-х гг. она начала успешно применяться сначала в опытных, а затем и в производственных работах по изучению геологического строения и экологического состояния исследуемых территорий, а также для решения прикладных задач городского коммунального хозяйства. Широкомасштабное использование в СССР тепловизоров для дистанционного зондирования началось в конце 70-х гг. после появления серийного гражданского тепловизора «Вулкан». Разработанный Азовским оптико-механическим заводом, тепловизор был построен по традиционной схеме двухканального оптико-механического сканера с регистрацией изображения на фотопленку. Эта оптическая схема сканера достаточно удачно разработана и используется в современных пассивных сканерах.

В дальнейшем ЗАО «Аэрогеофизика» продолжило разработку системы цифровой регистрации теплового изображения и программного обеспечения, позволяющего проводить всю необходимую обработку полученных данных. На современном этапе развития техническая и программная части системы взаимно определяют состав комплекса как единой технологической линии. Аэросъемочный комплекс на базе сканирующего тепловизора «Вулкан-4000» монтируется на борту вертолета МИ-8Т.

Сканер «Вулкан-4000» обладает наиболее широкими техническими возможностями, и поэтому наиболее часто используется для различного вида съемок.

В состав комплекса «Вулкан-4000» входят бортовая ЭВМ и блок электроники, состоящий из двух плат, одна из которых – встроенное приложение, а другая смонтирована в виде блока, к которому подключаются все приборы комплекса.

Технические характеристики сканеров «Вулкан-4000» и «Икар-002» приведены в табл. 2.12.

Таблица 2.12

Технические характеристики сканеров «Вулкан-4000» и «Икар-002»

Основные технические параметры	«Икар-002»	«Вулкан-4000»
Угол мгновенного поля зрения, мрад	0,7	1
Количество каналов	1 (2)	4
Разрешение, точек на строку	2300	4096
Частота сканирования в каждом канале, строк в секунду	230	100–200
Диапазон спектральной чувствительности, мкм		
1-го канала	8–14	8–14
2-го канала	3–5	3–5
3-го канала		0,3–0,7
4-го канала		0,3–0,7
Высота съемки, м		100–3000
Основные области применения:		
– крупномасштабная съемка и оценка состояния подземных и наземных теплосетей		+
– картирование и диагностика состояния продуктопроводов, включая обнаружение мест утечек		+
– контроль состояния водных объектов, в том числе возможность обнаружения несанкционированных выпусков сбросовых вод (промышл. и коммунал.)		+
– обнаружение участков скрытого самовозгорания на торфяниках, в лесных массивах		+
– картирование участков подтопления и заболачивания		+
– структурно-тектоническое и литологическое картирование при решении геологических задач открытых территорий		+
– оценка состояния линий электропередач		+
– определение состояния дорожных покрытий и взлетно-посадочных полос аэропортов		+

– выявление таликовых зон в областях развития многолетней мерзлоты при инженерно-геологических изысканиях	+
– исследование участков развития карстовых и оползневых процессов	+
– решение задач землеустройства	
– картирование зон подземных ядерных взрывов на полигонах	

Система имеет угол полного обзора 90° при мгновенном угле зрения 0,001 рад (~3.4′). Канал управления режимами работы легко адаптируется под любой линейный сканер. В составе комплекса в качестве основного прибора для определения местоположения летательного аппарата и управления вертолетовождением используется совмещенный GPS + GLONASS приемник, а также указатель гирокурса и гировертикали. Основными его преимуществами являются высокий темп счисления (5 измерений в секунду), удобный протокол обмена и качество результатов. Тепловое изображение, скорректированное с учетом данных GPS, радиогеодезии, курсовой системы и радиовысотомера, является картографической проекцией местности.

В сканерах применены совмещенные в одном корпусе охлаждаемые инфракрасные чувствительные элементы спектральных диапазонов 3–5 мкм (InSb) и 8–14 мкм (CdHgTe). Температурная чувствительность – 0,1 °С, метод охлаждения – заливка жидким азотом (77 °К). Кроме того, сканер «Вулкан-4000» оснащен чувствительными элементами видимого спектрального диапазона, что при использовании светофильтров позволяет выполнять задачи классической спектрозональной съемки. Для получения картины теплового поля съемка выполняется по системе параллельных маршрутов с межмаршрутным расстоянием, обеспечивающим не менее чем 40%-е перекрытие изображений.

Аппаратно-программный комплекс, входящих в данное устройство выполняет:

- геодезическую привязку с использованием спутниковой навигационной системы GPS + ГЛОНАСС;
- регистрацию дополнительной информации: данных GPS в полном объеме, параметров гиросистемы, высоты полета;
- прием тепловизионного сигнала в четырех спектральных каналах (двух видимых, ближнем и дальнем ИК) с высоким геометрическим разрешением: до 4096 точек на строку сканированного изображения при скорости сканирования 100–200 строк/с в каждом канале (что соответствует разрешению 0,25 м при высоте полета 500 м);
- упаковку принятых данных неискажающими кодами более чем вдвое в реальном времени;

– запись данных на жесткий диск бортовой ЭВМ без ограничений параметров полета; продолжительность сеанса записи определяется только объемом хранения жесткого диска;
– управление режимами работы тепловизора: запуском, частотой сканирования, усилением в каналах видеосигнала, последовательностью и темпом опроса аналоговых каналов дополнительной информации.

После полета бортовые файлы распаковываются, и пакетом специализированных программных средств выполняется первичный этап камеральной обработки бортовых ИК-изображений (технологическая коррекция изображений). При этом все маршрутные изображения уравниваются по яркости (за неравномерную яркость фона в строке изображения), происходит коррекция за положение сканов, высоту полета и эволюции летательного аппарата (крен, тангаж, угол сноса, курс, вибрацию и др.), координатная коррекция и коррекция за цилиндрическую проекцию. В качестве первичных материалов получают файлы помаршрутных ИК-изображений на CD-ROM дисках и пакет программ IRIT, позволяющих выполнять визуализацию полученных материалов (включая конверторы в графические форматы *.TIF и *.BMP). Точность топографической привязки и масштабирования материалов при отсутствии топоосновы соответствует масштабу 1:10 000. Результат записывается на CD-ROM диски. Эти материалы можно сразу же вовлекать в экспресс-обработку, поскольку прилагается программное обеспечение для работы с ними (IRIT и набор необходимых утилит).

Пакет программ IRIT (Infra Red Image Tools) представляет собой единую операционную среду с набором процедур обработки изображения от выполненных съемок до отчетного материала. Главное назначение этого пакета – создание масштабных тепловых изображений в интерактивном режиме. Выходные изображения можно использовать в качестве топографической основы для последующих интерпретационных действий, некоторые из которых доступны непосредственно в программе. С помощью IRIT пользователь может:

– загружать в окна и просматривать наложенные друг на друга исходные изображения, представленные различными форматами данных, в том числе и векторными;
– манипулировать этими окнами, используя процедуры поворота, перемещения и масштабирования; при помощи мыши обозначать точки для последующих процедур подшивки или измерения координат;
– выполнять преобразования системы координат и масштаба;
– корректировать цветовые соотношения входных данных;
– осуществлять подшивку, используя назначенные точки в соответствии с выбранным методом;
– выполнять криволинейную разрезку в зоне сшивки изображений;

– сохранять рабочие изображения как в графических растровых файлах, так и в виде файлов проекта программы IRIT;
– сохранять подобранную цветную палитру изображений в отдельном файле и использовать ее в дальнейшем при конвертации обработанного растра в популярные форматы (BMP, TIF);
– распечатывать на лазерных или цветных струйных принтерах любые фрагменты оконной мозаики в выбранном масштабе. Расширяющие возможности IRIT утилиты основываются на форматах данных пакета и реализуют предварительные автоматические операции с входными данными. Изначально создававшиеся как вспомогательные инструментальные средства, они, однако, находят широкое применение в работе, особенно при решении нетривиальных задач обработки.

Набор утилит включает программы:
– непрерывный файл предварительного монтирования исходных маршрутных изображений. Программа преобразует изображения в совокупность примыкающих друг к другу фрагментов, используя навигационные данные;
– технологической коррекции изображений;
– вырезания фрагментов изображения;
– повышения резкости изображения;
– быстрого просмотра бортовых данных;
– преобразования форматов данных (в BMP и TIF), в том числе с подключением подобранной палитры;
– модификации растровых файлов (приведение их к одинаковой яркости, выделение части динамического диапазона сигнала в прозрачный слой и др.).

При полной обработке материалов съемки с учетом данных спутниковой навигационной системы и зафиксированных параметров курса, крена, тангажа и высоты полета изображение разрезается на квазилинейные фрагменты и в полуавтоматическом режиме «раскривляется», т. е. приводится к виду, отвечающему реальному режиму полета. Результат этой операции представлен в виде новых скорректированных файлов изображений и файлов-проектов формата IRIT, после чего создается топоплан масштаба 1:5000 – 1:10000, который в дальнейшем используется в качестве топоосновы. Однако целый ряд задач, в основном связанных с контролем состояния объектов городского хозяйства, требует наличия топоосновы более крупного масштаба (как правило, для городов это масштаб 1:2000). В этом случае требуется трансформация полученных изображений, поэтому выполняется еще один этап обработки – привязка отсканированного изображения с целью его дальнейшего трансформирования. На этом этапе обработки материалы инфракрасной съемки трансформируют, используя топооснову масштаба 1:2000 (что прежде всего определяет степень режимности итоговых материалов, например, для городских

территорий) и записываются в виде файлов, например, *.BMP, *.TIF или любого другого графического формата с цветной или черно-белой (256 градаций серого) палитрой. Таким образом, получают результаты съемки, соответствующие по точности исходной топооснове, в виде файлов, являющихся фактически растровым слоем для любой целевой геоинформационной системы. Полученные попланшетные тепловые изображения могут быть использованы в качестве растрового слоя для любой муниципальной ГИС. Затем выполняется цветную или черно-белая печать трансформированных ИК-изображений в заданном масштабе.

Ниже приводятся сведения об опыте использования пассивного сканера «Вулкан-4000» и «Икар-002» для выполнения различных съемок [135].

Съемка наземных и подземных тепловых сетей. На основе тепловой ИК аэросъемки могут быть получены материалы топосъемки (топоплан масштаба 1:2000) с подземными и наземными тепловыми сетями, включая обнаружение мест утечек (рис. 2.71). Следует отметить, что ИК-аэросъемка – единственный дистанционный метод, позволяющий оперативно решать эти задачи, а также уточнять или же составлять схемы расположения теплосетей. За один цикл работ картируется от 70 до 100 % сетей города в зависимости от условий съемки. Необходимо отметить, что в эксплуатационных службах схемы теплосетей многих городов России зачастую вообще отсутствуют или отличаются значительными неточностями.



Рис. 2.71. Материалы инфракрасной тепловой съемки участка города (Москвы), выполненной с целью диагностики теплотрассы. Видны тепловые сети, включая места утечек [135]

ИК-съемку целесообразно вести в режиме мониторинга дважды в год – в начале и конце отопительного сезона – и при отсутствии значительного (более 10 см) снежного покрова.

Получаемые материалы используются при составлении и корректировке ежегодных планов ремонтных работ.

Как правило, при решении задач городского теплового хозяйства выполняется интерпретация полученных материалов, и ре-

зультаты диагностики состояния подземных тепловых сетей выносятся на крупномасштабную топооснову. В результате имеется возможность не только быстро окупить свои затраты, но и получить прибыль. Экономический эффект тем выше, чем в более короткий срок на основе полученной информации будут приняты управленческие и технические решения. Так, стоимость одного цикла съемки и обработки тепловой ИК-аэросъемки на 1 км^2 составляет столько же, сколько перекладка 10 м среднего магистрального теплопровода, т. е. если в результате анализа полученных материалов объем перекладки теплосетей удалось уменьшить на 10 м (не считая эффекта от своевременного выявления и ликвидации аварийных участков), то съемка полностью окупается.

Практически во всех городах России износ теплосетей настолько велик, что затраты на съемку ничтожно малы по сравнению с затратами на ремонт.

Как сообщается в работе [134], по материалам съемки Москвы 1995 г. полтора года спустя был сделан анализ аварийных либо предаварийных ситуаций, показанных на материалах тепловой съемки, что нашло свое подтверждение (реализовались в виде полномасштабных аварий) за этот период. Если бы удалось оперативно использовать материалы съемки, то удалось бы избежать многих аварий и значительно сократить ущерб, нанесенный этими авариями. Оптимизация же планов капитального ремонта с применением данных ИК-съемки (плюс анализ привязанной паспортной базы) равнозначна увеличению финансирования ремонтных работ не более чем на 20–30 %. Но при этом все места аварийных и предаварийных ситуаций будут устранены.

Это подтверждается опытом использования материалов ИК-аэросъемки специалистами МГП «Мостеплоэнерго», которые в оперативном порядке ликвидировали все аварийные места (по материалам съемки было выявлено 280 участков с утечкой теплоносителя, среди них163 свища).

Экономический эффект от выполненной работы в два раза превысил затраты. Накопленный опыт использования съемок, выполненных ЗАО «Аэрофизика» сканерами «Вулкан-4000» и «Икар», подтверждает, что они, являясь инструментом дистанционной диагностики городского теплового хозяйства, сегодня стали составной частью технологического процесса обслуживания тепловых сетей.

Картирование и диагностика состояния продуктопроводов. ИК-съемку выгодно применять для картирования и диагностики продуктопроводов, протяженность которых составляет многие тысячи км. Как известно, нефте- и газопроводы имеют повышенную по сравнению с окружающей средой температуру, поэтому даже в случае подземной прокладки формируются достаточные для регистрации тепловые контрасты.

Опыт работ показывает, что ИК аэросъемка данных объектов может быть выполнена с малых (до 100 м) высот, при этом реальное разрешение составляет 0,1–0,2 м. На изображении такого качества отчетливо проявляются нюансы теплового следа продуктопровода, выделяются участки его обводнения грунтовыми водами (а значит, и повышенной коррозионной опасности), места развития гидрантных пробок. Места утечек выглядят по-разному: для газопроводов это контрастные, очень холодные (вследствие адиабатического расширения газа) локальные участки, для нефтепроводов – более теплые по сравнению с окружающей средой участки. Хорошо картируются площади разлива нефти.

Контроль состояния водных объектов. Тепловая съемка позволяет обнаружить несанкционированные выпуски сбросовых вод (промышленных и коммунальных), в том числе малодебитных и слабоконтрастных. Так как визуальное определение их практически невозможно, то данный метод является основным при решении экологических задач на территориях интенсивной промышленной застройки.

При выполнении съемки неважно, являются ли эти сбросы более теплыми или холодными по сравнению с водами загрязняемых водоемов. Эта же задача может быть решена при ИК-съемке и городских территорий. Специалисты отмечают, что наилучшие результаты получаются при специализированных ночных съемках с настройкой тепловизионной аппаратуры исключительно на воду. При этом осуществляется поиск пятен нефтяного загрязнения акваторий в зонах активного движения танкеров и возможного сброса балластных вод, в районах крупных портов или в случаях аварий и катастроф, сопровождающихся разливом нефтепродуктов. В отличие от визуальных методов картирования таких загрязнений тепловая съемка выделяет микронные по толщине пленки, т. е. очень слабые загрязнения.

ИК-аэросъемка может эффективно использоваться при поиске зон субаквальной разгрузки из верхних бьефов водохранилищ и зон субаквального выноса подземных пресных вод в море.

В зонах аридного климата можно выявлять места утечек из оросительных систем и наземных водонесущих коммуникаций.

Контроль состояния накопителей жидких промышленных отходов. С помощью съемки можно осуществлять контроль состояния накопителей жидких промышленных отходов, как правило, весьма токсичных. ИК-съемка позволяет обнаружить утечки из накопителей на стадии их зарождения, предупреждая тем самым тяжелые экологические последствия.

Обнаружение участков скрытого самовозгорания на торфяниках. Используя материалы съемки, можно оперативно и с минимальными затратами локализовать и ликвидировать обнаруженные участки скрытого самовозгорания на торфяниках, в лесных массивах, особенно на ранних стадиях развития. Подобную съемку целесообразно выполнять

на высоте 1—2 км в режиме патрулирования в наиболее пожароопасный летний период. Локализация очагов может выполняться в реальном времени или с постобработкой на земле.

Выявление участков подтопления и заболачивания. Выявление участков подтопления и заболачивания по материалам тепловой съемки обусловлено увеличением тепловой инерции и некоторым снижением альбедо увлажненных участков верхнего почвенного слоя. В пределах городских агломераций задача осложняется наличием асфальтового покрытия, плотной городской застройки и т. п. Тем не менее в ряде случаев, особенно в районах свободной планировки, по материалам тепловой съемки можно выявить участки подтопления зданий и сооружений. Например, выполненная весной 1997 г. ИК-аэросъемка [134] позволила выявить зону подтопления грунтовыми водами центрального здания мемориального комплекса на Поклонной горе в Москве.

На самом деле спектр возможностей тепловой аэросъемки значительно шире. Это и структурно-тектоническое и литологическое картирование при решении геологических задач открытых территорий, и оценка состояния линий электропередач, и определение состояния дорожных покрытий и взлетно-посадочных полос аэропортов, и выявление таликовых зон в областях развития многолетней мерзлоты при инженерно-геологических изысканиях, и исследование участков развития карстовых и оползневых процессов, и решение задач землеустройства, и картирование зон подземных ядерных взрывов на полигонах. Имеется даже опыт использования инфракрасной съемки для подсчета поголовья бельков-детенышей тюленей на побережье Белого моря.

Дальнейшее развитие техники сканирования позволило создать сканеры воздушного базирования, которые совмещают функции пассивных и активных сканеров, т.е. позволяют выполнять одновременно лазерную и спектрозональную съемки. Так, фирма TopoSys (ФРГ) выпустила сканер воздушного базирования FALCON, который состоит из двух сканеров: активного лазерного сканера и пассивного линейного сканера (рис. 2.72). Пульт оператора используется для автоматического теста аппаратуры и для

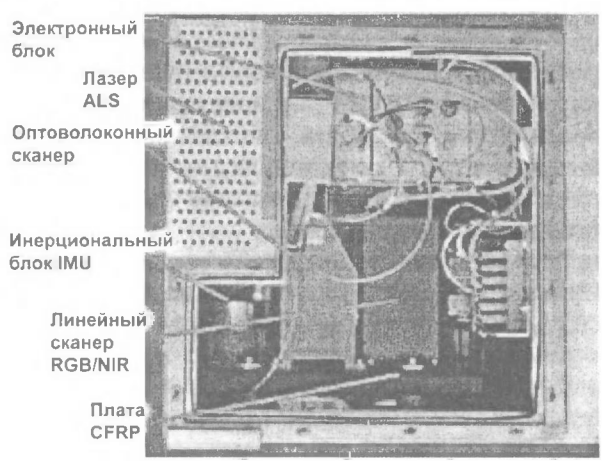


Рис. 2.72. Сканер воздушного базирования FALKON

отображения всей необходимой оператору контрольно-измерительной, визуальной и графической информации. Все элементы рабочего блока (лазерный сканер, линейный сканер и навигационно-инерциальная система) монтируются на жесткой платформе из углеродного волокна, поэтому внутренняя ориентация этих компонентов неизменна и остается постоянной, даже когда система переносится на другое воздушное судно. Калибровка производится на заводе. Установка такой системы требует минимум механических и электрических подсоединений к самолету, что позволяет осуществить монтаж или демонтаж оборудования менее чем за час. Максимальная высота при съемке – 1600 метров над поверхностью земли. Учитывая среднюю высоту нижней кромки облачности в средних широтах, такая высота является наиболее оптимальной при проведении измерений от плохо отражающих поверхностей.

В комплект сканера FALCON входит также пакет программных средств для получения цифровых моделей поверхности (ЦМП) и цифровых ортоизображений. Модульное программное обеспечение включает в себя программы обработки данных и преобразует результаты почти в любой формат данных, например: ERDAS imaging, ENVI, PCI Geomatics, ESRI ArcGIS, Terrasolid, Surfer. Программа обработки результатов и изображений (TopPIT) содержит пакет модульных программ, позволяющих обрабатывать результаты, полученные лазерным сканером и спектрозональным линейным сканером, а также основных модулей для производства изображений. Обработка данных включает в себя четыре этапа:

– определение координат центра сканирования и пространственной ориентации сканирующей системы;
– преобразование массива данных;
– создание цифровых моделей поверхности и рельефа местности;
– создание ортоизображений.

Основным отличием лазерного сканера FALCON от других сканеров этого типа является принцип «веерного» сканирования. В этом сканере используются разнесенные приемная и передающие оптоволоконные системы, каждая из которых содержит по 127 оптоволоконных каналов. В каждом канале направления лазерных пучков фиксированы относительно друг друга благодаря механически твердой ориентации волокон в диапазоне 14,3 градуса. Для получения наиболее равномерно распределенных данных сканируемой области при передаче и приеме сигналов реализован режим качения. При его использовании вибрация воздушного судна не оказывает существенного влияния на результаты съемки, так как все элементы рабочего блока закреплены на единой карбоновой платформе, и поэтому вибрация их друг относительно друга практически отсутствует. Частота следования лазерных импульсов в системе FALCON составляет примерно 83 000 Гц, за счет чего и получается точная цифровая модель снимаемой поверхности с шагом 0,1 м. Благодаря высокой частоте

следования лазерных импульсов обеспечивается перекрытие съемки (избыточность полученных результатов), что реализует основной принцип геодезических измерений – контролируемость. Лазер в системе FALCON характеризуется малым энергопотреблением и работает в инфракрасном диапазоне на длине волны 1560 нм, что обеспечивает безопасность для зрения, начиная с расстояния около 0,5 м.

Другим рабочим блоком сканера FALCON является пассивный спектрозональный линейный сканер, который не нуждается в ручной настройке благодаря автоматическому контролю экспозиции и диафрагмы. Это оптический сканер, который создает в цифровом виде изображения в четырех диапазонах спектра – красном (R), зеленом (G), синем (B) и ближнем инфракрасном (NIR) – и может работать даже в условиях плохой освещенности. Одновременное использование результатов съемки, полученных при активном и пассивном сканировании, упрощает интерпретацию полученных данных при обработке, а также позволяет сделать реалистичное цветовоспроизведение (true color), а получение данных в инфракрасном, красном и зеленом спектрах позволяет получить снимок в синтезированных цветах. По данным линейного сканера можно получить точный ортотрансформированный снимок. В зависимости от типа лазерного сканера могут фиксироваться более одного (до пяти) отражений по каждому направлению зондирующего пучка (рис. 2.73).

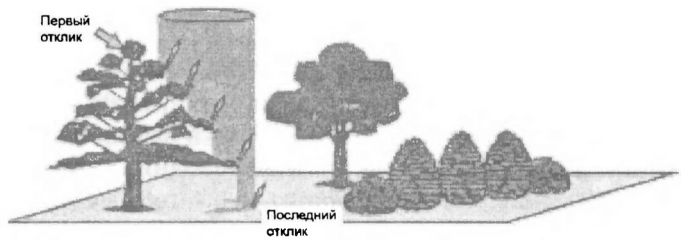


Рис. 2.73. Точки отражения зондирующего пучка

Такая возможность способствует сбору более информативных данных. Действительно, если по направлению зондирующего пучка могут быть получены отклики сразу от нескольких точек, находящихся в одном створе, то первые отклики будут сделаны за счет отражений от тех объектов, которые по пути распространения зондирующего пучка находятся ближе к сканеру, т.е. от листвы растительности, проводов и опор ЛЭП, кромок зданий, а последний отклик, как правило, соответствует поверхности земли или другой твердой поверхности, например, крыше здания.

Например, воздушные линии электропередач выделяются из результатов измерений, полученных системой FALCON, с помощью интерактивной программы «HSL». Эта программа выбирает массив точек по высотам, полученным лазерным сканером, и создает 3D векторы линий ЛЭП.

ГЛАВА 3
ПРИБОРЫ ДЛЯ НИВЕЛИРОВАНИЯ

3.1. Общие сведения. Способы автоматической компенсации угла наклона оси вращения нивелира

Из всех видов нивелирования наиболее распространенным в геодезической практике является геометрическое. В отдельных случаях применяют методы тригонометрического нивелирования, гидронивелирования, а также барометрического нивелирования.

Приборы для геометрического нивелирования классифицируют по точности и способу их установки в рабочее положение. По точности нивелиры делят на высокоточные (средняя квадратическая ошибка 0,3—0,5 мм и менее на 1 км двойного хода), точные (средняя квад-ратическая ошибка 2—3 мм и менее на 1 км двойного хода) и технические (средняя квадратическая ошибка 3—10 мм на 1 км двойного хода).

По способу установки линии визирования в горизонтальное положение (или близкое к нему, но всегда однообразное относительно отвесной линии) различают так называемые уровенные нивелиры, у которых линию визирования устанавливают по цилиндрическому уровню, скрепленному со зрительной трубой. Для другого типа нивелиров, называемых *самоустанавливающимися*, линия визирования устанавливается автоматически горизонтально с помощью компенсатора после грубой (с ошибкой 5—10′) установки оси нивелира в отвесное положение. Практически все современные нивелиры являются самоустанавливающимися.

Принцип действия компенсаторов основан на использовании силы тяжести. Современные оптико-механические компенсаторы легки, компактны и по точности стабилизации линии визирования превосходят жидкостные уровни. Компенсаторы автоматически исключают незначительные отклонения от горизонтальности линии визирования. Время самоустановки визирного луча обычно не превышает доли секунды. При наличии компенсатора устраняются трудоемкие и утомительные процессы, связанные с приведением пузырька уровня в нуль-пункт, контролем и коррекцией положениея пузырька перед отсчетом по нивелирной рейке. Отпадает необходимость иметь в конструкции нивелира элевационный винт, существенно сокращается время подготовки нивелира к работе на станции, появляется возможность вести работу на зыбких грунтах, с деревянного помоста или настила. Самоустанавливающиеся нивелиры менее подвержены деформационным воздействиям при одностороннем нагреве на солнце и проще в эксплуатации, благодаря чему производительность труда в зависимости от вида работ повышается на 10—60 %.

В качестве компенсаторов в самоустанавливающихся нивелирах применяют чувствительные элементы (маятник или свободная поверхность жидкости), положение которых устанавливается под действием силы тяжести. Ось симметрии свободно подвешенного маятника всегда совпадает с направлением отвесной линии. Свободная поверхность жидкости всегда устанавливается перпендикулярно отвесной линии. Разработанные к настоящему времени компенсаторы можно условно разделить на три группы: маятниковые, жидкостные и уровенные. Использование того или иного свойства для компенсации угла наклона визирного луча может производиться непосредственно с помощью этих элементов либо при помощи дополнительных оптических и оптико-механических приспособлений.

Впервые уровенный компенсатор был разработан в СССР Ю.Г. Стодолкевичем, внедрен в 1944 г. Позднее был разработан жидкостный компенсатор Н.А. Гусева, который не получил распространения. Практически самоустанавливающиеся нивелиры начали выпускать в 50-х годах после изобретения маятникового компенсатора.

Маятниковые компенсаторы благодаря своей миниатюрности, изящности решения задачи и высокой точности почти полностью вытеснили в конструкциях нивелиров уровенные и жидкостные компенсаторы.

Задачу самоустановки визирного луча в рабочее положение в общем виде можно решить следующим образом. Пусть О – оптический центр объектива трубы нивелира (рис. 3.1), С – центр сетки нитей. При горизонтальном положении визирного луча ОС зрительной трубы правильный отсчет по нивелирной рейке составляет П. Наклоним зрительную трубу (или вертикальную ось вращения нивелира) на угол α, тогда центр сетки нитей перейдет в положение C_1, и по рейке будет получен неправильный отсчет $П_1$. Правильный отсчет П, соответствующий главному горизонтальному лучу*, можно получить двумя способами: 1) помещением в точке К механического элемента, удерживающего при наклоне трубы на угол α центр сетки нитей в положении С, т. е. на продолжении главного горизонтального луча (компенсатор в виде подвешенной сетки нитей); 2) поме-

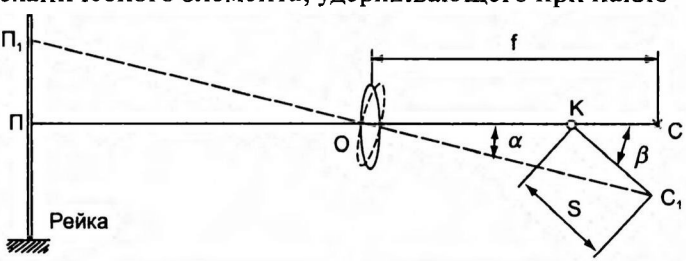


Рис. 3.1. Принципиальная схема компенсации угла наклона линии визирования

* Главным горизонтальным лучом называют горизонтальный луч, проходящий через оптический центр объектива.

щением в точке К оптико-механического элемента, поворачивающего лучи так, чтобы изображение правильного отсчета П переместилось в новое (наклоненное) положение центра сетки нитей C_1 (компенсатор в виде подвешенного зеркала, призмы, оптического клина и т. п.).

Поскольку расстояние между точкой О и сеткой нитей С примерно равно фокусному расстоянию f объектива, то условие компенсации можно получить так:
из треугольника OCC_1 при малом угле α:

$$CC_1 = f\alpha, \qquad (3.1)$$

где α – угол наклона зрительной трубы и оси вращения нивелира, рад;
из треугольника KCC_1

$$CC_1 = S\beta, \qquad (3.2)$$

где S – расстояние между точкой установки компенсатора К и сеткой нитей. Из (3.1) и (3.2) получим: $f\alpha = S\beta$, или

$$f/S = \beta/\alpha. \qquad (3.3)$$

Так как величины f и S практически постоянны, то постоянно и их отношение, называемое *механическим* или *угловым коэффициентом компенсации* [157,158]:

$$\beta/\alpha = K. \qquad (3.4)$$

Для труб с внутренней фокусировкой значение фокусного расстояния изменяется в пределах 1–3 % в зависимости от расстояния до наблюдаемого предмета, что приводит к небольшому изменению коэффициента К. При расчете компенсаторов величину f берут как некоторое среднее значение, близкое к фокусному расстоянию при наблюдении бесконечно удаленных предметов.

Если компенсирующий элемент установлен внутри зрительной трубы между объективом и сеткой нитей, то величина S не может быть более f; в этом случае коэффициент компенсации всегда больше единицы, т.е. угол β всегда больше угла наклона α трубы нивелира. Это выгодно отличает такой компенсатор от обычного жидкостного уровня, так как при их одинаковой чувствительности компенсатор будет всегда реагировать на наклон вертикальной оси вращения в К раз больше, чем уровень.

Практика подтверждает это. Даже в технических самоустанавливающихся нивелирах самоустановка визирного луча в рабочее положение осуществляется с ошибками не более 1″; для жидкостных уровней такая точность практически недостижима. В целом это благоприятно сказывается на точности результатов измерений, выполняемых с помощью самоустанавливающихся нивелиров.

Чаще всего компенсаторы подвешивают в виде маятника на тонких металлических или синтетических нитях толщиной 20–100 мкм. Для упрощения будем рассматривать такие нити идеально эластичными и

нерастяжимыми. Толщина нитей подвеса обусловливается, главным образом, массой компенсатора. Экспериментально получено, что для исключения обрыва нитей при транспортировке прибора, когда на них могут действовать значительные динамические нагрузки, нити должны иметь запас прочности в 100–300 раз.

Масса компенсаторов находится в пределах 10–40 г. Компенсатор снабжается демпфером – устройством для гашения колебаний. Период колебаний, в зависимости от длины нитей подвеса и конструкции компенсатора, находится в пределах 0,1–0,01 с; амплитуда – до 1 мм. В большинстве конструкций нивелиров компенсатор находится в сходящемся пучке лучей, несущих изображение рейки, так как такое расположение способствует уменьшению габаритов трубы и компенсатора. При колебаниях нивелира на ветру или при работе на зыбком основании качество изображения тем выше, чем меньше период и амплитуда колебаний при демпфировании. Установлено, что время демпфирования должно быть в пределах 1 с.

Ниже приведено описание и элементы теории двух, наиболее простых для уяснения физического процесса «самоустановки», механических компенсаторов с вертикально и горизонтально подвешенной сеткой нитей.

На рис. 3.2, а изображена схема нивелира с вертикально подвешенной сеткой нитей. К оправе объектива на трех нитях (на рисунке показаны только две – AE и BD) подвешена сетка нитей с центром C. Таким образом, визирный луч OC направлен по вертикали; с помощью пентапризмы он поворачивается на 90° и выходит из нее горизонтально. При отклонении оси вращения нивелира от вертикали на угол α

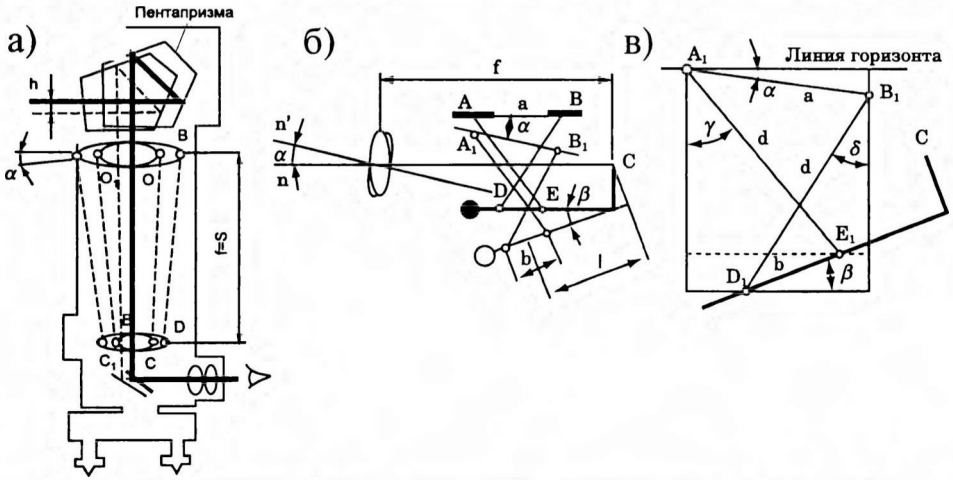


Рис. 3.2. Принципиальная схема компенсатора с подвешенной сеткой нитей:
а – вертикальная подвеска сетки; б – горизонтальная подвеска сетки; в – схема крестообразной подвески сетки нитей в наклоненном положении

оптический центр объектива перемещается в положение O_1 (пунктирное изображение), а центр подвешенной сетки нитей – в положение C_1. В силу малости угла наклона α и маятникового эффекта висящей сетки нитей, новое положение визирного луча O_1C_1 остается отвесным. Далее визирный луч опять поворачивается на 90° и выходит горизонтально, смещаясь лишь незначительно по высоте на величину h. В нивелире такого типа длина рычага подвески S равна фокусному расстоянию f объектива, поэтому условие компенсации имеет вид:

$$CC_1 = f\alpha = S\alpha, \qquad (3.4)$$

откуда, согласно (3.3), коэффициент компенсации K = 1. По этой схеме (подвешенная сетка нитей или подвешенный объектив) создано несколько типов нивелиров для точного и технического нивелирования. Нивелиры имеют необычный – перископический – вид.

На рис. 3.2, б изображена принципиальная схема нивелира с компенсатором в виде горизонтально подвешенной сетки нитей.

Сетка нитей с центром С укреплена на Г-образном рычаге DEC (сплошная линия) с противовесом и с помощью четырех накрест расположенных нитей (на рисунке показаны только две из них – AE и BD) подвешена в корпусе зрительной трубы в точках A и B. При горизонтальном положении визирного луча OC правильный отсчет по рейке составляет П. При наклоне зрительной трубы на угол α (предполагается, что труба наклонилась в вертикальной плоскости вокруг оптического центра объектива) сетка нитей обычного уровенного нивелира должна была бы переместиться в вертикальной плоскости на величину:

$$x = f\alpha. \qquad (3.5)$$

В рассматриваемом же случае подвешенная сетка нитей останется на месте за счет наклона Г-образного рычага на угол β, а визирный луч трубы OC останется горизонтальным, если будет соблюдено условие:

$$x = l\beta, \qquad (3.6)$$

здесь l – длина рычага от его средней точки (центра тяжести). Из уравнений (3.5) и (3.6) вытекает условие компенсации:

$$f/l = \beta/\alpha. \qquad (3.7)$$

Выразим угол β через элементы подвеса сетки нитей. На рис. 3.2, в представлена схема крестообразной подвески сетки нитей в наклоненном положении. Из рисунка получим:

$$a\sin\alpha + d\cos\delta - b\sin\beta - d\cos\gamma = 0, \qquad (3.8)$$

где a и b – соответственно расстояния между точками крепления нитей подвеса к корпусу трубы и между точками крепления нитей к рычагу (в направлении визирного луча); d – длина нитей подвеса.

Ввиду малости углов α и β (углы менее 30′) и приближенного равенства углов δ и γ получим соотношение $a\alpha \sim b\beta$, откуда

$$\beta \sim (a/b)\alpha, \quad (3.9)$$

$$f/l \sim a/b = K_м, \quad (3.10)$$

где $K_м$ – коэффициент механической компенсации. Таким образом, задаваясь величинами l, a и b, находят длину рычага l, при которой осуществляется компенсация наклона трубы нивелира. Коэффициент $K_м$ выгодно делать большим единицы, так как это будет способствовать повышению чувствительности компенсатора.

3.2. Точные и технические нивелиры

Для выполнения геометрического нивелирования применяются высокоточные, точные и технические нивелиры, выпускаемые различными фирмами (см. табл. 3.1 Приложения). Крупные зарубежные приборостроительные фирмы обычно выпускают модельный ряд нивелиров, предназначенных для решения любых инженерно-гео-дезических задач.

Созданные специально для инженерных и строительных работ нивелиры имеют небольшой вес для удобной транспортировки и полностью защищенную от воды зрительную трубу, что позволяет использовать их при любых погодных условиях. Газонаполненная конструкция зрительной трубы исключает образование конденсата на линзах.

В России для геометрического нивелирования в основном применяют нивелиры, выпущенные в соответствии с ГОСТ 10528-90.

Шифр каждого прибора состоит из буквенного обозначения Н – нивелир, цифры указывают значение допустимой средней квадратической ошибки измерения превышения на 1 км двойного хода в мм. Если нивелир снабжен компенсатором или лимбом, то в условное обозначение добавляется соответственно буква К и (или) Л. Пример условного обозначения нивелира с допустимой средней квадратической ошибкой измерения превышения на 1 км двойного хода 5 мм с компенсатором и лимбом: Н-5КЛ ГОСТ 10528.

Условное обозначение нивелирной рейки состоит из буквенного обозначения РН; цифрового обозначения группы нивелиров, для которых она предназначена (для высокоточных нивелиров – цифра 0,5, точных 3, технических 10), номинальной длины рейки и обозначения настоящего стандарта. В обозначении складных реек и (или) реек с прямым изображением оцифровки шкал после указания номинальной длины добавляются соответственно буквы С и (или) П. Пример условного обозначения нивелирной рейки к техническим нивелирам номинальной длиной 3000 мм, складной с прямой оцифровкой нивелирной шкалы: РН-10-3000СП ГОСТ 10528. Основные параметры нивелиров и нивелирных реек должны соответствовать указанным в табл. 3.2 и табл. 3.3.

Таблица 3.2

Основные параметры нивелиров (ГОСТ 10528-90)

Наименование параметра	Группа нивелиров		
	высокоточных	точных	технических
Допустимая средняя квадратическая погрешность измерения превышения на 1 км двойного хода:			
для нивелиров с компенсатором	0,3	2,0	5,0
для нивелиров с уровнем	0,5	3,0	–
Увеличение зрительной трубы, крат, не менее	40	30	20
Диаметр входного зрачка зрительной трубы, мм, не менее	48	37	24
Наименьшее рсстояние визирования, м, не более:			
без насадки	4,0	1,5	1,0
с насадкой на объектив	1,0	0,8	0,5
Коэффициент нитяного дальномера, крат	100 ± 1	100 ± 1	100 ± 1
Цена деления уровня при зрительной трубе, угл. сек. на 2 мм	10 ± /1	15 ± 1,5	–
Цена деления шкалы оптического микрометра, мм	0,05 ± 0,003	–	–
Масса, кг*	5,0	2,0	1,6

* При наличии компенсатора или горизонтального лимба массу нивелира допускается увеличивать на 15 %.

Точные нивелиры предназначены для определения превышений со средней квадратической ошибкой не более 3 мм на 1 км двойного хода.

Наибольшую точность нивелирования из отечественных приборов обеспечивает нивелир Н-05 (рис. 3.3), который предназначен для нивелирования I и II классов в государственных сетях, на геодинамических полигонах, при инженерно-геодезических работах.

Таблица 3.3

Основные параметры и размеры нивелирных реек (ГОСТ 10528-90)

Наименование параметра	Рейки к нивелирам групп		
Номинальная длина шкалы рейки, мм	3000 1200	3000 1500*	4000
Длина интервала шкалы, мм	5	10	–
Допустимое отклонение, мм:			
длины деления шкалы	± 0,05	± 0,20	± 0,50
метрового интервала	± 0,10	± 0,30	± 1,00

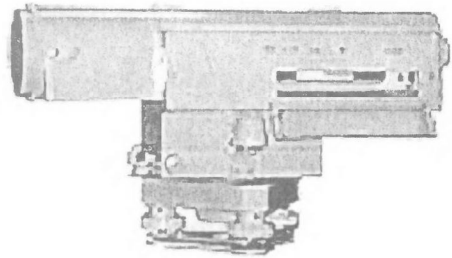


Рис. 3.3. Нивелир Н-05

Прибор может эксплуатироваться при температуре от –30 до +50 °С. Средняя квадратическая ошибка суммы превышений на 1 км двойного хода не должна превышать 0,5 мм. Такая высокая точность обеспечивается благодаря использованию точного контактного уровня с ценой деления 10″ и порогом чувствительности 0,2″, ахроматической зрительной трубы с увеличением 42х и оптического микрометра с ценой деления 0,05 мм.

Нивелир состоит из двух основных частей: неподвижной нижней и верхней, имеющей возможность вращаться относительно нижней на 360° и наклоняться в вертикальной плоскости на ±10′.

Нижняя часть представляет собой трегер с тремя подъемными винтами и укрепленной на них пружинящей пластиной с втулкой, имеющей резьбу под становой винт, служащий для закрепления нивелира на штативе.

В подставке закреплена вертикальная ось вращения нивелира со втулкой, жестко связанной с верхней частью нивелира. В верхней части расположены зрительная труба, имеющая внутреннюю фокусировку, контактный уровень при трубе с призменной системой, укрепленный на корпусе зрительной трубы, система наклона зрительной трубы в вертикальной плоскости, установочный круглый уровень, связанный со втулкой вертикальной оси вращения нивелира, механизм наклона плоскопараллельной пластинки с отсчетной шкалой, наводящий винт и оптический клин в оправе, являющийся одновременно защитным стеклом зрительной трубы.

Исправительные винты уровня при трубе закрыты крышкой. С помощью исправительных винтов посадку цилиндрического уровня на инструменте можно изменять, добиваясь параллельности оси уровня визирной оси зрительной трубы.

Оптическая схема нивелира показана на рис. 3.4. Визирный луч проходит съемную насадку 1, которая используется при визировании на 1 м, корректирующий клин 2 для юстировки угла i, плоскопараллельную пластинку 3, объектив 4, фокусирующую линзу 5. Через окуляр 9 рассматривается изображение рейки, которое создается телеобъективом в плоскости сетки нитей 8. В поле зрения зрительной трубы нивелира видны: перекрестье с двумя дальномерными штрихами, горизонтальный биссектор и два окна: нижнее и боковое (рис. 3.5). В боковое окно рассматривается изображение концов пузырька цилиндрического уровня и шкалы, расположенной на уровне, которое передается лучами от зеркала 14 через защитное стекло 15 и призм 16, 18, 12, 10 и микрообъектив 11 в плоскость сетки нитей 8. В нижнее окно также передается

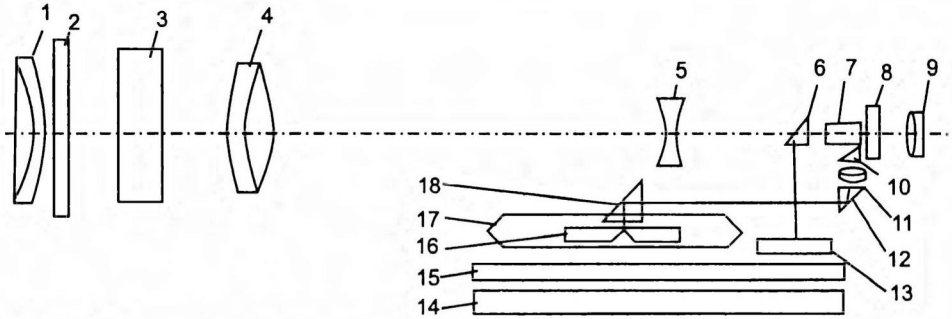


Рис. 3.4. Оптическая схема нивелира Н-05

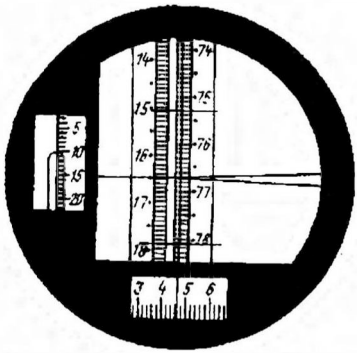


Рис. 3.5. Поле зрения трубы нивелира Н-05

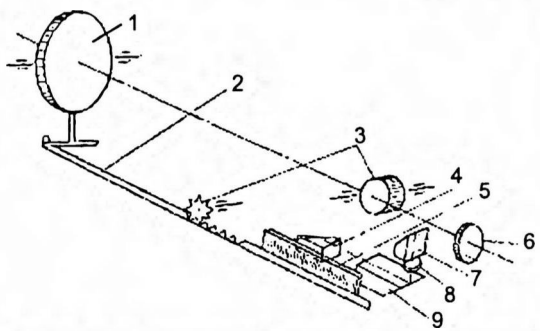


Рис. 3.6. Схема устройства оптического микрометра и передача изображения шкалы
1 – плоскопараллельная пластинка; 2 – тяга; 3 – механизм перемещения тяги; 4, 7, 9 – призмы; 5 – шкала оптического микрометра, закрепленная на тяге; 6 – сетка нитей; 8 – микрообъектив; 9 – сетка нитей

оптическими элементами 6 и 7 изображение отсчетной шкалы 13 оптического микрометра (в плоскости сетки нитей 8). На рис. 3.6 показана схема устройства оптического микрометра и передача изображения отсчетной шкалы.

Поворачивая барабан механизма 3, осуществляют перемещение тяги 2, с помощью которой осуществляют наклон плоскопараллельной пластинки 1. Величина угла наклона может достигать 17°17′.

Вместе с тягой 2 перемещается шкала 5, изображение которой передается через систему призм 4, 7 и 9 и микрообъектив 9 в плоскость сетки нитей 6. Таким образом, в поле зрения трубы нивелира Н-05 передается изображение рейки, концов пузырька цилиндрического уровня с делениями ампулы (боковое окно) и шкалы оптического микрометра (нижнее окно), где отсчет производится по неподвижному индексу.

В настоящее время из точных нивелиров широко используется в производстве нивелир 3Н-3КЛ, а из технических — 3Н-5Л. Основные технические характеристики

отечественных нивелиров, выпускаемых Уральским оптико-механическим заводом, приведены в табл. 3.4.

Нивелир 3Н-3КЛ по ГОСТ 10528-90 (рис. 3.7, а) – точный, с самоустанавливающейся линией визирования, предназначенный для нивелирования III, IV классов и технического, а также для инженерно-геодезических работ при изысканиях и строительстве зданий и сооружений.

Нивелир 3Н-3КЛ позволяет выполнять геометрическое нивелирование со средней квадратической ошибкой 3 мм на 1 км двойного хода (см. табл. 3.4).

Таблица 3.4

Технические характеристики нивелиров, выпускаемых УОМЗ (Россия)

Технические параметры	Н-05	3Н-3КЛ	3Н-5Л
Средняя квадратическая погрешность измерения превышения на 1 км двойного хода, мм	0,5	3	5
Увеличение зрительной трубы, крат	42	22	20
Наименьшее расстояние визирования, м	1,5	1,2	0,5
Диапазон работы компенсатора	–	15′	–
Масса, кг	3,5	1,3	3 (с футляром)

При выполнении наблюдений нивелир 3Н-3КЛ устанавливают в рабочее положение подъемными винтами, по круглому уровню, наблюдая за положением его пузырька. Подъемные винты нивелира имеют укруп-ненный шаг резьбы, что позволяет приводить его в рабочее положение с минимальной затратой времени.

Нивелир 3Н-3КЛ не имеет закрепительного винта. При грубом наведении трубы на рейку она достаточно легко вращается рукой и надежно фиксируется в нужном направлении. Изготовление цилиндрической оси и втулки из одного и того же металла исключило заклинивание оси при низких температурах.

Точное наведение трубы нивелира на рейку выполняют вращением одной из двух головок винта наводящего устройства бесконечной наводки, расположенных с обеих сторон инструмента и позволяющих выполнять наведение как правой, так и левой рукой.

Зрительная труба нивелира 3Н-3КЛ – с внутренней фокусировкой. Компенсатор нивелира – призменный, оптико-механического типа. Элементарная теория компенсатора может быть представлена так. Пусть отрезок ОК (рис. 3.7, б) визирного луча совпадает с направлением главного горизонтального луча. При этом отражающие грани призм подвижной 1 и неподвижной 2 располагаются под углом 45° к главному горизонтальному лучу и центру С сетки нитей соответствует правильный отсчет П по нивелирной рейке.

При наклоне зрительной трубы под углом (предполагается, что она наклоняется вокруг оптического центра объектива О) центр сетки



а)

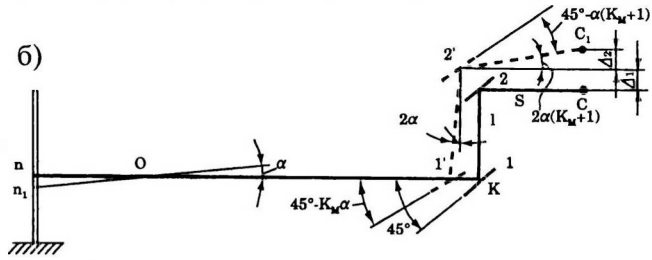


Рис. 3.7. Нивелир 3Н-КЛ

а) внешний вид нивелира 3Н-3КЛ

б) принципиальная схема работы компенсатора нивелира 3Н-3КЛ: ход лучей при горизонтальном и наклонном положении зрительной трубы нивелира

нитей смещается в положение C_1, и при отсутствии компенсации по рейке был бы взят ошибочный отсчет $П_1$. Перемещение центра сетки нитей составляет отрезок

$$CC_1 = f\alpha,$$

где f – эквивалентное фокусное расстояние объектива. Для компенсации возникающей ошибки нужно, чтобы изображение правильного отсчета П переместилось на отрезок CC_1, в новое положение центра сетки нитей C_1. При наклоне трубы на угол α отражающая грань призмы 1 наклонится на угол $K_м\alpha$ и займет положение 1′. Отражающая грань призмы 2 наклонится на угол в направлении, противоположном наклону призмы 1, и займет положение 2′. Полагая, что из-за малости угла наклона изменение расстояний l и S мало, можно принять, что смещение центра сетки нитей по вертикали есть

$$\Delta_1 = 2lK_м\alpha, \qquad (3.11)$$

где l – расстояние по лучу между отражающими гранями призм 1 и 2; $2K_м\alpha$ – угол между отвесной линией и визирным лучом на участке между призмами 1 и 2 при наклонном положении нивелира. Соответственно смещение Δ_2 есть:

$$\Delta_2 = 2S\alpha(K_м + 1), \qquad (3.12)$$

где S – расстояние по лучу между отражающей гранью призмы 2 и сеткой нитей. Для компенсации необходимо выполнение условия:

$$CC_1 = \Delta_1 + \Delta_2 \qquad (3.13)$$

или

$$f\alpha = 2lK_м\alpha + 2S\alpha(K_м + 1), \qquad (3.14)$$

откуда

$$K_м = (f - 2S)/[2(l + S)]. \qquad (3.15)$$

Далее, задаваясь параметрами f, S и l, находят геометрические размеры подвески по формуле (3.10).

Для предохранения от обрыва нитей подвески компенсатора последний снабжен ограничителем. Высокое качество изображения, создаваемое зрительной трубой нивелира, малая зависимость положения линии визирования от температурных воздействий, быстрое и надежное демпфирование обеспечивают необходимую точность измерений и значительное повышение производительности труда.

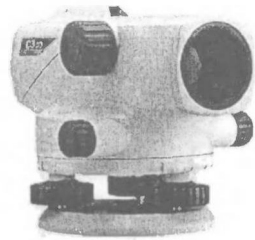


Рис. 3.8. Внешний вид точного нивелира B20 фирмы Sokkia (Япония)

Крупнейшие зарубежные приборостроительные фирмы (например Sokkia) обычно выпускают целый модельный ряд высокоточных и точных нивелиров, которые являются самоустанавливающимися и выполнены в брызгозащитном корпусе (рис. 3.8). Приборы этой фирмы отличаются высокой надежностью, и большинство из них имеет гарантию 25 лет! Технические характеристики этих приборов приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Технические характеристики высокоточных и точных нивелиров, выпускаемых фирмой Sokkia (Япония)

	B1	B1C	B20	B21	C300	C310	C320	C330	C410
Средняя квадратическая погрешность измерения превышения на 1 км двойного хода:					2	2	2	2	2,5
без микрометренной насадки, мм	0,8	0,8	1,0	1,5					
с микрометромнасадкой, мм	0,5	0,5	0,8	1,2					
Увеличение, х	32	32	32	30	26	26	24	22	20
Рабочий диапазон работы компенсатора, угл. мин.	±10	±10	±15	±15	±15	±15	±15	±15	±12
Вес, кг	3,0	3,2	1,85	1,85	1,83	1,83	1,80	1,80	0
Размер, мм	270x 144x 163		130x 215x 135		133x215x135				190x 122x 115
Гарантийный срок	25 лет								5 лет

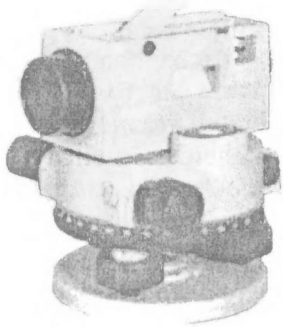


Рис. 3.9. Нивелир 3Н-5Л

Наиболее дешевыми и простыми являются технические нивелиры. УОМЗ выпускает технический нивелир 3Н-5Л, который используется в основном для обеспечения строительных работ (рис. 3.9).

Нивелир 3Н-5Л по ГОСТ 10528-90 – малогабаритный технический, снабжен лимбом для измерения горизонтальных углов. Нивелир обеспечивает выполнение геометрического нивелирования со средней квадратической ошибкой не более 5 мм на 1 км двойного нивелирного хода. Основные технические данные нивелира 3Н-5Л приведены в табл. 3.4.

У этого нивелира зрительная труба и контактный цилиндрический уровень скреплены между собой и имеют общий корпус, который поворачивается вокруг вертикальной оси. После грубой наводки на рейку уточняют наведение с помощью винта наводящего устройства. Элевационным винтом зрительную трубу вместе с цилиндрическим уровнем можно наклонять в небольших пределах в вертикальной плоскости. С помощью юстировочных винтов, крепящих торцевую оправу цилиндрического уровня, можно изменять его посадку на инструменте, добиваясь параллельности оси уровня визирной оси зрительной трубы.

Приведение нивелира в рабочее положение (установку оси вращения нивелира в отвесное положение) выполняют подъемными винтами по круглому уровню. Перед отсчетом по рейке наблюдатель, глядя в окуляр зрительной трубы, следит за положением пузырька цилиндрического уровня и вращением элевационного винта выводит пузырек в нуль-пункт, т.е. приводит в контакт изображения половинок противоположных концов пузырька в поле зрения окуляра (рис. 3.10).

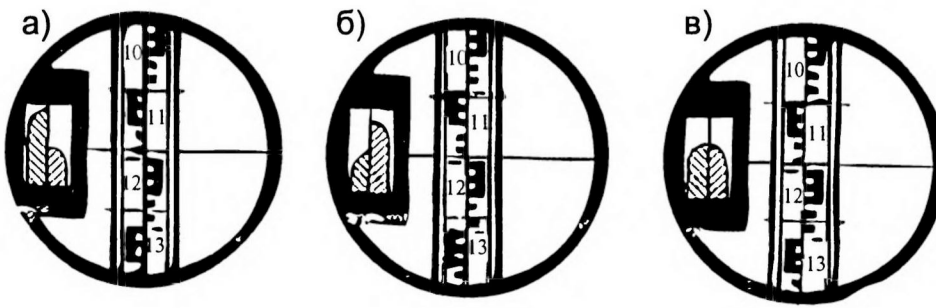


Рис. 3.10. Поле зрения окуляра зрительной трубы нивелира 3Н5Л
а, б – изображение концов пузырька уровня не совпадает; в – изображение концов пузырька уровня совпадает

Поверки и юстировки нивелиров

У самоустанавливающихся нивелиров в лабораторных условиях на специальном оборудовании исследуют диапазон действия компенсатора, точность самоустановки линии визирования в горизонтальное положение и другие технические характеристики. Необходимость эпизодического (раз в год в начале полевого сезона) выполнения этих исследований связана с «вековым старением» деталей компенсатора, изменением длины и упругости нитей подвеса, смещением центра тяжести подвешенного элемента из-за проникновения и оседания пыли, влаги и т. п.

Нивелирам с компенсаторами присущи незначительные систематические ошибки, обусловленные невыполнением главного условия – горизонтальности луча визирования. Но и после выполнения главного условия имеют место его нарушения при наклонном положении оси вращения нивелира. Эта ошибка, называемая недо- или перекомпенсацией, в общем случае несимметрична относительно наклона нивелира вперед и назад или влево и вправо. Так как установка нивелира на станции в рабочее положение производится по круглому уровню, ось которого из-за малой установочной базы (расстояния между юстировочными винтами) при тряске и вследствие других причин изменяет свое положение, то одно из основных условий исключения заметных систематических ошибок – ежедневное независимое приведение оси круглого уровня в положение, параллельное оси вращения нивелира. В процессе работ, особенно при проложении ходов, пузырек круглого уровня следует приводить в нуль-пункт возможно точнее. Далее рассматриваются поверки, выполняемые в полевых (эксплуатационных) условиях. Под поверками подразумевают комплекс действий, контролирующих выполнение условий, которым должен удовлетворять прибор для геометрического нивелирования. При поверках уровенных нивелиров контролируют соблюдение в основном геометрических условий, которым должно удовлетворять взаимное положение основных осей прибора. Работая же с самоустанавливающимися нивелирами, дополнительно делают поверки, контролирующие работу компенсатора. Поверки производят в определенной последовательности: юстировка прибора, выполняемая после каждой очередной поверки, делает возможным провести следующую поверку.

1. Ось круглого (установочного) уровня должна быть параллельна оси вращения нивелира. Тремя подъемными винтами пузырек круглого уровня приводят в нуль-пункт. Прицелившись поверх трубы и заметив на ее продолжении неподвижную точку какого-нибудь предмета, верхнюю часть нивелира поворачивают вокруг его оси на 180°. Если при этом пузырек останется в центре окружности на ампуле уровня, то условие соблюдено. При смещении пузырька более чем на 1/4 де-

ления производят юстировку: действуя юстировочными винтами уровня, смещают пузырек в сторону нуль-пункта на половину дуги отклонения. С помощью подъемных винтов пузырек доводят до нуль-пункта (перемещая на вторую половину дуги отклонения) и вновь поворачивают трубу на 180°, т. е. повторяют поверку. Обычно поверку и юстировку повторяют два-три раза до выполнения условия с точностью до 0,1–0,2 деления. Тщательность этой юстировки особенно необходима для нивелиров с компенсаторами.

2. Сетка нитей должна быть установлена без перекоса, т.е. горизонтальная нить сетки нитей должна быть перпендикулярна оси вращения нивелира. Один из способов (простой и надежный) поверки соблюдения этого условия состоит в следующем. Вращением трех подъемных винтов нивелир по уже отъюстированному круглому уровню приводят в рабочее положение (ось вращения нивелира – в отвесное) и на краю поля зрения трубы замечают какую-либо неподвижную точку, изображение М которой попало на среднюю горизонтальную нить сетки (рис. 3.11). Плавно вращают трубу в горизонтальной плоскости. Если при этом нить сетки не сходит с изображения точки (точка М скользит по горизонтальной нити), поверяемое условие соблюдено. При выявлении перекоса сетки нитей исправление у различных нивелиров выполняют по-разному в зависимости от конструктивных особенностей. У ряда нивелиров сетку нитей поворачивают за счет эллиптичности отверстий для винтов, крепящих оправу сетки в корпусе трубы.

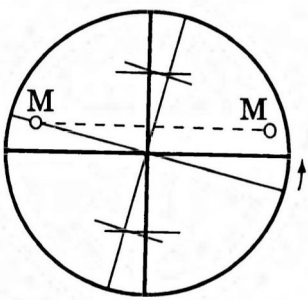


Рис. 3.11. Поверка перекоса сетки нитей

Для некоторых нивелиров юстировку производят без снятия окуляра: снимают только предохранительный колпачок и, ослабив крепежные винты окуляра, поворачивают его вместе с сеткой нитей до нужного положения.

Например, при выполнении этой поверки для высокоточного нивелира Н-05 предлагают использовать отвес, по нити которого контролируют положение вертикальной нити сетки нитей. Если положение вертикальной нити не отвесно, то необходимо отвинтить три стопорных винта на крышке со стороны окуляра и снять ее. Затем необходимо отвернуть три винта, которыми окулярное устройство прикреплено к тубусу зрительной трубы, и снять эту часть с трубы. Чтобы повернуть слегка оправу с сеткой, необходимо отпустить отверткой правый и левый винты на оправе сетки, имеющие вид сектора, на целый оборот, а средний – приблизительно на четверть оборота. После этого необходимо надеть окулярное устройство на тубус и провернуть положение вертикального штриха сетки относительно нити отвеса.

Следует иметь в виду, что в заводских условиях эта поверка выполняется очень тщательно, и правильность установки сетки нитей обычно гарантируется заводом-изготовителем. Поэтому к выполнению юстировки сетки следует прибегать лишь в случаях действительной необходимости, так как точная установка сетки является весьма трудоемкой операцией.

3. Компенсатор самоустанавливающегося нивелира должен быть исправен. Приведя нивелир в рабочее положение по круглому уровню и взяв отсчет по рейке, установленной в 40–50 м от инструмента, поворачивают один из подъемных винтов, расположенный в направлении наблюдаемой рейки. Этот поворот винта, придающий наклон нивелиру, должен быть по возможности резким, но небольшим (пузырек круглого уровня должен остаться внутри большой окружности, награвированной на стеклянной стенке ампулы). Изменение отсчета в первый момент, легкое дрожание сетки нитей и затем восстановление первоначального отсчета (в течение 1–2 с) свидетельствуют о нормальной работе компенсатора. В случае обнаружения его неисправности нивелир следует сдать в мастерскую по ремонту геодезических инструментов.

4. Компенсация углов наклона оси вращения самоустанавливающегося нивелира должна быть полной. Эту поверку, при которой выявляется недо- или перекомпенсация, выполняют измерением превышения способом «из середины». Целесообразно выбирать линию с небольшим превышением, менее 1 м. На концах нивелируемой линии забивают колья с ровно спиленными торцами или металлические костыли и ставят на них рейки. Нивелир устанавливают в створе линии на равных расстояниях от реек (допускается неравенство плеч не более 1 м) и выполняют наблюдения пятью сериями.

В каждой серии определяют превышение по одной стороне рейки при отвесном положении оси вращения нивелира (пузырек круглого уровня – в нуль-пункте) и при наклонах трубы вперед, назад, вправо и влево на предельный угол компенсации; при этом руководствуются положением пузырька уровня (рис. 3.12), учитывая цену деления последнего. Начиная очередную новую серию, изменяют высоту нивелира.

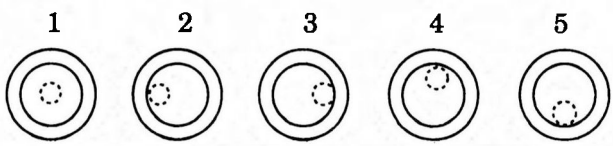


Рис. 3.12. Положение пузырька круглого уровня при выявлении недо- и перекомпенсации

Нивелиры, которые будут использоваться для нивелирования III класса, должны поверяться при длине визирного луча 50 и 100 м. Нивелиры, используемые только для нивелирования IV класса и

технического, достаточно поверить на одной линии длиной 200 м при расстояниях до реек по 100 м.

Из всех серий вычисляют средние значения превышения, полученные при положениях пузырька круглого уровня 1, 2, 3, 4, 5. По отклонениям средних значений превышения h, найденных при наклонах зрительной трубы на угол $\Delta\alpha$ от среднего значения h_0, полученного нивелированием при отвесном положении оси вращения нивелира, можно вычислить систематическую ошибку компенсации на 1′ наклона оси вращения нивелира:

$$\Delta_\alpha = (h_\alpha - h_0)\,\rho''/2l\alpha,$$

где $\rho'' = 206265''$ – радиан в секундах; l – длина визирного луча, мм; α – угол наклона оси вращения нивелира, мин. Из наблюдений при четырех различных наклонах трубы вычисляют среднее по абсолютной величине значение систематической ошибки компенсации, которое согласно ГОСТ 10528-90 не должно превышать 0,3″ на одну минуту наклона оси вращения нивелира типа 3Н-3КЛ и 0,5″ – для технических нивелиров.

В табл. 3.6 дан пример вычисления среднего значения ошибки компенсации для нивелира 3Н-3КЛ при продольных и поперечных наклонах зрительной трубы в пределах ±15′ (диапазон работы компенсатора).

Практически средние значения превышения, полученные при положениях пузырька круглого уровня 2, 3, 4 и 5, не должны отличаться от среднего значения превышения, найденного при положении 1, больше чем на 3 мм при нивелировании III класса и на 5 мм при нивелировании IV класса и техническом. Например, при продольном наклоне +10″ получили значение превышения +1,271 м, при продольном наклоне −10′ – значение +1,279 м, при положении пузырька уровня в нульпункте превышение равно +1,275 м.

Таблица 3.6

l, м	Измеренное превышение, мм					Ошибка компенсации			
	h_0	h_α				продольный наклон		поперечный наклон	
		продольный наклон		поперечный наклон					
		вперед	назад	лево	право	вперед	назад	лево	право
50	−1030,5	−1031,8	−1029,5	−1029,3	−1031,3	−0,18″	+0,14″	+0,16″	+0,11″
	$h_\alpha - h_0$	−1,3	+1,0	+1,2	−0,8				

$$\Delta\alpha''_{ср} = \Sigma|\Delta\alpha''|/4 = 0{,}15''.$$

Такой нивелир нельзя использовать при нивелировании III класса, но можно применять при нивелировании IV класса и техническом. При поверке другого нивелира были получены, соответственно, следующие значения превышения; −1,710 м, −1,724 м и −1,716 м. Этот нивелир нельзя применять не только для нивелирования III класса, но и для

нивелирования IV класса и даже технического нивелирования; он должен быть направлен в мастерскую для юстировки компенсатора. Описанную поверку делают раз в несколько месяцев. Следует иметь ввиду, что всякая попытка юстировки компенсатора в поле приведет только к дальнейшему ухудшению работы нивелира.

5. При работе на станции визирный луч нивелира должен быть горизонтален, т.е. угол i (рис. 3.13) должен быть равен нулю или не должен превышать 10″. Это главное условие нивелиров. У нивелиров с цилиндрическими уровнями для его соблюдения необходимо, чтобы ось цилиндрического уровня была параллельна визирной оси зрительной трубы (для уровенных нивелиров главное условие обычно так и формулируют).

При выполнении этой поверки могут быть применены различные способы. Однако для самоустанавливающихся нивелиров, особенно с перископической зрительной трубой, целесообразно применять способы, исключающие необходимость измерения высоты инструмента, так как обычно рекомендуемый способ измерения высоты по рейке, прислоненной к окуляру и рассматриваемой через объектив, для нивелиров с ломаными трубами неприменим.

При нивелировании III, IV классов и техническом угол I, как правило, не вычисляют, ограничиваясь нахождением линейной величины ошибки x из-за несоблюдения в нивелире главного условия.

Рекомендуемый нами способ поверки состоит в двойном нивелировании линии длиной l = 50–75 м (рис. 3.13), на концах A и B которой забивают металлические костыли или деревянные колья с вбитыми в торец гвоздями и ставят на них нивелирные рейки. На станции 1 нивелир устанавливают в створе линии на равных расстояниях l_1 от реек и, приведя нивелир в рабочее положение, берут отсчеты a_1 по задней и b_1 по передней рейкам. Полученные на станции 1 отсчеты a_1 и b_1 будут отличаться от правильных $a_1^{пр}$ и $b_1^{пр}$ на одну и ту же погрешность d_1, так как угол i между визирным лучом и линией горизонта постоянен, а расстояния от нивелира до реек равны. Следовательно, значение превышения, найденное из наблюдений на станции 1, будет правильным:

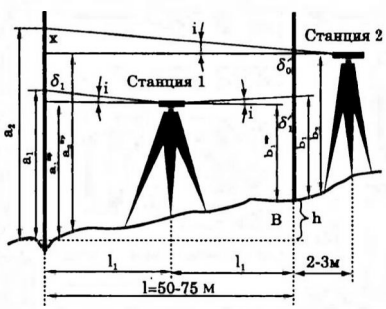


Рис. 3.13. Поверка главного условия нивелиров

$$h = a_1 - b_1 = (a_1^{пр} + \delta_1) - (b_1^{пр} + \delta_1) = a_1^{пр} - b_1^{пр}. \qquad (3.16)$$

На станции 2 нивелир устанавливают за передней рейкой на наименьшем расстоянии визирования (2-3 м) и берут отсчеты a_2 по

дальней и b_2 по ближней рейкам. Отсчет b_2 по ближней рейке считают практически безошибочным, так как ошибкой δ_0 можно пренебречь по малости расстояния от нивелира до рейки. Это позволяет предвычислить правильный отсчет:

$$a_2^{пр} = b_2 + h, \qquad (3.17)$$

по дальней рейке, соответствующий горизонтальному положению визирного луча, и сравнить с ним фактически произведенный отсчет. Ошибка, вызываемая несоблюдением главного условия нивелира

$$x = a_2 - a_2^{пр}, \qquad (3.18)$$

не должна превышать по абсолютной величине 4 мм. При необходимости можно вычислить и угловую величину ошибки:

$$i = (x/l)\rho.$$

В случае несоблюдения главного условия у нивелира 3Н-5Л с цилиндрическим уровнем юстировку главного условия выполняют за счет изменения посадки этого уровня на инструменте. Вращая элевационный винт, устанавливают среднюю горизонтальную нить сетки на предвычисленный отсчет $a_2^{пр}$; при этом пузырек цилиндрического уровня сойдет с нуль-пункта, оптический контакт изображений половинок концов пузырька нарушится. Ослабив с помощью шпильки боковые юстировочные винты цилиндрического уровня, находящиеся под крышкой в торцовой части коробки уровня, вертикальные вращают в противоположные стороны, добиваясь контакта изображений половинок концов пузырька и следя за тем, чтобы отсчет по рейке оставался равным $a_2^{пр}$. После этого боковые юстировочные винты затягивают до упора.

У нивелира 3Н-3КЛ с компенсатором при юстировке вращают юстировочные винты сетки нитей, смещая среднюю горизонтальную нить сетки на отсчет $a_2^{пр}$. Для контроля поверку обязательно повторяют.

Пример V.I. На станции 1 $a_1 = 1065$ мм, $b_1 = 0\ 843$ мм, откуда $h = a_1 - b_1 = 1065 - 0843 = +0222$ мм. На станции 2 $a_2 = 1307$ мм, $b_2 = 1067$ мм и $a_2^{пр} = b_2 + h = 1067 + 0222 = 1289$ мм. Тогда

$$x = a_2 - a_2^{пр} = 1307 - 1289 + 18 \text{ мм} > 4 \text{ мм}.$$

Поскольку x оказался более 4 мм, среднюю горизонтальную нить сетки надо установить (у нивелира 3Н-5Л – элевационным винтом; у нивелиров 3Н-3КЛ – на предвычисленный отсчет $a_2^{пр} = 1289$ мм. При этом пузырек уровня сойдет с нуль-пункта, оптический контакт изображений половинок концов пузырька уровня нарушится. Ослабив с помощью шпильки боковые юстировочные винты цилиндрического уровня, вертикальные юстировочные винты вращают в противоположные стороны, добиваясь контакта изображений половинок концов пузырька и следя за тем, чтобы отсчет по рейке оставался равным $a_2^{пр}$. После этого

боковые юстировочные винты затягивают до упора и делают контрольное определение величины x. Для нивелира H-05 исправление осуществляют, если угол i больше 10″.

3.3. Цифровые и лазерные нивелиры

В настоящее время наибольшая степень автоматизации геометрического нивелирования достигается при использовании цифровых нивелиров, которые выпускаются только зарубежными фирмами.

Эти приборы являются пассивными. В качестве приемного устройства в них использована ПЗС-матрица (прибор с зарядовой связью (см. 1.5)), устанавливаемая в плоскости изображений, создаваемых зрительной трубой цифрового нивелира. В качестве примера на рис. 3.14 представлена оптическая схема цифрового нивелира DINI, выпускаемого фирмой Trimble (США), а на рис. 3.15 – внешний вид этого прибора.

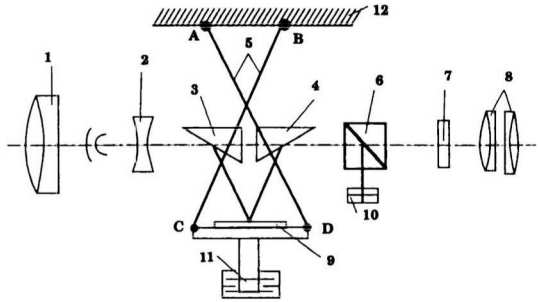


Рис. 3.14. Оптическая схема цифрового нивелира DINI:
1 – объектив; 2 – фокусирующая линза; 3, 4 – призмы; 5 – нити; 6 – куб-призма; 7 – сетка нитей; 8 – окуляр; 9 – зеркало-компенсатор; 10 – сенсорный приемник излучения; 11 – воздушный демпфер; 12 – корпус трубы; A, B, C, D – точки закрепления нитей

С помощью ПЗС-матрицы 10 распознается кодовая маска на нивелирной рейке, изображение которой получают с помощью объектива 1 в плоскости сетки нитей 7 и в плоскости чувствительной поверхности ПЗС-матрицы [157, 158]. В отличие от традиционных оптических нивелиров, при работе с цифровым нивелиром отсчет производится автоматически и вносится в память прибора. С помощью цифрового нивелира можно автоматически осуществлять отсчеты по нивелирной рейке, определять расстояния до реки и вычислять пре-

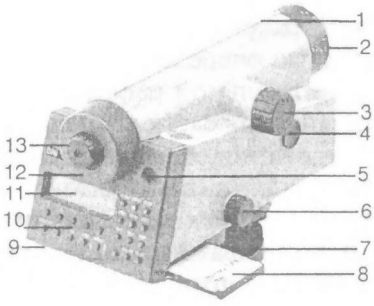


Рис. 3.15. Внешний вид цифрового нивелира DINI, выпускаемого фирмой Trimble (США)
1 – визир; 2 – объектив; 3 – кремальера; 4 – клавиша пуска измерений; 5 – окно круглого уровня; 6 – наводящие винты; 7 – подставка; 8 – карта памяти; 9 – интерфейсный порт; 10 – клавиатура; 11 – дисплей; 12 – крышка окуляра; 13 – окуляр

вышения между нивелируемыми точками. Например, цифровые нивелиры фирмы Trimble (США) позволяют выполнять нивелирование с высокой точностью (0,4 мм/1,0 мм на 1 км двойного хода) и сохранять данные измерений во внутренней памяти или на карте памяти через стандартный разъем PCMCIA. Внутренняя память рассчитана на хранение измерений 8000 точек. Данные нивелирных ходов могут быть уравнены по методу наименьших квадратов программным обеспечением. Уникальные возможности цифровых нивелиров обеспечивают возможность увеличить производительность на 50% по сравнению с традиционными оптико-механическими приборами, а также достигнуть наивысшего уровня точности измерений, что позволяет их использовать для выполнения нивелирных работ всех классов и слежения за деформациями.

Аналогичные технические характеристики имеют цифровые нивелиры и других фирм (Sokkia, Topcon и др.). Все цифровые нивелиры являются самоустанавливающимися и высокоточными (см. табл. 3.7 Приложения), поэтому для нивелирования обычно используются инварные рейки, для менее точных работ фиберглассовые, имеющие несколько больший температурный коэффициент расширения, и поэтому менее точные. На эти рейки наносится кодовая маска, по которой автоматически считываются отсчеты в процессе нивелирования. Все фирмы выпускают рейки к кодовым нивелирам, которые не могут быть использованы для визуального отсчета.

Как правило, цифровые нивелиры используются при выполнении высокоточных геодезических работ. Особенно эффективно их использование при измерении деформаций сооружений и исследовании движений земной коры, вызванных как естественными причинами, так и техногенными факторами.

Современные цифровые нивелиры позволяют значительно повысить производительность при выполнении нивелирования, однако диапазон измеряемых превышений и скорость выполнения работ во многом диктуются используемым методом измерений, т.е. геометрическим нивелированием.

Поэтому интерес исследователей всегда вызывал метод тригонометрического нивелирования, позволяющий определять превышения между точками, удаленными на значительные расстояния. При этом ограничения по дальности обусловлены в первую очередь снижением точности из-за влияния внешних условий (вертикальной рефракции). Значительный объем исследований, связанных с повышением эффективности тригонометрического нивелирования, был выполнен Львовской школой геодезистов [148].

Скорость нивелирования и диапазон измеряемых превышений могут быть во много раз повышены, если использовать принцип измерений, основанный на сканировании лазерным пучком в верти-

кальной плоскости с угловой скоростью, закон изменения которой известен (рис. 3.16). При этом в плоскости развертки вдоль нивелируемой трассы перемещалась вертикальная рейка с двумя отражателями. Вертикальный угол на каждый отражатель определялся по временному интервалу между импульсами:между опорным импульсом и импульсом от соответствующего отражателя, т.е. так же, как при измерении углов сканирующим устройством (см. § 2.3). Так как частота сканирования может составлять сотни Гц и более, то скорость передвижения отражателя вдоль трассы практически не ограничена.

Для проверки этого метода нивелирования была использована лазерная контрольно-измерительная система (ЛКИС) (рис. 3.17) [111]. Частота сканирования составляла 100 Гц. В момент измерений определяли углы наклона на оба отражателя, затем вычислялось расстояние по известному базису между отражателями и измеряемому параллактическому углу. Как показали испытания, точность определения отметок точек на участке до 500 м характеризуется средней квадратической ошибкой порядка 10 см.

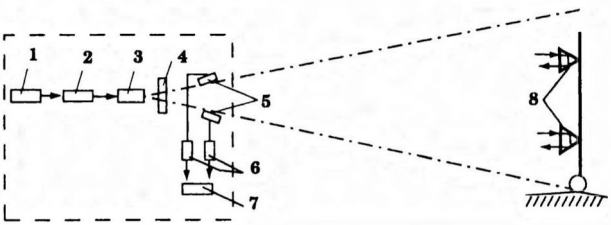


Рис. 3.16. Структурная схема сканирующего лазерного профилографа:
1 – лазер; 2 – оптическая система; 3 – сканирующий узел; 4 – цилиндрическая линза; 5 – фотоприемники; 6 – усилители; 7 – блок обработки; 8 – отражатели, установленные на рейке

В последние годы для определения отметок точек при инженерно-геодезических работах в промышленном и гражданском строительстве все больше начинают применять лазерные нивелиры. В отличие от обычных нивелиров, применяемых для определения отметок точек путем прокладки нивелирных ходов, лазерные нивелиры для подобных целей практически не применяются. Они несколько дороже обычных и требуют источников питания для ла-

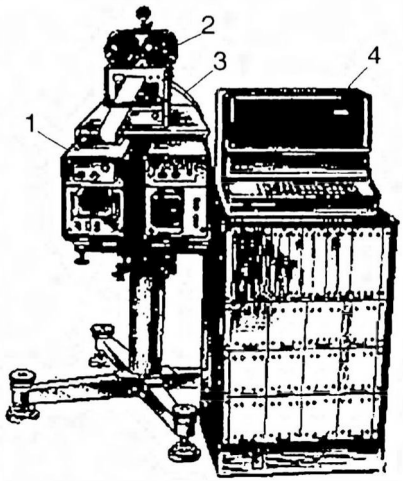


Рис. 3.17. Внешний вид лазерной контрольно-измерительной системы (ЛКИС)
1 – передатчик; 2 – приемник; 3 – цифропечатающее устройство; 4 – компьютер

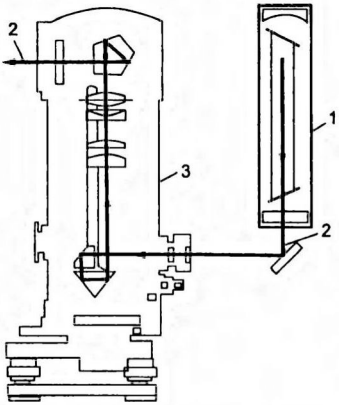


Рис. 3.18. Оптическая схема нивелира Ni-007 с лазерной насадкой

1 – гелиево-неоновый лазер; 2 – пучок лазерного излучения; 3 – нивелир Ni-007

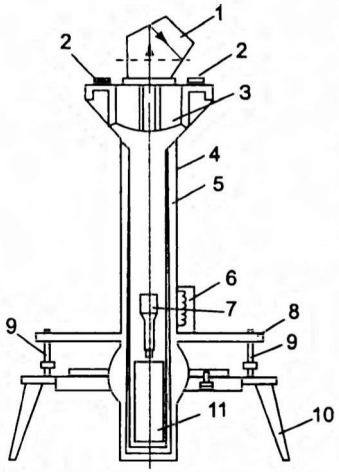


Рис. 3.19. Лазерный нивелир для задания световой плоскости:

1 – пентапризма; 2 – цилиндрические уровни; 3 – электродвигатель с полым валом; 4 – корпус прибора; 5 – полая обойма; 6 – трипка, с помощью которой можно изменять высоту световой плоскости; 7 – коллиматор; 8 – трегер; 9 – подъемные винты горизонтирующего устройства; 10 – головка штатива; 11 – лазер

зера и фоторегистрирующего устройства, а также соблюдения дополнительных мер по технике безопасности при работе с ними (см. 1.8). По этим причинам их в основном используют при выполнении строительно-монтажных работ внутри зданий, для задания опорной плоскости при укладке полов, установке и выравнивании стен и перегородок, контроле отметок фундамента здания, установке бетонных блоков или для нивелирования площадей, вертикальной планировки, автоматизации геодезического контроля при движении строительных машин и механизмов во время работы, прокладке дренажных и канализационных систем.

С помощью лазерных нивелиров также выполняют контроль качества дорог, когда требуется осуществлять контроль ровности покрытия при выемке и перемещении грунта, забивке свай, строительстве аэродромов и т. д. Если сравнивать с традиционными технологиями, лазерные нивелиры позволяют максимально увеличить производительность труда, исключить необходимость перепроверки и сократить время, затрачиваемое на выполнение работ. Конструкции первых лазерных нивелиров были достаточно просты, так как представляли собой стандартный нивелир с закрепленным на нем газовым лазером (см. рис. 3.18). Зрительная труба нивелира использовалась в качестве коллиматора.

При нивелировании поверхности высокая производительность достигается использованием лазерных приборов со сканирующими излучателями. Впервые такой лазерный нивелир был предложен Студебеккером (США) в 1964 г. [139]. Оптическая схема подобного «ротационного» лазерного нивелира представлена на рис. 3.19.

Большинство лазерных нивелиров снабжено компенсаторами, позволяющими автоматически удерживать пучок лазерного излучения горизонтально или с заданным уклоном. Установка в горизонтальное положение производится при помощи электронных и жидкостных уровней или автоматической системы самонивелировки.

Для обеспечения стабильности положения в пространстве лазерной плоскости при работе в конструкции некоторых моделей лазерных нивелиров устанавливается система стабилизации положения лазерного пучка, аналог которой ранее использовался в профессиональной видеоаппаратуре. Такое конструктивное решение позволяет автоматически корректировать вибрации, возникающие на строительной площадке во время работы тяжелой техники.

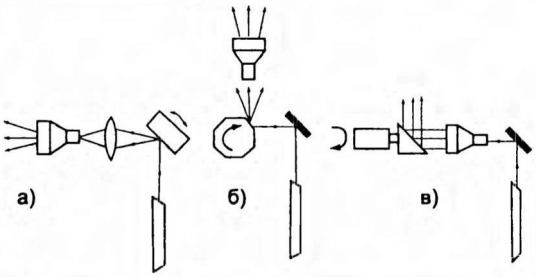


Рис. 3.20. Устройства для развертки лазерного пучка:
а) с помощью гальванометра; б) с помощью вращающейся многогранной призмы; в) с помощью вращающегося зеркала, установленного на валу электродвигателя

Для фиксации лазерной плоскости (лазерного пучка) можно использовать как обычные нивелирные рейки, так и рейки, оснащенные специальным приемником излучения. Более простые типы лазерных нивелиров снабжены только цилиндрическим уровнем, скрепленным с лазером и коллимирующей оптической системой.

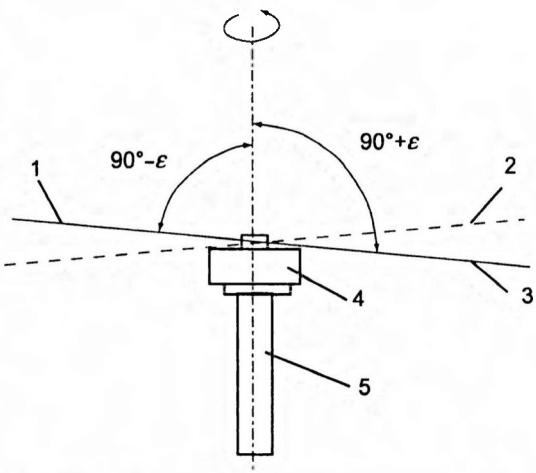


Рис. 3.21. Оптическая схема развертки с двумя сканирующими пучками:
1 и 3 – пучки лазерного излучения, составляющие с горизонтальной плоскостью углы «+» и «–» или с вертикалью углы 90° + ε и 90° – ε; 2 – горизонтальная линия; 4 – сканирующая головка; 5 – лазер с коллимирующей оптической системой

У некоторых лазерных нивелиров высота излучателя может меняться путем вертикального смещения прибора относительно головки штатива. В современных лазерных нивелирах в основном используются полупроводниковые лазеры, пучок

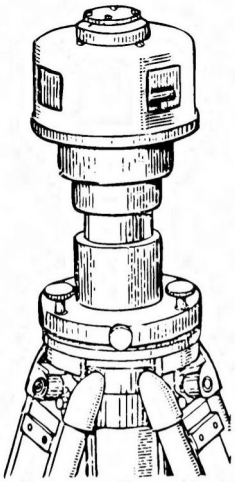


Рис. 3.22. Лазерный нивелир, задающий два лазерных пучка, образующих равносигнальную зону

излучения от которых формируют с помощью оптической системы слабо расходящимся (практически параллельным) либо трансформируют с помощью цилиндрической линзы в виде веера (рис. 3.20). Чтобы создать световую плоскость либо световой сектор, лазерный пучок развертывают с помощью сканирующей головки, выполненной в виде зеркального гальванометра (рис. 3.20, а) или вращающейся призмы (зеркала), установленных на валу электродвигателя (рис. 3.20, б, в).

В некоторых лазерных нивелирах пучок лазерного расщепляют на два пучка, один из которых развертывают в виде плоскости, а другой направляют вертикально (рис. 3.21). Также созданы лазерные приборы, которые позволяют создавать отвесную световую плоскость.

Как уже отмечалось, в лазерных нивелирах могут также использовать две световые плоскости, создаваемые двумя сканирующими пучками лазерного излучения (рис. 3.21). Внешний вид такого лазерного нивелира показан на рис. 3.22.

В нем лазерный пучок от лазера попадает на сканирующий узел, осуществляющий не только развертку пучка с определенной угловой скоростью, но и расщепление его на два пучка. Один из световых пучков составляет с горизонтальной плоскостью угол «−ε», а другой «+ε», благодаря чему достигается возможность создания равносигнальной зоны, так как при сканировании лазерные пучки частично перекрывают друг друга (рис. 3.23).

Отсчет производится по плоскости, симметричное положение которой соответствует одинаковой амплитуде светового сигнала. При небольшом смещении относительно плоскости сим-

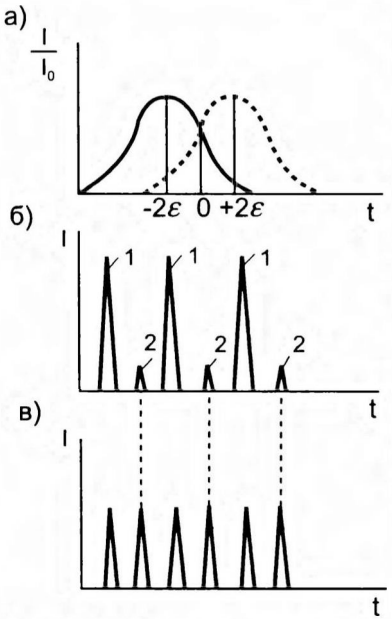


Рис. 3.23. Создание равносигнальной зоны:
а) соотношение интенсивностей в пучках лазерного излучения; б) соотношение интенсивностей в пучках, когда фотоприемник смещен относительно центра равносигнальной зоны; в) соотношение интенсивностей в пучках, когда фотоприемник находится в центре равносигнальной зоны

метрии вниз или вверх меняется соотношение интенсивностей в пучках 2 и 1, как это показано на рис. 3.23, б. Если глаз находится в плоскости симметрии, то при частоте вращения вала двигателя, равной 10 $с^{-1}$, свет от сканирующего излучателя вследствие инерционности глаза будет казаться непрерывным, хотя в действительности за 1 с будет 20 вспышек одинаковой интенсивности (рис. 3.23, в). Если глаз сместить ниже или выше плоскости симметрии, то он зафиксирует в течение одной секунды взаимно чередующиеся десять ярких и десять слабых вспышек.

Для определения положения плоскости симметрии, т. е. горизонтальной плоскости, визуальным методом используют стеклянный диск, в оправе которого имеется прорезь, а на поверхности стекла нанесена сетка (рис. 3.24). Диск перемещают вдоль нивелирной рейки, пока мерцающие нижний и верхний лазерные пучки А и В не расположатся симметрично на сетке диска в точках А и В, как показано на рис. 3.24. В этот момент плоскость симметрии проходит через точку С, соответствующую средней прорези, по центру которой берут отсчет.

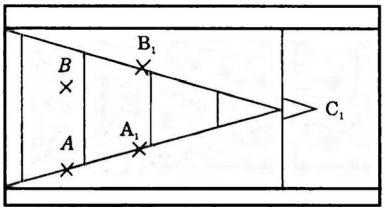


Рис. 3.24. Стеклянный диск, устанавливаемый на рейке. Отсчет по рейке производится, когда мерцающие точки А и В займут симметричное положение относительно прорези (точка C_1)

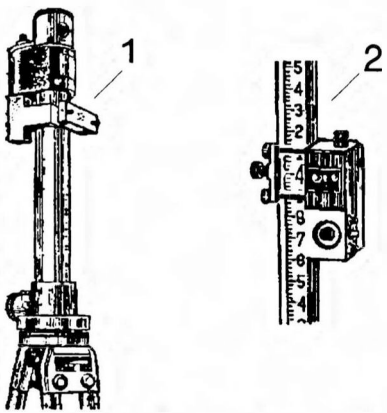


Рис. 3.25. Лазерный нивелир «Ротолайт» (1) с фотоприемником (2), установленным на нивелирной рейке

При работе с этим прибором могут быть использованы рейки, снабженные фотодетектором (рис. 3.25). При фотоэлектрической индикации фотоэлектрический детектор передвигается по рейке в поисках минимального отсчета между двумя максимумами. Когда положение фотодетектора соответствует положению плоскости симметрии, стрелка индикатора находится на нуле. Во время производства измерений приемник лазерного излучения перемещается вдоль рейки до появления показаний на индикаторе, после чего берется отсчет по шкале рейки. Точность измерений составляет порядка единиц мм на 100 м, а дальность действия — 150–200 м, т.е. несколько выше, чем при визуальной индикации, когда дальность действия составляет 50–100 м, при этом сильно зависит от освещенности (при солнечном освещении визуальная индикация ухудшается).

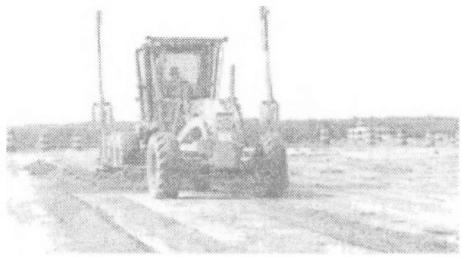


Рис. 3.26. Лазерные приемники (входящие в систему управления машинами Grade System, выпускаемые фирмой Trimble (США), установленные на рабочем органе грейдера)

Для обеспечения высокой точности и увеличения длины плеч при нивелировании выпускается широкий спектр моделей приемников лазерного излучения, которые предназначены для определения положения лазерного пучка или плоскости. Если приемник находится выше уровня глаз, то для контроля за его положением можно использовать выносной экран, на котором отображается отчет по рейке. Кроме ручных выпускаются приемники (рис. 3.26), которые закрепляют на рабочем органе землеройной машины (грейдера, экскаватора, бульдозера и т.п.) и используют для геодезического контроля выполняемых работ (см. 5.3).

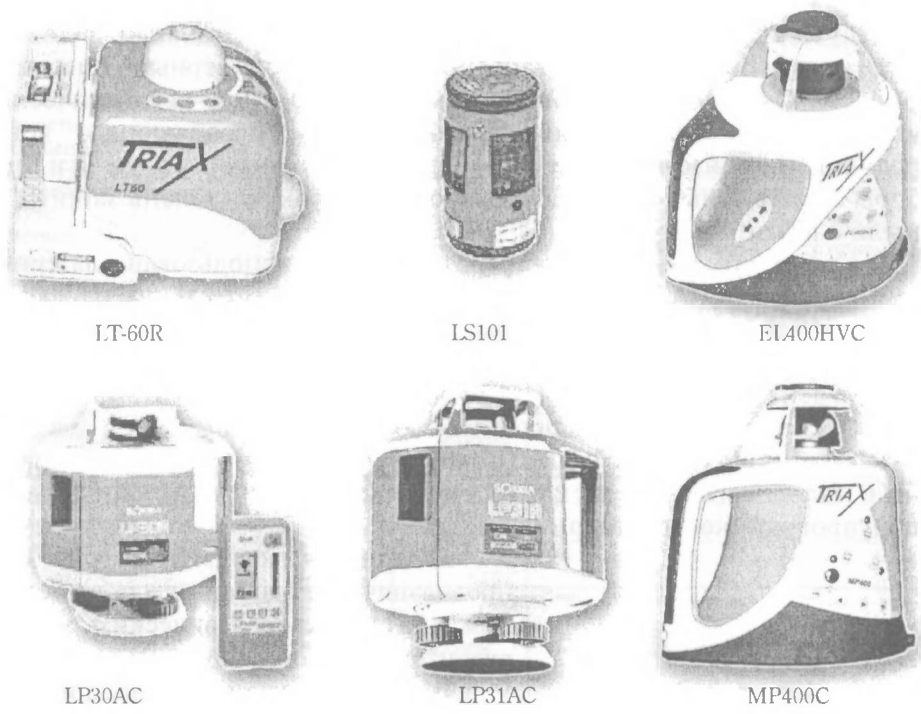
В простейшем случае для обеспечения горизонтального (вертикального) положения пучка лазерного излучения используется карданный подвес, чем достигается автоматическая вертикальная установка лазерного луча. В большинстве приборов применяются жидкостные компенсаторы.

В СССР с 70-х годов прошлого столетия на протяжении нескольких лет серийно выпускался лазерный нивелир, который широко использовался в автоматизированной системе контроля вертикальной планировки СКП-1 (см. 5.3). В этом приборе в качестве излучателя использовался гелиево-неоновый лазер. В современных лазерных нивелирах в основном используются полупроводниковые лазеры, пучок излучения от которых формируют с помощью оптической системы слабо расходящимся (практически параллельным). Производимые на сегодняшний день лазерные нивелиры в зависимости от функциональных возможностей и мощности излучения (дальности действия) можно условно разделить на приборы для внутренних работ и приборы для внешних работ (см. табл. 3.8 Приложения). Лазерные нивелиры для внешних работ снабжены более мощными лазерными излучателями, задающими горизонтальную линию или плоскость. Некоторые конструкции предусматривают возможность задания наклонного направления или плоскости, что удобно при выносе проекта в натуру.

Эти приборы отличаются повышенным радиусом действия и увеличенной скоростью вращения луча с возможностью ее изменения. Они позволяют задавать уклон в одной или двух плоскостях и применяются при производстве земляных работ при пересеченном рельефе

местности. Большинство лазерных нивелиров, предназначенных для внутренних работ, могут задавать как горизонтальную, так и вертикальную световые плоскости (направления). Для расщепления пучка на два ортогональных направления установлена делительная призма. Эти приборы, как и приборы для наружных работ, снабжены компенсаторами.

Например, японская фирма Sokkia выпускает лазерные нивелиры различных типов, которые различаются между собой как по внешнему виду, так и по назначению. Модельный ряд этих нивелиров, называемый Triax (рис. 3.27), достаточно разнообразен и содержит лазерные нивелиры как для наружных, так и для внутренних работ.



LT-60R LS101 EL400HVC

LP30AC LP31AC MP400C

Рис. 3.27. Модельный ряд Triax, представляющий лазерные нивелиры для внутренних и наружных работ, выпускаемые фирмой Sokkia (Япония)

Для работ на строительной площадке, а также внутри строящихся зданий может быть использован лазерный нивелир Sokkia LT-60R, компактный и удобный в использовании (рис. 3.27). Корпус прибора конструктивно совмещен с многофункциональным регулируемым кронштейном, позволяющим устанавливать нивелир на стандартный штатив, крепить к стене или размещать на любой другой конструкции. Лазерный нивелир LT-60R предназначен для создания вертикальных

и горизонтальных опорных плоскостей; кроме того он задает вертикальный пучок лазерного излучения. Радиус действия прибора составляет 60 м.Технические характеристики этого прибора, как и других приборов данного модельного ряда, приведены в табл. 3.9.

Значительно меньший радиус действия (10 м) имеет лазерный нивелир LS101, который обеспечивает одновременное построение двух вертикальных и одной горизонтальной плоскостей. Механический маятниковый компенсатор автоматически устанавливает световые плоскости в горизонтальное и вертикальное положение. При отклонении компенсатора от заданного диапазона прибор автоматически отключается.

Для наружных работ, связанных с выполнением вертикальной планировки, прокладкой труб, монтажом оборудования и др. видов работ могут быть использованы ротационные лазерные нивелиры EL400HVC и MP400C. Они имеют электронный автоматический компенсатор, реализующий функцию «Tilt», позволяющую контролировать горизонт инструмента при особо точных работах. Эти приборы имеют большой диапазон работы и высокую степень защиты от пыли и влаги.

Кроме того, для наружных работ могут быть использованы лазерные нивелиры LP30AC, LP31AC, которые задают горизонтальную плоскость инфракрасным лазерным лучом, стабилизированным маятниковым компенсатором. Эти приборы при работе с приемником обеспечивают радиус действия более 100 м (см. табл. 3.9).

Отечественной промышленностью (УОМЗ) выпускается два типа лазерных нивелиров: НЛ-30 и НЛ-20 (см. табл. 3.10), которые компактны и малоэнергоемки, так как в качестве излучателя в них используется полупроводниковый лазер.



Рис. 3.28. Внешний вид лазерного нивелира НЛ-30

Лазерный нивелир НЛ-30 (рис. 3.28) предназначен в основном для выполнения инженерно-геодезических работ в строительстве.

В приборе пучок лазерного излучения расщепляется на два пучка, один из которых развертывается в горизонтальной плоскости, другой направлен перпендикулярно этой плоскости, т.е. вертикально. Таким образом, при работе прибора создаются видимая горизонтальная плоскость и видимый отвесный луч. Прибор приводится в рабочее положение по цилиндрическому уровню. Для выполнения измерений при стро-

ительно-монтажных работах может быть использована специальная нивелирная рейка вместе с фотоприемным устройством, позволяющая определять положение лазерной плоскости.

Таблица 3.9

Технические характеристики лазерных нивелиров, выпускаемых фирмой Sokkia (Япония)

Параметры	LT60R	LS101	EL400HVC	LP31AC	LP30AC	MP400C
Количество плоскостей	Горизонтальная / вертикальная, зенитный луч	2 вертикальных и 1 горизонтальная	Горизонтальная и вертикальная	Горизонтальная	Горизонтальная	Горизонтальная и вертикальная
Точность построения плоскости	10 мм на 30 м	3 мм на 9 м	30″ или 15 мм на 100 м	9″ или 4,8 мм на 10 м	6″ или 3,4 мм на100 м	30″ или 15 мм на 100 м
Радиус действия по горизонтали, м	60	10	150 м с приемником	120 м с приемником	150 м с приемником	150 м с приемником
Радиус действия по вертикали, м	60	10	20	–	–	–
Компенсатор	–	маятниковый	электронный	маятниковый	маятниковый	электронный
Диапазон работы компенсатора	–	±5	±4,5°	±10′	±10′	±4,5°
Длина волны излучения лазера	635 нм, кл3R	635 нм	635 нм	785 нм	785 нм	635 нм
Продолжительность работы, час.	30	25	160 час. Батарейки 40 час. аккумулятор	50 час. Батарейки 17 час. аккумулятор	50 час. Батарейки 20 час. аккумулятор	160 час. Батарейки 40 час. аккумулятор
Источник питания	3 щелочные батареи типа AA	3 щелочные батареи типа AA	2 щелочные батарейки LR-20 или D/аккумулятор TRG	Аккумулятор BDC 39/4 Батарейки LR-20 или D	Аккумулятор BDC 39/4 Батарейки LR-20 или D	2 щелочные батарейки LR-20 или D/аккумулятор TRG-BDS-40

Масса, кг	1,2	0,9	1,3	2,0	2,0	1,3
Скорость вращения пучка лазерного излучения, об/мин.	0/80/ 150/600		0-600			0-600
Углы развертки, град	2/8/25					
Габаритные размеры, мм	150x100x 130		150x160x 170			150x160x 170
Гарантийный срок	2 года	1 год	2 года	2 года	2 года	2 года

Таблица 3.10

Технические характеристики лазерных нивелиров НЛ-30 и НЛ-20К

Технические параметры	НЛ-30	НЛ-20К
Угол компенсации	–	15′
Точность	30″	20″
Источник излучения	диодный лазер	диодный лазер
Длина волны излучения	650 Нм	650 Нм
Диаметр луча на выходе	5 мм	5 мм
Скорость вращения	0–350 об/мин.	0–600 об/мин.
Дальность (с детектором)	100 м	150 м
Дальность (без детектора при визуальном отсчете)	30 м	30 м
Класс лазерной опасности	2	2
Продолжительность работы	20 ч	20 ч
Диапазон температур	–20 °С – +50 °С	–20 °С – +50 °С
Масса	1,5 кг	
Питание – съемная аккумуляторная батарея	4,8 В	4,8 В

НЛ-20К в отличие от НЛ-30 является самоустанавливающимся (см. табл. 3.10). В рабочее положение он приводится по круглому уровню. Горизонтальность световой плоскости обеспечивает жидкостный компенсатор. Угол компенсации довольно большой и составляет 15′, что создает дополнительные удобства во время работы. Отклонение пучка излучения от горизонтального положения характеризуется средней квадратической ошибкой 20″, что соответствует ошибке по высоте 2 мм

на каждые 20 м. Прибор излучает видимый красный лазерный пучок излучения в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Один из пучков, вращаясь, образует видимую лазерную плоскость, второй пучок создает видимую ортогональную линию.

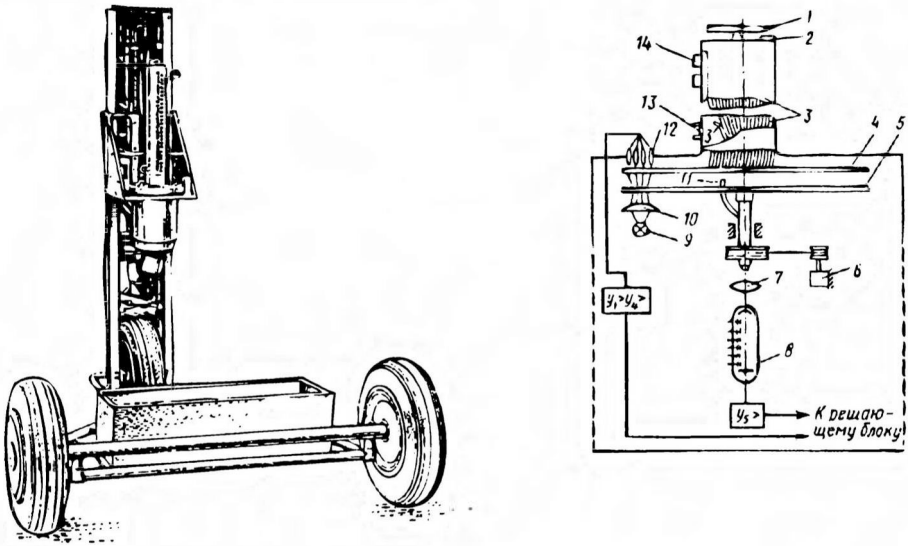


Рис. 3.29. Лазерный профилограф
а) внешний вид многолинзового фотоприемника лазерного профилографа; б) схема приемного устройства лазерного профилографа:
1 – оптический визир; 2 – круглый уровень; 3 – неподвижные волоконные световоды; 4 и 5 – неподвижный и подвижный кодирующие диски; 6 – электродвигатель; 7 – линза; 8 – фотоэлектронный умножитель; 9 – лампа подсвета кода; 10 – цилиндрическая линза; 11 – подвижный световод; 12 – фотодиоды; 13 – линза входного зрачка; 14 – бленда приемной линзы

Для повышения производительности работ при выполнении детального нивелирования трассы в качестве приемного устройства может быть использована линейная матрица фотоэлементов, которая имеет много коммутирующих соединений, и поэтому довольно сложна. В СССР был разработан лазерный профилограф [31], у которого в качестве приемного устройства использовалась многолинзовая линейная матрица, содержащая 50 линз (рис. 3.29, а). Линзы расположены на рейке в два ряда таким образом, что их главные фокусы находятся на расстоянии 10 мм друг от друга. В свою очередь, рейка установлена в карданном подвесе на подвижном экипаже. В фокусах линз расположены торцы световодов, а противоположные торцы световодов – по окружности на неподвижном диске. Для передачи светового сигнала с торцов световодов служит подвижный свето-

вод, вход которого находится на расстоянии примерно 1 мм от неподвижного диска и закреплен на подвижном кодирующем диске, а выходной торец направлен на вход фотоприемника. Фотоприемник состоит из двух светофильтров объектива и фотодетектора. Подвижный и неподвижный диски, а также торцы световодов выполнены таким образом, что при вращении подвижного диска конец подвижного световода последовательно проходит под торцами неподвижных световодов. На кодовом диске сделано 50 отверстий, угловое положение которых соответствует положению световодов на неподвижном диске. Кодовые отверстия служат для определения отсчета в решающем блоке, соответствующего моменту засветки торца подвижного световода лазерным пучком. Регистрация сигнального импульса осуществляется с помощью фотодетектора. Для подсветки кодообразователя служит лампа с цилиндрической линзой, а для приема кодовых импульсов – фотодиод. Подвижный кодовый диск вращается с помощью электродвигателя с частотой 1 $с^{-1}$. Таким образом, в течение 1 с происходит просмотр всех торцов световодов и определяется, какой порядковый номер имеют освещенные торцы световодов, в соответствии с чем процессор выдает информацию о положении лазерного пучка на индикатор профилографа.

При выполнении нивелирования лазерным профилографом опорный пучок задается с помощью лазерного нивелира, устанавливаемого в начале трассы. При движении приемного устройства профилографа лазерный пучок попадает на вход нескольких линз. С помощью процессора находится отсчет, соответствующий положению геометрического центра пучка. Отсчет отображается на цифровом табло профилографа. Точность отсчета составляет 5 мм. Нулевая плоскость отсчета расположена ниже первого элемента матрицы линз на расстоянии 10 мм от центра первой линзы. Для определения расстояния от излучателя до рейки с колесом тележки связан датчик пути.

Дальность действия лазерного профилографа составляет 500 м. При определении значений отметок пикетов необходимо учитывать расстояние между излучателем и приемником, чтобы в случае необходимости ввести поправку за кривизну Земли.

Для проверки точности определения отметок точек дважды были проведены измерения профиля взлетно-посадочной полосы строящегося аэродрома – один раз с помощью лазерного профилографа и другой – с помощью технического нивелира.

Ниже приведены средние квадратические ошибки определения пикетов трассы для различных расстояний, которые вычисляли на основании сравнения результатов нивелирования, выполненного лазерным профилографом и техническим нивелиром (см. табл. 3.11). Средняя квадратическая ошибка геометрического нивелирования этой же трассы протяженностью 0,5 км составляет 5 мм.

Таблица 3. 11

Точность определения отметок точек с помощью лазерного профилографа в зависимости от расстояния

Участок трассы, м	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500
Средняя квадратическая ошибка, мм	15,6	22,0	23,7	31,0	35,0

Лазерный профилограф с многоэлементной рейкой из-за небольшого допустимого диапазона измеряемых превышений вдоль профиля трассы может быть использован только на горизонтальных участках, где вертикальная планировка уже проведена. Его целесообразно применять там, где необходима очень детальная вертикальная съемка, например, при определении неровностей дорог и аэродромов с целью определения спектральных характеристик рельефа и эффекта их воздействия на автомобили или самолеты и др. транспортные средства. Причем из-за инерционности электромеханических элементов фотоприемника, скорость его должна быть ограничена до 0,6 м/с (~2 км/час). Таким образом, при максимальной скорости движения профилографа отметки пикетов можно получать через каждые 0,6 м, так как частота съема информации равна 1 Гц.

Весьма существенные недостатки такого профилографа – малый диапазон измеряемых превышений, обусловленный размерами линейной матрицы фотоэлементов и невысокая скорость измерений, ограниченная инерционностью механических элементов приемного устройства. По этим причинам были изготовлены только экспериментальные образцы лазерных профилографов подобного типа.

3.4. Гидростатические нивелиры

Все вышеописанные инструменты для геометрического нивелирования, несмотря на их достоинства, обладают и рядом существенных недостатков, ограничивающих применение геометрического нивелирования. Оптические нивелиры требуют прямой видимости между инструментом и нивелируемыми точками, а при визуальном взятии отчетов – хорошей освещенности нивелирных реек. На некоторых строительных объектах эти нивелиры неприменимы из-за громоздкости реек и отсутствия свободных удобных площадок для установки нивелира и работы наблюдателя. К тому же приборы для геометрического нивелирования имеют предел фокусировки зрительной трубы, составляющий обычно 1–2 м, что делает их непригодными для работы в тесных закрытых помещениях. Даже при самых благоприятных условиях работы оптические нивелиры подвержены разъюстировкам, что заставляет постоянно выполнять довольно сложные поверки. Наконец, результаты геометрического нивелирования искажаются влиянием рефракции, которое учесть крайне трудно.

От этих недостатков свободны гидростатические нивелиры [30]. Не требуя сложных поверок, они просты в обращении и обеспечивают быстрое определение превышения. Гидростатическое нивелирование, кроме того, дает широкие возможности автоматизации измерений и получения непрерывной информации о высотном положении наблюдаемых объектов. Гидростатические нивелиры применяют:

- при нивелировании фундаментов и монтаже крупногабаритного оборудования;
- для контроля укладки крупных блоков, перемычек и панелей междуэтажных перекрытий;
- при устройстве облицовки, при отделочных и архитектурных работах;
- при работах по укладке полов и монтаже внутреннего сантехнического оборудования;
- при монтаже оборудования и трубопроводов в котельных и промышленных цехах;
- для измерения отклонений от горизонтальности и прямолинейности направляющих большой длины;
- при монтажных работах на строительстве шахт и метро;
- при наблюдениях за осадками и деформациями опор мостовых кранов, опор транспортных мостов и других сооружений, подвергающихся действию динамических нагрузок, а также за осадками зданий и сооружений, особенно таких уникальных, как ускорители заряженных частиц;
- при строительстве самотечных канализационных коллекторов с малыми уклонами;
- при передаче высот через крупные водные преграды;
- для создания стационарной аппаратуры для наблюдения за деформациями крупных сооружений, тектоническими движениями земной коры, для передачи высот через крупные водные преграды и т.п.

Нивелирование с помощью жидкости, свободная поверхность которой всегда устанавливается нормально к направлению силы тяжести и в сообщающихся сосудах располагается на одном уровне, независимо от массы жидкости и поперечных сечений сосудов, зародилось в глубокой древности. Более 2,5 тысяч лет назад трассирование канала, соединяющего Средиземное и Красное моря, выполнялось с помощью хоробата – переносного вытянутого желоба, наполненного водой, свободная поверхность которой использовалась для построения горизонтального луча зрения. На основании основного уравнения гидростатики

$$p = p_0 + \gamma z \qquad (3.19)$$

величина p гидростатического давления в какой-либо точке M (рис. 3.30, а) жидкости с объемным весом γ определяется давлением p_0

над поверхностью жидкости и глубиной z погружения этой точки. Следовательно, в покоящейся жидкости давление во всех точках одной и той же уровенной поверхности одинаково.

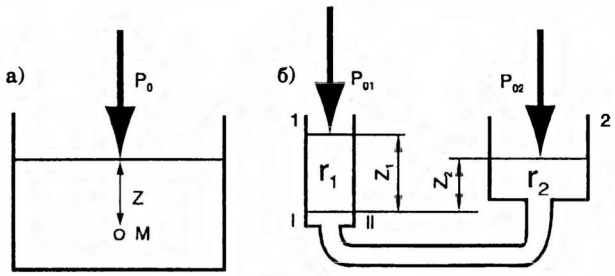


Рис. 3.30. Гидростатическая система
а) к определению гидростатического давления в точке М; б) сообщающиеся сосуды

Пусть имеются два сообщающихся сосуда 1 и 2 (рис. 3.30, б), заполненных жидкостями с различными значениями γ_1 и γ_2 объемного веса; давления на поверхностях жидкостей в сосудах соответственно p_{01} и p_{02}.

Если z_1 и z_2 – высоты свободных поверхностей жидкостей над поверхностью I–II их раздела в одном из сосудов, то в соответствии с основным уравнением гидростатики гидростатическое давление в плоскости I–II:

$$p = p_{01} + \gamma_1 z_1. \qquad (3.20)$$

С другой стороны, учитывая глубину z_2 погружения поверхности I–II под уровнем жидкости в сосуде 2, получим:

$$p = p_{02} + \gamma_2 z_2. \qquad (3.21)$$

Приравняв правые части (3.20) и (3.21), найдем уравнение равновесия жидкостей в сообщающихся сосудах:

$$p_{01} + \gamma_1 z_1 = p_{02} + \gamma_2 z_2, \qquad (3.22)$$

из которого следует, что при равенстве давлений p_{01} и p_{02} на свободных поверхностях жидкостей в сосудах $\gamma_1 z_1 = \gamma_2 z_2$, откуда

$$\gamma_1/\gamma_2 = z_2/z_1. \qquad (3.23)$$

Если сосуды заполнены однородной жидкостью с одинаковыми значениями объемного веса ($\gamma_1 = \gamma_2$), то поверхности жидкости в этих сосудах устанавливаются на равных высотах $z_1 = z_2$, отсчитываемых в данном случае от любой произвольно выбранной горизонтальной плоскости сравнения, и могут служить при нивелировании горизонтальной визирной плоскостью.

Простейший гидростатический нивелир – трубчатый, состоящий из двух стеклянных цилиндрических сосудов, соединенных жесткой трубкой. Нивелир заполняют какой-либо подкрашенной жидкостью примерно до половины высоты сосудов. Визируя по поверхности жидкости на установленные на нивелируемых точках рейки с делениями, производят отсчеты по ним, как при геометрическом нивелировании, но невооруженным глазом. Такой прибор не поверяют и не юстируют.

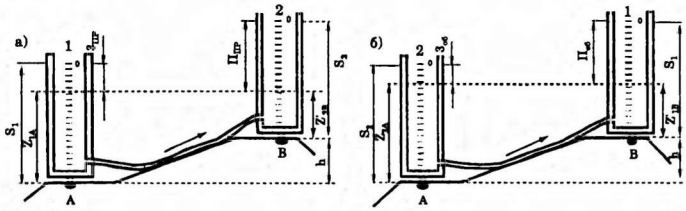


Рис. 3.31. Определение превышения переносным гидростатическим нивелиром со взаимной перестановкой сосудов: а) при прямом б) при обратном положении сосудов

Единственное требование к нему заключается в том, чтобы сосуды были чистыми и не слишком узкими (8—10 мм) во избежание явления капиллярности, вызывающего ошибки измерения. Точность трубчатого нивелира весьма низка, вследствие чего в настоящее время его применяют крайне редко.

В современных гидростатических нивелирах сосуды соединяются не жесткой трубкой, а гибким шлангом; сами сосуды выполняются в виде заключенных в металлическую оправу стеклянных цилиндров с миллиметровыми шкалами на стенках (рис. 3.31, а). Зная относительные высоты z_1 над точкой А и z_2 над точкой В уровня жидкости в измерительных головках (сосудах), превышение h между точками А и В можно найти по формуле:

$$h = z_{1A} - z_{2B}. \qquad (3.24)$$

В соответствии с рисунком, выполненным применительно к моделям гидростатических нивелиров, в которых нулевой штрих располагается в верхней части, нанесенной на стенке сосуда шкалы, получим:

$$h = (s_1 - З_{пр}) - (s_2 - П_{пр}) \text{ или}$$

$$h = (П_{пр} - З_{пр}) - (s_2 - s_1), \qquad (3.25)$$

где $З_{пр}$ и $П_{пр}$ — отсчеты, фиксирующие уровень жидкости в заднем и переднем сосудах при их прямом положении (1→2); s_2; s_1 — высоты нулевых штрихов измерительных шкал над опорными плоскостями сосудов.

Для конкретной пары сосудов разность высот (s_2; s_1) их «нулей» — величина постоянная, называемая местом нуля гидростатического нивелира. Обозначим

$$s_2 - s_1 = МО, \qquad (3.26)$$

и формулу для определения превышения перепишем в виде

$$h = (П_{пр} - З_{пр}) - МО. \qquad (3.27)$$

Если в (3.27) подставить значение h = 0, то станет ясно, что место нуля представляет собой разность отсчетов уровня жидкости в сосудах при установке их на горизонтальной поверхности.

В уравнении (3.27) два неизвестных: h и МО, для отыскания которых необходимо иметь второе уравнение. При работе с переносными гидро-

статическими нивелирами его можно получить, поменяв сосуды местами (рис. 3.31-б). Тогда, взяв отсчеты $П_{об} - З_{об}$, фиксирующие уровни жидкости в заднем и переднем сосудах при их обратном положении (2→1), можем записать:

$$h = z_{2A} - z_{1B} = (s_2 - З_{об}) - (s_1 - П_{об})$$

или

$$h = (s_2 - s_1) + (П_{об} - З_{об}), \qquad (3.28)$$

а с учетом (3.26)

$$h = (П_{об} - З_{об}) + МО. \qquad (3.29)$$

Суммируя и вычитая выражения (3.27) и (3.29), получим:

$$h = \frac{(П_{пр} - З_{пр}) + (П_{об} - З_{об})}{2} = -\frac{(З_{пр} - П_{пр}) + (З_{об} - П_{об})}{2}, \qquad (3.30)$$

$$МО = \frac{(П_{пр} - З_{пр}) - (П_{об} - З_{об})}{2} = -\frac{(З_{пр} - П_{пр}) - (З_{об} - П_{об}}{2}. \qquad (3.31)$$

Нетрудно представить, что для гидростатических нивелиров, шкалы которых имеют нулевой штрих в нижней части сосуда, при прямом положении (1→2) измерительных головок выражение (3.24) раскрывается в виде: $h = (s_1 + З_{пр}) - (s_2 + П_{пр})$. Перегруппировав члены последнего уравнения и воспользовавшись принятым ранее обозначением [см. (3.26)], запишем:

$$h = (З_{пр} - П_{пр}) - МО, \qquad (3.32)$$

а после взаимной перестановки сосудов – при их обратном положении (2→1):

$$h = (З_{об} - П_{об}) + МО. \qquad (3.33)$$

Из совместного решения уравнений (3.32) и (3.33) получим формулы для вычисления значений превышения и места нуля:

$$Мо = \frac{(З_{пр} - П_{пр}) - (З_{об} - П_{об}}{2}, \qquad (3.34)$$

$$Мо = \frac{(З_{пр} - П_{пр}) - (З_{об} - П_{об}}{2}. \qquad (3.35)$$

Для высокоточных измерений переносными шланговыми нивелирами применяют двойное нивелирование с взаимной перестановкой сосудов. Эта методика обеспечивает автоматическое исключение влияния места нуля [см. (3.30), (3.31) и (3.34), (3.35)] и ослабляет температурные ошибки, но малопроизводительна. Поэтому в случаях, когда не требуется особо высокой точности, предварительно определяют величину МО и с учетом ее по формулам (3.27), (3.29) или (3.32), (3.33) выполняют нивелирование в одном направлении (1→2 или 2→1) без перестановок. При нивелировании поверхностей прибегают и

к полярному нивелированию от одной исходной точки. К настоящему времени создано немало конструкций гидростатических нивелиров различных устройств и назначений, а следовательно, и точностей. Точность гидростатического нивелира определяется применяемым способом фиксации уровня жидкости в сосудах и возможностями учета (или исключения влияния) изменений внешней среды [78]. Известно много способов отсчета уровня жидкости. Наиболее известные из них – визуальный, контактно-визуальный, электроконтактный и другие способы с различными их разновидностями.

В самом простом случае фиксация уровня жидкости в стеклянных трубках нивелира выполняется визуально – взятием отсчета на глаз по шкале, нанесенной на стенке самой трубки (рис. 3.32) против мениковой поверхности жидкости. Поскольку обычно применяемые жидкости – смачивающие, поверхность жидкости в трубке представляет собой вогнутый мениск; по самой низкой точке менисковой дуги и берут отсчет с ошибкой ±1 мм.

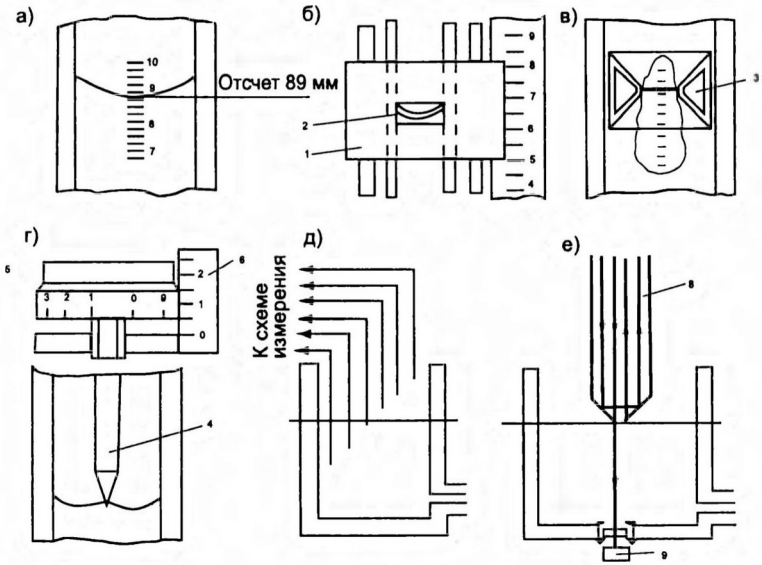


Рис. 3.32. Способы фиксации уровня жидкости в сосудах

а, б, в – разновидности визуального; г – контактно-визуальный; д – электроконтактный; е – оптико-электронный;

1 – передвижная рамка; 2 – щель; 3 – поплавок; 4 – микрометренный винт; 5– барабанчик; 6 – шкала; 7 – контакты; 8 – стеклянный цилиндрический световод; 9 – фотоэлемент

Точность визуального способа повышается до ±0,5 мм, если отсчет производить по шкале, расположенной рядом с трубкой, фиксируя уровень жидкости при помощи передвижной рамки 7 (рис. 3.32, б) с прорезанной щелью 2 и индексом на продолжении ее оси симметрии. Передвигая рамку по трубке, устанавливают ее так, чтобы нижний край мениска проходил по оси симметрии прорези, после чего против индекса берут отсчет по шкале. Для большего повышения точности индекс может быть заменен верньером.

Визуальный отсчет по нанесенной на трубку шкале может производиться против риски плавающего на поверхности жидкости специальной формы поплавка 3 (рис. 3.32, б, в). В этом случае точность отсчета характеризуется ошибкой ±0,2 мм. При контактно-визуальном способе уровень жидкости фиксируется острием микрометренного винта 4 (рис. 3.32, г). Вращая барабанчик 5, микрометренный винт 4 в стеклянном цилиндрическом сосуде плавно опускают сверху и в момент прорыва острием пленки поверхностного натяжения смачивающей жидкости, когда вокруг острия образуется менисковая поверхность, производят отсчет по шкале 6, укрепленной рядом с барабанчиком микрометренного винта. Для удобства шаг винта делают равным 1 мм, а окружность барабанчика разбивают на десять частей, что дает возможность по вертикальной шкале отсчитывать количество целых, а по барабанчику – десятых и сотых долей миллиметра.

Электроконтактный способ заключается в фиксации глубины опускания микрометренного винта от фиксированного «нуля» до соприкосновения с жидкостью. В момент соприкосновения замыкается электрическая цепь и появляется соответствующий световой или звуковой сигнал.

Известны электроконтактные датчики положения уровня жидкости в сосуде как непрерывного действия (из одного подвижного электрода), так и дискретные. Дискретный датчик состоит из большого числа сигнальных устройств в виде контактов 7 (рис. 3.32, д), смонтированных последовательно на разных высотах. Расстояние между контактами по вертикали (шаг) зависит от необходимой точности получения информации о положении уровня жидкости.

Оптико-электронный способ регистрации уровня жидкости (рис. 3.32, е) состоит в регистрации фотоэлементом 9 светового сигнала, проходящего через жидкость при контакте с ней стеклянного цилиндрического световода 8.

Применение инструментальных контактных способов дает возможность автоматизации определения превышений и дистанционного получения информации о высотном положении контролируемых объектов. В последние годы одним из прогрессивных направлений при создании гидростатических нивелиров являются устройства, основанные на использовании видеоизмерений [20–26]. Гидростатические ни-

велиры, использующие этот принцип измерений, представляют собой аппаратурно-программный комплекс, структура и алгоритм функционирования которых могут гибко меняться в зависимости от решаемой задачи и параметров измерений. Отсчетные устройства, применяемые для определения уровня жидкости и основанные на видеоизмерениях, называют видеоуровнемерами (ВУ).

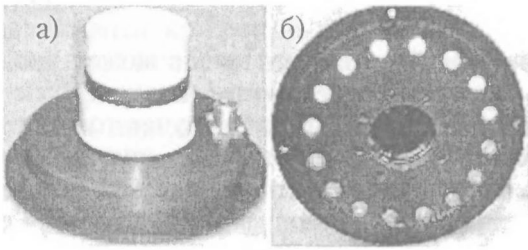


Рис. 3.33. Видеоуровнемер
а) внешний вид видеокамеры, заключенной в корпус; б) объектив видеокамеры с расположенными по краям светодиодами

ВУ предназначены для бесконтактного измерения уровня горючих, взрывоопасных, агрессивных, радиоактивных и других прозрачных и непрозрачных жидкостей в резервуарах (рис. 3.33). Эти устройства также используются в гидростатических нивелирах, так как позволяют автоматически измерять с высокой точностью и большом диапазоне уровень жидкости.

Работа ВУ основана на компьютерной обработке видеосигнала, содержащего изображение визирных целей, отраженных от исследуемого измеряемого уровня жидкости в резервуаре. Датчик имеет видеокамеру (рис 3.33, а), чувствительным элементом которой является ПЗС-матрица. По краям объектива симметрично располагаются светодиоды от 4-х и более штук (рис 3.33, б). Во время работы с помощью видеокамеры, направленной вертикально вниз на поверхность рабочей жидкости, определяют координаты светящихся визирных целей, создаваемых светодиодами на поверхности жидкости. При изменении уровня жидкости изменяются и координаты визирных целей. Относительная ошибка измерений составляет 10^{-4}. (При диапазоне измерения 1—10,0 м средняя квадратическая ошибка не более 0,1—1 мм).

Нивелиры шланговые переносные.

Одним из простых и удобных в работе переносных гидростатических нивелиров является разработанный в СССР шланговый технический нивелир НШТ-1. Этот прибор предназначен для измерения превышений в пределах ±200 мм при нивелировании фундаментов, монтаже конструкций на строительстве шахт и метрополитена, наблюдениях за осадками зданий, мостовых опор и других сооружений. Нивелир НШТ-1 представляет собой легкую переносную систему, состоящую из двух одинаковых взаимозаменяемых измерительных головок 1 и 2 (рис. 3.34, а), соединенных гибким резиновым шлангом 3 длиной 10 м, внутренний диаметр которого 9 мм. Каждая измерительная головка, присоединяемая к шлангу с помощью штуцера 18 (рис. 3.34, б), состоит из

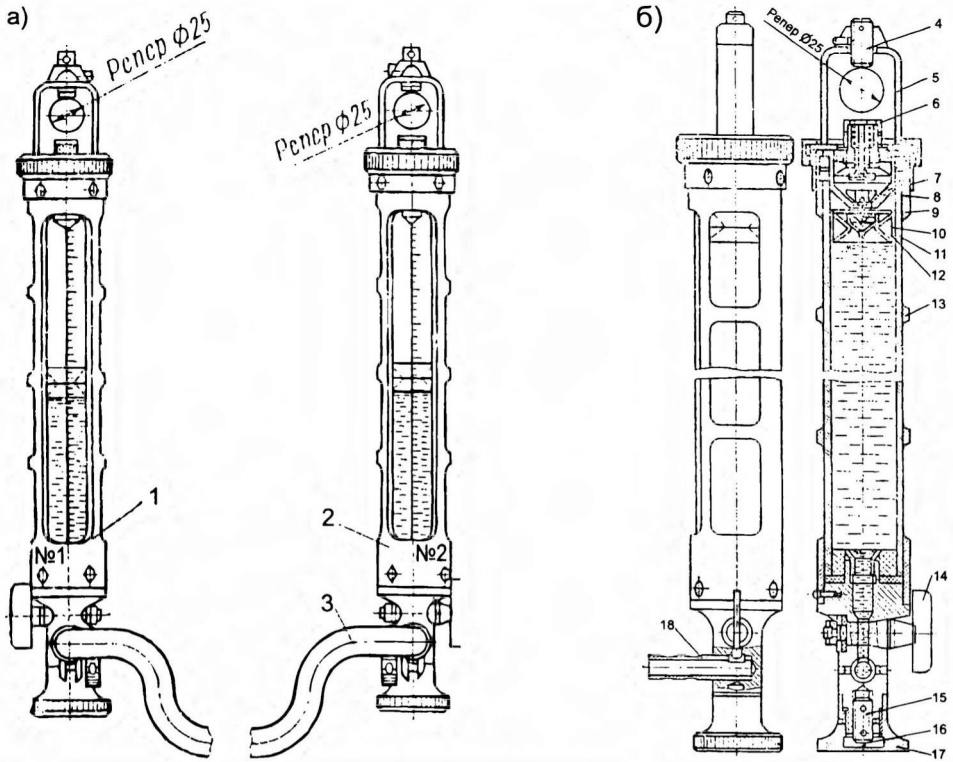


Рис. 3.34. Нивелир шланговый технический НШТ-1
а – общий вид; б – измеритель-ная головка; 1 и 2 – одинаковые измерительные головки; 3 – шланг; 4 – верхняя двусторонняя опорная пятка; 5 – рамка; 6 – ручной клапан; 7 – конусообразная деталь; 8 – свинцовый грузик; 9 – капроновая жилка; 10 – клапан-поплавок; 11 – стеклянный цилиндр; 12 – поплавок с кольцевой риской; 13 – металлическая оправа; 14 – кран; 15 – нижняя опорная пятка; 16 – острие; 17– навинчивающаяся плоская пятка; 18 – штуцер

стеклянного цилиндра 11 с нанесенной на нем миллиметровой шкалой, заключенного в металлическую оправу 13. Концы стеклянного цилиндра закрываются пробками. Верхняя пробка имеет ручной и автоматический клапаны. Ручной клапан 6 используется для герметизации стеклянного сосуда при транспортировке. Автоматический клапан, состоящий из свинцового грузика 6 и подвешенного к нему на капроновой жилке 9 клапана-поплавка 10, предназначен для свободного пропуска воздуха и для предотвращения выливания жидкости при внезапном повышении уровня или в случае опрокидывания сосуда. При повышении уровня жидкости клапан-поплавок 10 всплывает и, прижимаясь выталкивающей силой жидкости к плоским краям отверстия в конусообразной детали 7, герметически ее перекрывает.

Верхняя часть металлической оправы оканчивается рамкой 5, в которой на резьбе помещена двусторонняя опорная пятка 4. Если измерительный сосуд надо приставить к нивелируемой точке снизу, используют верхнюю плоскость опорной пятки. При подвеске прибора на стенной репер нижняя плоскость пятки 4 опирается на него. Прибор имеет и нижнюю опорную пятку 15 с острием 16 для установки на грунтовые реперы. При необходимости установки прибора на фундаменте или другой поверхности снизу навинчивается вторая пятка 17 – плоская.

Расставив измерительные головки на нивелируемые точки, наблюдатели открывают краны 14 и клапаны 6 прибора и после остановки поплавков 12 одновременно фиксируют глубины жидкости в обоих сосудах, производя отсчеты по красным кольцевым рискам на внешних цилиндрических поверхностях поплавков. После этого краны и клапаны перекрывают и, протаскивая шланг по грунту, нивелир переносят на следующую станцию, где действуют в такой же последовательности. Для работы при положительных температурах воздуха система нивелира заполняется дистиллированной или кипяченой мягкой водой. Зимой для работы при отрицательных температурах до –30 °С в нивелир заливают какой-либо антифриз – жидкость с низкой температурой замерзания. Наиболее пригодны 20–25 % водный раствор хлористого кальция, денатурат, 50 % водный раствор ацетона. Каждый поплавок – пустотелый, кольцевой формы с двусторонним конусообразным сужением центрального отверстия; такая конструкция наилучшим образом обеспечивает пропуск пузырьков воздуха, постоянство высоты поплавка над жидкостью и его устойчивость. Среднеквадратические ошибки измерения превышения с помощью нивелира НШТ-1 составляют:

двойным нивелированием (со взаимной перестановкой сосудов), мм.....0,6
в одном направлении (без перестановки сосудов) с учетом места нуля, мм..1,0
полярным нивелированием (от одной исходной точки), мм.....2,0

Другой нивелир под названием «Уровень гидростатический модели 115» предназначен для прецизионных измерений превышений в диапазоне ±25 мм при монтаже горизонтальных элементов крупногабаритного оборудования. Гидростатическая система прибора, заполняемая водой, состоит из двух стеклянных герметических сосудов (головок) 1 (рис. 3.35), соединенных жидкостным шлангом 2 длиной 6 м. При необходимости головки могут быть присоединены к поставляемому в комплекте с ними специальному баку 4 для воды. Свободные воздушные пространства в верхних частях головок сообщаются воздушным шлангом, введенным в конструкцию для выравнивания давлений на поверхностях жидкости в сосудах. Эта конструктивная особенность прибора обеспечивает повышение точности нивелирования.

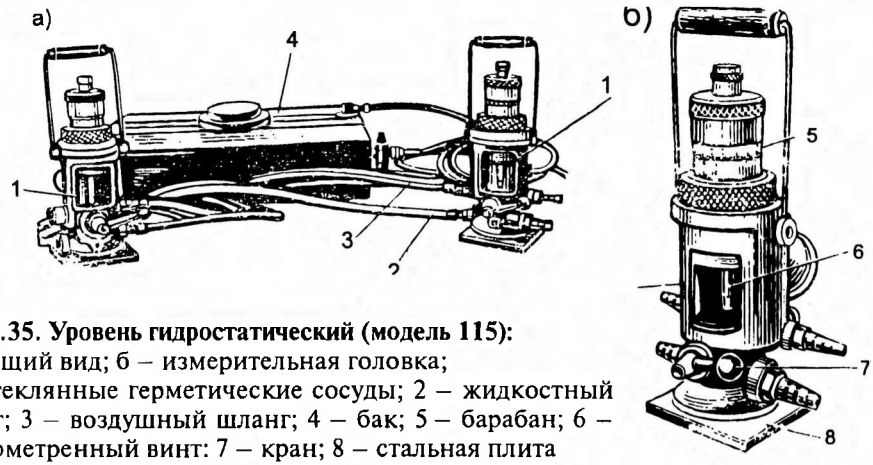


Рис. 3.35. Уровень гидростатический (модель 115):
а – общий вид; б – измерительная головка;
1 – стеклянные герметические сосуды; 2 – жидкостный шланг; 3 – воздушный шланг; 4 – бак; 5 – барабан; 6 – микрометренный винт: 7 – кран; 8 – стальная плита

Под каждым репером закладывают, кроме того, два анкерных болта, создавая тем самым для измерительной головки три опорных точки в одной вертикальной плоскости.

Установив головки стальными плитами 8 на нивелируемые поверхности, наблюдатели открывают краны 7 и через 2–3 мин, когда колебательный процесс в гидростатической системе прекратится, отсчитывают уровень жидкости в сосудах. Каждый сосуд, заключенный в бронзовый корпус, сверху герметично закрыт крышкой, сквозь которую проходит микрометренный винт 6 с барабаном 5. Уровень жидкости фиксируют контактно-визуальным способом: визуально уловив момент соприкосновения конусообразного острия микрометреннего винта с мениском жидкости, берут отсчет по барабану 5. Шаг резьбы винта равен 1 мм, а окружность барабана разделена на 100 делений, так что цена одного деления составляет 0,01 мм. Это позволяет производить отсчет по барабану с точностью до 0,001 мм.

Исследования показали, что в закрытых помещениях с постоянным температурным режимом гидростатический уровень обеспечивает измерение превышения на станции со средней квадратической ошибкой порядка 5–8 мкм. В солнечную погоду результаты нивелирования искажаются столь сильно, что без специальной термозащиты применять прибор для точных измерений не рекомендуется.

Достаточно высокую точность измерений обеспечивают и переносные гидростатические нивелиры. В отечественной практике из высокоточных гидростатических нивелиров наиболее известны два. Это гидростатический нивелир УГС и нивелир Мейссера, серийно выпускаемый предприятием «Фрайбергер прецизиономеханик». Оба эти прибора обеспечивают измерение превышения на длине 10–30 м со средней квадратической ошибкой 0,01 мм в благоприятных внешних

условиях, характерных главным образом для закрытых помещений. Следует отметить, что при использовании переносных приборов метод гидростатического нивелирования теряет такое достоинство, как возможность дистанционного съема информации. Препятствует широкому применению переносных гидростатических приборов и ограничение диапазона измеряемых превышений несколькими сантиметрами.

Как уже отмечалось, из зарубежных приборов наиболее известным является точный гидростатический шланговый нивелир профессора О. Мейссера, известный также как прецизионный шланговый ватерпас, который рекомендуют применять для измерений малых осадок сооружений.

В закрытых помещениях прибор обеспечивает определение превышений в пределах ±100 мм со средней квадратической ошибкой 10 мкм.

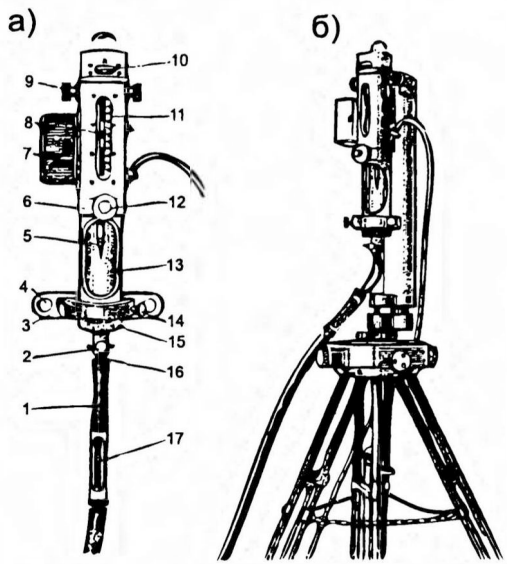


Рис. 3.36. Точный гидростатический шланговый нивелир проф. О. Мейссера (прецизионный шланговый ватерпас)
а) общий вид измерительной головки; б) измерительная головка, установленная на подставке

При этих работах две одинаковые измерительные головки (рис. 3.36-а) нивелира, соединенные шлангом длиной 30 м с внутренним диаметром 10 мм, навешиваются на специальные стенные реперы, предварительно заложенные в намеченных для наблюдений местах сооружения. Головка нивелира представляет собой стеклянный цилиндр 13 в металлическом корпусе 6, подключаемый к жидкостному шлангу 1 через штуцер 16. Пазом в верхней части корпуса прибор навешивается на стенной репер и закрепляется болтовыми держателями 9. Нижняя часть корпуса обхватывается обоймой, закрепляемой на анкерных болтах винтами 4. С помощью установочных винтов 14 измерительной головке по круглому уровню придают отвесное положение и, вращая маховик 12, приводят в движение микрометренный винт 5, опуская его па поверхность жидкости. Контакт острия микрометренного винта с поверхностью воды улавливают визуально или по световому сигналу лампочки индикатора 7. Отсчи-

тывая уровень жидкости, количество целых миллиметров считывают по индексу 8 со шкалы 11, десятые же и сотые доли миллиметра берут по барабану 10.

В нижней части головки имеется кран 2 с уплотняющей гайкой 15, закрывающей стеклянный цилиндр. Для учета изменений температуры рабочей жидкости в шланге под измерительной головкой помещен термометр 17. При нивелировании грунтовых реперов прибор устанавливают на штатив (рис. 3.36, б).

Для непрерывного наблюдения за осадками фундаментов, вертикальными смещениями подкрановых путей и подобных сооружений значительной протяженности целесообразно использовать стационарную гидростатическую систему, которая, в отличие от переносных шланговых нивелиров, может состоять не только из двух, но и из большего количества водомерных сосудов (см. 5.3).

3.5. Баронивелир и его применение для съемок рельефа при скоростных изысканиях

Геодезические изыскания, непосредственно предшествующие проектированию рельефа строительной площадки или объекта, выполняют в настоящее время главным образом методом геометрического нивелирования, который в целом является точным, но довольно громоздким и мало приспособленным для скоростных изысканий, а также для работы на закрытой местности, зимой, в темное время суток и т.п. Удельный вес земляных работ, особенно при строительстве линейных сооружений, все время увеличивается.

Оснащенность строительно-монтажных участков глубинной землеройной и строительной техникой за последние годы претерпела коренные изменения. Появились мощные высокопроизводительные землеройные и планировочные механизмы. В количественном отношении землеройная техника возросла в несколько раз. Применение типовых сборных элементов позволяет переходить к скоростным методам строительства. Это создает некоторый разрыв между сроками изысканий и строительства и особенно чувствуется на этапе составления проектного задания для объектов линейного типа (дорог, взлетно-посадочных полос аэродромов и др.), когда из нескольких возможных вариантов не всегда удается избрать выгоднейший из-за недостаточной оперативности методики геодезических изысканий. Поэтому для ускорения выполнения инженерно-геодезических работ применяют не только спутниковое оборудование и электронные тахеометры, но и в некоторых случаях барометрическое нивелирование как наиболее дешевое.

Этот же метод нивелирования применяют в практике высотного обеспечения полевых геофизических съемок. Например, при выполнении сейсморазведки плановое положение точек требуется определять

с точностью 0,5 м, что позволяет делать спутниковая геодезическая аппаратура даже на закрытых территориях. Вместе с тем высотное положение точек сейсмического профиля также требуется определять с точностью 0,1–0,5 м, что обеспечить с помощью спутникового оборудования довольно сложно, особенно в лесистой местности. Поэтому при решении указанных задач все чаще используют барометрическое нивелирование, которое не только обеспечивает достаточную точность измерений, но и менее трудоемко по сравнению с другими видами нивелирования.

Барометрическое нивелирование основывается на предположении, что в точках с одинаковой высотой давление воздуха одинаково, т.е. изобарические поверхности параллельны уровенной. При перепаде высот до 50 м можно пользоваться упрощенной формулой, связывающей разность высот двух точек с разностью давления воздуха в них:

$$\Delta h = H_0[(p_1 - p_2)/p_{ср}]\,(1 + \alpha t_{ср}), \qquad (3.36)$$

где Δh – искомая разность высот двух точек 1 и 2; p_1, p_2 – давления воздуха в этих точках; $p_{ср} = (p_1 + p_2)/2$ и $t_{ср} = (t_1 + t_2)/2$ – средние значения давления и температуры воздуха; $\alpha = 1/273$ – газовая постоянная. Величина $(H_0/p_{ср})(1 + \alpha t_{ср}) = E$ называется барической ступенью и показывает, на какую высоту нужно подняться или опуститься, чтобы давление изменилось на 1 мбар. Для величины E составлены таблицы для случая однородной атмосферы (атмосферы, плотность воздуха которой с высотой не изменяется). По результатам измерения давления воздуха в точках, разность высот которых известна, может быть определена и натуральная барическая ступень. Таким образом, формулу (3.36) можно написать в виде:

$$\Delta h = E(p_1 - p_2) = E\,\Delta p. \qquad (3.37)$$

Чувствительными элементами микробарометров являются сильфоны или анероидные коробки, форма которых изменяется при изменении давления. Преобразование механических деформаций сильфонов в электрический сигнал осуществляется с помощью струнных, тензометрических и др. датчиков.

Одним из наиболее распространенных датчиков, позволяющих измерять давление, является струнный датчик (рис. 3.37). Действие такого датчика основано на преобразовании силы натяжения струны 3, закрепленной между двумя сильфонами 2, в частоту f переменного тока (частоту колебаний струны). Частота малых колебаний струны определяется соотношением:

$$f = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{F}{ys}}, \qquad (3.38)$$

где l – длина струны; F – сила, растягивающая струну; g – ускорение силы тяжести; y – удельный вес материала струны; s – площадь попе-

речного сечения струны. При изменении атмосферного давления изменяется сила натяжения струны сильфонами. Так как параметры l и s при этом остаются постоянными (при малых изменениях давления), то изменяется частота колебаний f. Для возбуждения и последующего поддержания незатухающих колебаний струна помещена в поперечное магнитное поле (проходит между полюсами постоянного магнита 4), а электрически изолированные концы струны подключены к входу усилителя с положительной обратной связью. Таким образом, струнный датчик атмосферного давления представляет собой генератор с самовозбуждением, называемый струнным генератором, резонатором которого служит струна. Обычно струнные генераторы работают в области звуковых частот (4–5 кГц).

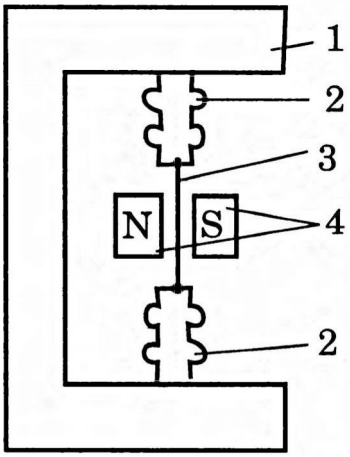


Рис. 3.37. Принципиальная схема струнного датчика давления

1 – П-образная рама; 2 – сильфоны; 3 – струна; 4 – возбуждающий магнит

Струнный датчик атмосферного давления выгодно отличается от других устройств измерения давления с помощью сильфонов или анероидных коробок тем, что благодаря большой продольной жесткости струны (в несколько раз большей, чем у сильфонов) сильфоны работают без остаточных деформаций, чем практически почти полностью исключается явление гистерезиса и обеспечивается более высокая точность измерения давления. Давление атмосферы P через частоту колебаний f струны можно выразить следующим приближенным уравнением:

$$P \approx p_0 + \beta f^2, \qquad (3.39)$$

где p_0 – некоторое постоянное давление внутри сильфонов; β – коэффициент, определяемый эмпирически и зависящий от параметров струны, сильфонов и ускорения силы тяжести. Струнные датчики, используемые на опорной и определяемой станциях, подбирают с одинаковыми параметрами p_0 и β.

Пусть на опорной станции 1 и определяемой 2 установлены струнные датчики давления. Тогда для одного и того же физического момента времени давление p_1 и p_2 можно представить в виде:

$$p_1 = p_0 + \beta f^2_1;\ p_2 = p_0 + \beta f_2^2,$$

откуда разность давлений

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \beta(f^2_1 - f^2_2), \qquad (3.40)$$

где $f_0 = (f_1 + f_2)/2$, $\Delta f = f_1 - f_2$ – разность частот. Обозначая $2\beta f_0 = E$ и подставляя значение Δp из (3.40) в (3.37), получим рабочую формулу баропрофилографа:

$$\Delta h = E\,\varepsilon\Delta f. \qquad (3.41)$$

Барическую ступень E определяют как функцию температуры и давления воздуха, значения которых измеряют в процессе нивелирования.

Наиболее точные определения высот барометрическим нивелированием можно получить дифференциальным путем с помощью двух станций: опорной и определяемой. Опорную станцию устанавливают на участке изысканий неподвижно и на ней непрерывно измеряют давление воздуха. Определяемую устанавливают на каком-либо транспортном средстве и перевозят по точкам, высоты которых нужно определить, или по заданному направлению — для получения непрерывного профиля местности. Обработка результатов полевых измерений осуществляется в камеральных условиях с использованием данных, полученных на опорной (базовой) станции и на подвижной станции для одного и того же момента времени. Для получения результатов измерений непосредственно в поле, т.е. в момент измерений (в реальном масштабе времени), информация о давлении на определяемой станции передается в виде радиочастотных сигналов на опорную станцию, на которой автоматически выделяется разностное давление Δp. Превышения искомых точек все время определяют относительно опорной станции. Для получения абсолютных отметок к полученным превышениям надо прибавить абсолютную высоту установки опорной станции.

Формула (3.35) получена в предположении, что атмосфера неподвижна. В действительности в атмосфере имеет место действие таких факторов, как приливо-отливные явления, движение воздуха в горизонтальном и вертикальном направлениях из-за неравномерного его нагревания и т. д. Это приводит к колебаниям давления атмосферы, которые можно разделить на периодические и случайные. Периодические колебания имеют период, близкий к 24, 12, 8 и 6 ч. Наиболее резко выражена амплитуда двенадцатичасовых колебаний, достигающая в экваториальных областях 4 мбар, что эквивалентно изменению высоты до 40 м. По мере увеличения широты амплитуда этих колебаний уменьшается. Для периодических колебаний характерен глобальный характер, примерно одинаково сказывающийся на всех точках небольшого участка местности. Синхронизация наблюдений на опорной и определяемой станции (дифференциальный метод измерений) позволяет бороться с периодическими колебаниями, так как очевидно, что если давление одинаково изменилось на опорной и определяемой станциях, то в разности давлений это изменение исключится. Случайные колебания давления являются фактором, определяющим точность барометрического нивелирования. Они представляют собой «локальный всплеск» давления с последующим затуханием колебаний в пределах от десятых долей секунды до нескольких минут, амплитуда

их может составлять десятые доли миллибара. Из всей массы факторов, вызывающих случайные колебания давления, следует отметить тепловую конвекцию и турбулентность.

Тепловая конвекция представляет собой неупорядоченное движение воздуха по вертикали, обусловленное нагреванием его от земли. Она наиболее резко выражена в ясные безветренные дни. В период изотермии, имеющей место в утренние и вечерние часы, тепловая конвекция уменьшается. Турбулентность – вихревое движение воздуха, обусловленное обтеканием воздушным потоком неровностей поверхности Земли, а также нарушением устойчивости воздушной среды от неравномерного ее прогревания. Меры борьбы со случайными колебаниями давления – это правильный выбор времени наблюдений и (частично) синхронизация наблюдений на опорной и определяемой станциях. Экспериментальным путем доказано, что наиболее точные результаты нивелирования могут быть получены днем и ночью в пасмурную, туманную, безветренную погоду и в период изотермии.

Отечественной промышленностью в последние годы выпускалось несколько типов высокоточных микробарометров: МБ, МБНП, МБ-63, СМБ-1, СМБ-2, М-111 и др. Эти приборы позволяют повысить точность измерения атмосферного давления до 0,01–0,03 мбар, что обеспечивает в равнинной местности на площадке 30х30 км получение высот с точностью 0,5–1 м, а на площадке 3х3 км — 0,1–0,3 м. Среди этих приборов представляет интерес струнный микробарометр (СМБ), который может быть изготовлен как дифференциальный прибор, обеспечивающий автоматическую синхронизацию наблюдений на двух – определяемой и опорной – точках; выделение разностного давления и запись полученых данных в цифровом виде, которые могут быть использованы для построения профиля местности в заданных вертикальном и горизонтальном масштабах. Одной из последних разработок является электронно-цифровой микробарометр – высотомер ЭЦМБ-2, который предназначен для определения превышений (высот} пунктов барометрическим способом [96]. Прибор выполняет измерение времени, давления и вычисление превышений (высот), индикацию всей информации и по запросу оператора распечатку ее на принтере непосредственно с прибора, хранение в памяти. Управление прибором осуществляется при помощи пульта.

Программное обеспечение прибора позволяет осуществить ввод дополнительных параметров, необходимых для вычисления превышений по полной барометрической формуле, ввод фактического номера пункта измерений, ввод высоты опорных точек, уравнивание хода по звеньям между опорными точками, передачу информации в ЭВМ для комплексной (сейсморазведка, гравиразведка) обработки материалов или длительного хранения. При работе двумя приборами в дифференциальном режиме (один прибор на баростанции, другой в

рейсе) производится синхронизация измерений, что позволяет автоматически исключить влияние вариаций атмосферного давления во времени. Возможно использование нескольких приборов, работающих в одном режиме синхронизации.

В приборе использован термостатированный кварцевый пьезорезонансный датчик давления. Температура датчика устанавливается оператором в зависимости от температуры окружающей среды.

Питание прибора осуществляется от аккумуляторного блока 7,5 В, 7,0 А/ч или через разъем на боковой панели от внешнего источника постоянного тока 7—15 В. Встроенное зарядное устройство обеспечивает зарядку аккумуляторного блока в автоматическом режиме от сети 220 В за 6-8 часов.

Блок измерения температуры воздуха работает в режиме аспирации, подключается кабелем к разъему на верхней панели прибора и может быть поднят на высоту не менее двух метров. Работа оператора в маршруте заключается в наборе на клавиатуре прибора номера пункта измерений и нажатии кнопки. Прибор на баростанции (базовой станции) работает в автоматическом режиме.

Технические характеристики ЭЦМБ-2

1. Рабочий диапазон измерений:	давление, гПа	от 1100 до 500
	температура воздуха, °С	от −40 до +50
	высота, м	от −500 до 5000
2 Рабочая температура прибора, °С:		от −30 до +50
3. Погрешность отсчета:		
	давление, гПа	0,001
	температура воздуха, °С	0,1
	высота, м	0,01
	время, с	1,0
4. СКО результата измерений	разность давления. гПа	0,01
	температура воздуха, °С	0,5
	превышение, м	от 0,3 до 1,0
(в зависимости от применяемой технологии работ и технических условий)		
5. Время измерений на пункте (по выбору оператора), с		от 3 до 60
6. Потребляемая мощность, Вт:		от 0,5 до 2
7. Масса прибора с блоком питания, кг		3,2
8. Габариты, мм		95x200x250
9. Объем памяти, точек в маршруте		1000

Баропрофилограф. В СССР еще в 1970 г. был разработан баропрофилограф, который устанавливался на автомобиле и позволял автоматически получать профиль местности [111]. Баропрофилограф, структурная схема которого показана на рис. 3.38, представляет собой прибор, позволяющий определять отметки точек дифференциальным способом. Он состоит из двух станций с радиотелеметрической аппаратурой для передачи информации о давлении атмосферы и



Рис. 3.38. Структурная схема баропрофилографа
а) определяемая станция; б) опорная (базовая) станция

пройденном пути с определяемой станции на опорную. На выходе опорной станции включен самописец, вычерчивающий непрерывный профиль местности, по которой движется определяемая станция. Определяемая станция во время работы передвигалась по определяемым точкам или профилю. Струнный генератор (датчик давления) размещался над задней осью автомашины, возможно ближе к ней, с тем, чтобы он повторял все вертикальные перемещения колеса, совершающего наезд на нивелируемую точку или прокатку по заданному профилю. Сигнал частоты f_1, зависящий от давления воздуха, поступал в передатчик и излучался в эфир.

Датчиком пути являлось переднее колесо автомашины. Датчик (контактный прерыватель) отсчитывал количество оборотов колеса. Сигналы контактного прерывателя модулируют частоту вспомогательного генератора, и информация о расстоянии в виде последовательности модулирующих импульсов передается в эфир. При необходимости привязки профиля или искомых точек в плане включался гироскопический курсопрокладчик топографического привязчика (на рис. 3.38 курсопрокладчик не показан), и по команде оператора опорной станции визуально со счетчиков координат (или графически – по карте) оператор определяемой станции снимал координаты x и y или азимут профиля.

Опорная станция устанавливается приблизительно в середине участка изысканий. При необходимости получения абсолютных отметок искомых точек станция устанавливается на точке с известной высотой. Частота f_1 определяемой станции улавливается приемником и поступает в смеситель. В этот же смеситель поступает частота f_2 от струнного генератора (датчика давления) опорной станции. В смесителе выделяется разностная частота $\Delta f = f_1 - f_2$. Постоянный

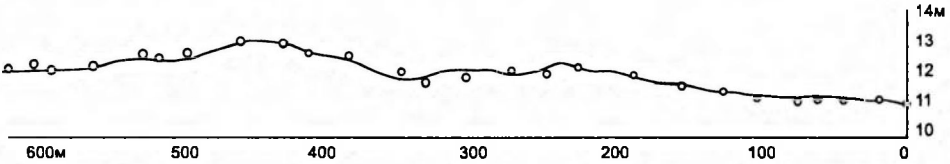


Рис. 3.39. Образец записи профиля
Волнистая линия – барометрический профиль; кружки – точки барометрического профиля

ток, пропорциональный величине $E\varepsilon\Delta f$ [см. (3.40)], поступает на вход самописца, который вычерчивает измеряемый профиль (рис. 3.39).

На основании многочисленных оценок точности по истинным ошибкам точность барометрического нивелирования при удалении определяемой станции от опорной до 4 км характеризуется средней квадратической ошибкой (м) определения высоты точки.

$$m_h = [0{,}09 + (0{,}08\sqrt{n})],$$

где n – количество рейсов по профилю (количество определений высоты данной точки).

Обычно нивелирование выполняется в прямом и обратном направлениях (n = 2). В этом случае $m_h = 0{,}20$ м.

В настоящее время на основе электронно-цифрового микробарометра-высотомера ЭЦМБ-2 производственным предприятием «Центргеокомплекс» разработано устройство ИГ-3К, которое обеспечивает одновременное определение плановых координат и высот при производстве геофизических съемок в различных физико-географических условиях, включая залесенную местность. Эти приборы снабжены спутниковыми системами определения координат, имеют большой объем памяти и компактны (см. 4.3).

В случае использования внешнего модема комплект, состоящий из двух таких приборов, может работать в реальном масштабе времени в качестве баропрофилографа. Скорость нивелирования с помощью такого баропрофилографа с встроенным GPS-приемником довольно высока и позволяет осуществлять не только планово-высотную съемку местности, но и весь комплекс изысканий, включая и скоростной вынос проекта в натуру.

ГЛАВА 4
СПУТНИКОВОЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

4.1. Общие сведения об определении положения точек по спутникам

Еще с доисторических времен для человек ориентирования использовал небесные светила. Обычно мореплаватели ориентировались по звездам, указывающим направление движения: зная среднюю скорость и время в пути, можно было сориентироваться в пространстве и определить расстояние до конечного пункта назначения. Однако при плохих погодных условиях сбиться с курса не представляло особого труда. С появлением компаса задача значительно упростилась, так как уменьшилась зависимость от погоды. Позднее для определения местоположения в океане, т.е. в навигации, использовались угловые наблюдения небесных тел. Вначале термин «навигация» относился к управлению морскими судами (navis, означающее «корабль», и agere – управлять, передвигать), затем этот термин стал применятся к любому виду транспортного средства. Отметим, что понятие навигации, данное в книге «American Practical Navigator», изданной в 19 веке, трактуется следующим образом: «Навигация – это процесс управления движением транспортным средством, быстрый и безопасный, из одной точки в другую». В навигации необходимо знать местоположение и направление движения в текущий момент времени. Важной информацией является скорость перемещения объекта. Но даже при самых точных угловых наблюдениях небесных тел, точность определения местоположения этим методом составляла не более 1 мили. Вместе с тем требуемая точность существенным образом зависит от вида работ, типа транспортного средства и условий передвижения. Например, для безопасного управления судами в открытом океане, необходимая точность местоопределения составляет несколько километров, в то время как в прибрежных водах — 2–5 м. Аналогичны требования к точности и для воздушных судов. Во время полета над океаном требуемая точность определения высоты самолета составляет около 100 м, а при посадке на этапе глиссады для пассажирского самолета – 0,3 м.

Появление искусственных спутников Земли произвело переворот в методах геодезии и значительно повысило точность навигации и определения положения точек и объектов на поверхности Земли.

С созданием радиолокационных станций стало возможным измерять параметры движения и относительное местоположение спутника по отраженному от его поверхности лучу радиолокатора. Появилась возможность измерения параметров движения спутника по излучае-

мому сигналу. В 1957 г. в СССР группа ученых под руководством В.А. Котельникова экспериментально подтвердила возможность определения параметров движения искусственного спутника Земли (ИСЗ) по результатам измерений доплеровского сдвига частоты сигнала, излучаемого этим спутником. При этом была установлена возможность решения обратной задачи — нахождения координат приемника по измеренному доплеровскому сдвигу сигнала, излучаемого с ИСЗ, если параметры движения и координаты этого спутника известны [40]. При движении спутник излучает сигнал определенной частоты, который несет информацию об его положении на орбите. Если измерить частоту принятого сигнала и сравнить ее с эталонной, то можно вычислить доплеровский сдвиг частоты, обусловленный движением спутника. При непрерывном измерении можно составить своего рода функцию изменения частоты Доплера (то есть доплеровского сдвига частоты). Частота Доплера непрерывно изменяется и в какой-то момент становится равной нулю, затем изменяет знак. В момент равенства нулю частоты Доплера приемник находится на линии, которая является нормалью к вектору движения спутника. Измерив момент времени, когда частота Доплера равна нулю, и используя зависимость крутизны кривой доплеровской частоты от расстояния между приемником и ИСЗ, можно вычислить координаты приемника. При этом спутник становится радионавигационной опорной станцией, координаты которой изменяются во времени вследствие движения спутника по орбите, но заранее могут быть вычислены для любого момента времени благодаря эфемеридной информации, заложенной в навигационном сигнале спутника.

В 1963 г. начались работы по построению первой отечественной низкоорбитальной навигационной спутниковой системы «Цикада». В 1967 г. на орбиту был выведен первый отечественный навигационный спутник «Космос-192». Для радионавигационных спутниковых систем первого поколения характерным является применение низкоорбитальных ИСЗ и использование для измерения навигационных параметров объекта сигнала одного, видимого в данный момент спутника.

Ошибка в определении координат для подвижного объекта составляла ~500 м. Для неподвижного объекта эта величина уменьшается до 50 м.

Идеи использования космических аппаратов для навигации подвижных объектов в США начали развиваться после запуска в СССР в 1957 году первого искусственного спутника Земли. В это время была поставлена задача слежения за советским ИСЗ посредством приема его сигнала на наземном пункте с известными координатами, выделения доплеровского сдвига несущей частоты передатчика ИСЗ и дальнейшего расчета параметров движения спутника. Одновременно решалась и обратная задача расчета координат приемника на основе обработки принятого сигнала и координат ИСЗ.

На этой основе в интересах навигационного обеспечения в 1964 г. была создана доплеровская спутниковая радионавигационная система первого поколения «Transit», предназначенная для навигационного обеспечения пуска с подводных лодок баллистических ракет «Поларис». После того, как в 1967 г. эта система была предоставлена для коммерческого использования, число гражданских потребителей быстро превысило число военных. Координаты потребителя рассчитывались на основе приема и выделения доплеровского сдвига частоты передатчика одного из 6—7 навигационных космических аппаратов, который мог находиться в поле видимости в течение примерно 40 мин.

Так же, как и в системе «Цикада», в системе «Transit» координаты источника вычисляются по доплеровскому сдвигу частоты сигнала одного из 7 видимых спутников, которые имеют круговые полярные орбиты с высотой над поверхностью Земли ~ 100 км. Период обращения спутников «Transit» равен 107 минутам.

Спутниковые низкоорбитальные доплеровские радионавигационные системы имеют ряд существенных недостатков. В первую очередь — это недостаточная точность определения координат объектов. К недостаткам можно отнести также отсутствие непрерывности в измерениях, так как спутники имеют низкие орбиты, и поэтому время, в течение которого спутник находится в поле видимости потребителя, не превышает одного часа. Кроме того, время между прохождением различных спутников зоны видимости зависит от географической широты, на которой он находится, и может составить величину от 35 до 90 минут. Сокращение этого времени за счет наращивания числа спутников невозможно, потому что все спутники излучают сигналы на одной и той же частоте.

Для определения взаимного расположения спутников их можно синхронно наблюдать с нескольких наземных станций. Сам спутник при этом может играть пассивную роль (например, отражая луч лазера, посланный с наземной станции, обратно на ту же станцию) или активную роль (непрерывно осуществляя передачу радиосигнала). На первых этапах развития космической геодезии сигналы подавались в виде вспышек света, которые фотографировались на фоне звезд одновременно с нескольких наземных пунктов, находящихся вне прямой видимости. Положение спутника на фотографии относительно опорных звезд давало возможность определить точное направление на него с данной станции наблюдения.

В настоящее время для определения местоположения на земной поверхности обычно измеряют расстояние между наземным пунктом и спутником, а также скорость изменения этого расстояния при прохождении спутника. Расстояния рассчитывают, исходя из времени, которое затрачивает электромагнитный сигнал (лазерная вспышка или радиоимпульс) на прохождение пути от спутника до принимающей станции при условии, что скорость распространения сигнала известна. Скорость

изменения расстояния между спутником и принимающей станцией определяется по величине наблюдаемого доплеровского сдвига частоты – изменения частоты сигнала, поступающего со спутника. Вводятся поправки за атмосферную задержку сигнала и рефракцию. Основной принцип спутниковой геодезии – это использование трилатерации, т.е. измеряются расстояния до спутников, являющихся точками отсчета для вычисления координат на Земле. Все остальное, что относится к системе, – всего лишь технические решения, предназначенные для облегчения этого процесса, для того чтобы выполнить его точнее и проще.

Начало этим работам как в СССР, так и в США положило появление атомных часов в 1960 году, что позволило создать для целей навигации сеть точно синхронизированных передатчиков, передающих кодированные сигналы. Координаты приемника определялись по временным задержкам сигнала. Этот принцип был реализован при запуске в 1967 г. спутника ВМС США TIMATION-I. В 1969 г. был запущен спутник TIMATION-II-82B. Оба спутника были оборудованы бортовыми эталонами времени и частоты на основе кварцевого генератора (стандарта).

В 1964 г. в США началось исследование возможностей использования для целей местоопределения широкополосных сигналов, модулированных псевдослучайными шумовыми кодами, что на основе корреляционного разделения таких сигналов давало возможность использования несколькими передатчиками одной несущей частоты.

Наиболее перспективными космическими системами, использующими указанные принципы измерений и служащими для решения геодезических задач, являются системы глобального определения местоположения ГЛОНАСС (РФ), GPS (США) и Galileo (европейская система). Эти системы являются исключительно точным инструментом для решения прикладных задач геодезии, геофизики и землепользования. Они предназначены для высокоточного определения трех координат места, составляющих вектора скорости и времени различных подвижных объектов. Наиболее используемой в настоящее время является спутниковая система GPS (Global Positioning System), с которой связано появление нового термина – позиционирование (positioning). Под позиционированием понимается определение местоположения объекта, скорости его перемещения, пространственного вектора между пунктами наблюдения и точного времени определения его местоположения. Разработка этой системы началась в 1973 г. Эксплуатационная готовность объявлена в 1995 г.

Система разработана по заказу и находится под управлением МО (ВВС) США. В интересах мирового сообщества она используется в соответствии с особыми положениями. США предоставляют систему в стандартном режиме для гражданского, коммерческого и научного использования. За использование системы гражданскими потребителями ответственность несет Министерство транспорта США.

Российская спутниковая система называется ГЛОНАСС – глобальная навигационная спутниковая система, разработки которой начаты в середине 1970-х годов, а в 1995 г. Правительство РФ специальным постановлением за № 237 открыло систему для гражданского применения и международного сотрудничества. В Российской Федерации на использование спутниковых приемников глобального позиционирования введены ограничения – для их применения требуется лицензия. Основным разработчиком и создателем по системе в целом и по космическому сегменту является НПО прикладной механики (г. Красноярск), а по навигационным космическим аппаратам – ПО «Полет» (г. Омск). Головным разработчиком радиотехнических комплексов является РНИИКП; ответственным за создание временного комплекса, системы синхронизации и навигационной аппаратуры потребителей определен Российский институт радионавигации и времени [132]. До завершения полного развертывания системы ГЛОНАСС низкоорбитальные навигационные системы, по-видимому, сохранят свою роль.

С 2005 г. начинает функционировать европейская система под названием Galileo, а в 2008 г. вся система будет готова к работе. К этому времени суммарное количество спутников, используемых для позиционирования, будет равно 80 (с учетом спутников Galileo, а так же ГЛОНАСС и GPS).

Как уже отмечалось, в настоящее время для определения местоположения на земной поверхности обычно измеряют расстояние между наземным пунктом и спутником и скорость изменения этого расстояния при прохождении спутника.

В том случае, когда измеряется расстояние до одного спутника с известными координатами, местоположение определяемой точки должно быть на воображаемой сфере с центром, находящимся на этом спутнике, и радиусом R, равным измеряемому расстоянию S_1 (рис. 4.1, а).

Когда одновременно измеряется расстояние S_2 до второго спутника, то область поиска сократится, так как место положение определяемой точки будет находиться на линии пересечения двух сфер с радиусами S_1 и S_2, т.е. на окружности (рис. 4.1, б).

В случае измерения расстояния S_3 до третьего спутника возможное местоположение определяется двумя точками пересечения окружности со сферой радиуса S_3 (рис. 4.1, в).

Одну из этих двух точек можно не принимать во внимание, так как одна из точек располагается слишком далеко от поверхности Земли либо имеет неправдоподобно большую скорость движения. Например, когда точно известна высота определяемой точки (например, корабли всегда находятся на уровне моря), то можно исключить одно из измерений. Одну из сфер на рисунках можно заменить на сферу с центром в центре Земли и радиусом, равным ее радиусу плюс высота. Некоторые

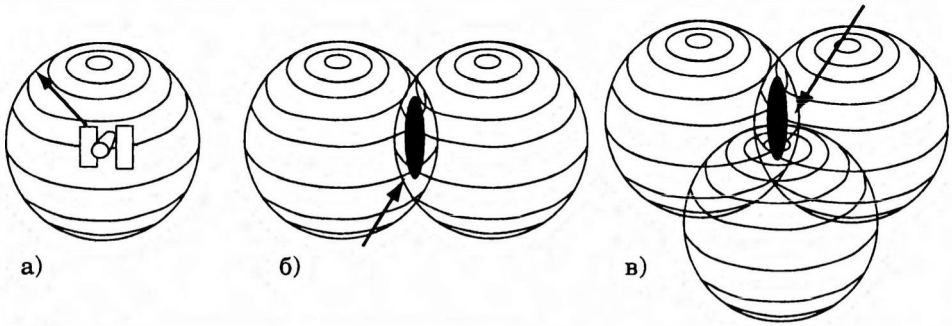


Рис. 4.1. Определение местоположения точки
а) по одному спутнику с известными координатами; б) по двум спутникам; в) по трем спутникам

приемники могут быть переключены в режим определения двух горизонтальных координат.

Для того чтобы определить истинное местоположение из этих двух точек (рис. 4.1, в), можно измерить расстояние S_4 до четвертого спутника. Можно обойтись и тремя спутниками, если логически исключить неправдоподобное решение. Различные методы наблюдений позволяют определять абсолютное и относительное положение объектов на земной поверхности. При определении абсолютного положения используется не менее трех спутников. Чтобы компенсировать разницу в точности определения времени по часам, установленным на борту спутников и на наземной станции, обычно требуется еще и четвертый спутник. Определение относительного положения пункта на земной поверхности требует одновременного наблюдения с четырех и более спутников с двух (или более) наземных станций. Для определения координат точек на земной поверхности в геоцентрической системе необходимо знать элементы орбит спутников в этой же системе, так как любые погрешности в их определении вызывают ошибки получаемых данных. Эти погрешности могут быть уменьшены путем осреднения наблюдаемых величин за несколько дней, недель или месяцев. Часть систематических погрешностей в расчетах элементов орбиты примерно в одинаковой степени вносит искажения при определении всех точек, и поэтому при определении их взаимного положения компенсируется. Вследствие этого относительные положения точек на земной поверхности обычно определяются с большой точностью. В зависимости от числа одновременно работающих принимающих станций и одновременно наблюдаемых спутников можно получать определенные различия между принимаемым и передаваемым сигналами; это позволяет исключить влияние неизвестных факторов. В спутниковых методах определения местоположения измерение расстояний до спутников осуществляется по измерениям времени прохождения радиосигнала от космического

аппарата до приемника. При этом передающее устройство размещено на спутнике, а приемник – на определяемой точке. Радиосигнал проходит измеряемое расстояние S от спутника (передатчика) до приемника за время x. Время излучения и время приема данного сигнала точно определяют синхронизированными часами, которые расположены на спутнике и на определяемой точке. При этом измеряемое расстояние определяют по формуле:

$$S = v\tau. \qquad (4.1)$$

Так как скорость v радиоволны составляет около 300 000 км/с, то для обеспечения геодезической точности измерений необходимо измерять время с точностью 10^{-10}–10^{-12} с. Главной трудностью при измерении времени распространения радиосигнала является точное выделение момента времени, в который сигнал передан со спутника.

Для обеспечения высокой точности измерений синхронизируют опорные генераторы передатчика (спутника) и приемника. В светодальномерных и радиодальномерных измерениях используются импульсные и фазовые методы измерения расстояний, а также их сочетания. Эти же методы используются в спутниковых дальномерных измерениях. При этом широко используются кодированные сигналы.

4.2. Спутниковые системы навигации ГЛОНАСС, Navstar, Galileo

Как уже отмечалось, наиболее перспективными космическими системами, служащими для решения геодезических задач, являются системы глобального определения местоположения ГЛОНАСС (РФ), Navstar (США) и Galileo (европейская система). Функционирующими на данный момент являются две глобальные спутниковые радионавигационные системы второго поколения – это российская (ранее советская) система ГЛОНАСС (глобальная навигационная спутниковая система) и американская, называемая «Navstar» (Navigational Satellite Time and Ranging – навигационный спутник измерения времени и координат) или по ее фактическому назначению GPS (Global Positioning System – глобальная система местоопределения). Система ГЛОНАСС, как Navstar, считается системой двойного назначения, то есть может использоваться как в военных, так и в гражданских целях, и разработана по заказу Министерства обороны. По своему назначению и построению система ГЛОНАСС подобна американской Navstar и по выходным показателям не уступает ей. Система ГЛОНАСС является беззапросной, поэтому количество потребителей системы не имеет значения. Спутниковые системы, помимо навигационных определений, позволяют производить высокоточную взаимную синхронизацию стандартов частоты и времени на удаленных наземных объектах и взаимную геодезическую привязку, а также определять ориентацию объекта на основе измерений, производимых от четырех приемников сигналов навигационных спутников.

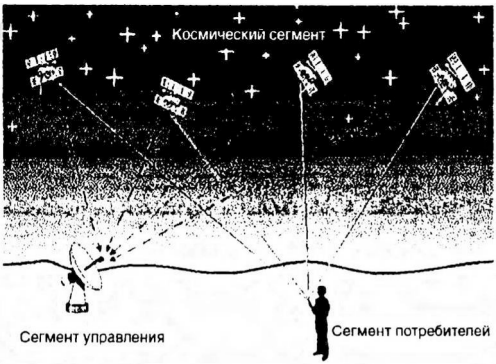


Рис. 4.2. Сектора спутниковой системы навигации

Основными достоинствами спутникового позиционирования являются всепогодность, глобальность, оперативность, точность и эффективность. Эти качества зависят от баллистического построения системы, высокой стабильности бортовых эталонов частоты, выбора сигнала и способов его обработки, а также от способов устранения и компенсации погрешностей. Параметры систем и их отдельных элементов, а также математическое обеспечение выбираются так, чтобы ошибка навигационных определений по координатам была не более 10 м, а по скорости до 0,05 м/с.

Современные системы спутникового позиционирования состоят из трех частей, получивших название секторов (подсистем) (рис. 4.2):

1) космический сектор, включающий в себя набор спутников, который называют «созвездием»;

2) сектор управления и контроля, состоящий из центральной (ведущей) станции и нескольких станций слежения, расположенных в разных точках земного шара. Кроме того, имеются средства развертывания и восполнения системы (космодром);

3) сектор пользователей, включающий в себя широко распространенную аппаратуру пользователей.

Космический сектор спутниковых систем

На космических аппаратах спутниковых систем устанавливается аппаратура, необходимая для функционирования спутника, с которого передается информация для выполнения измерений. Для обеспечения возможности одновременных наблюдений не менее 4-х спутников в любой точке земного шара каждое из «созвездий» имеет на круговых орбитах около 24–27 рабочих спутников и несколько запасных (рис. 4.3). Количество орбит, период обращения (около 12 час.) и места расположения спутников выбираются так, чтобы они могли обеспечить по возможности равномерное их распределение

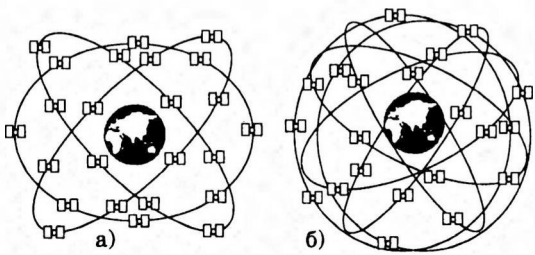


Рис. 4.3. Космический спектр спутниковых «созвездий»:
а) ГЛОНАСС; б) Navstar

на небосводе. Высота орбит, лежащих в 3–6 пересекающихся плоскостях, составляет около 20 000 км, а наклонение орбит — 55–65°. На каждой из орбит равномерно размещается от 3 до 8 спутников. (В системе Navstar предусматривается размещение 24 спутников в 6 плоскостях, отстоящих друг от друга на 60° градусов, а в системе ГЛОНАСС и Galileo решено ограничиться тремя плоскостями, на которых также должно находиться 24 и 27 спутников соответственно).

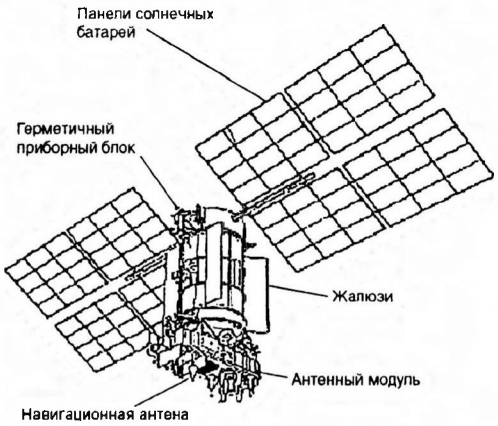


Рис. 4.4. Навигационный спутник

Каждый спутник (рис. 4.4) имеет солнечные источники питания и работающие в буферном режиме аккумуляторные батареи. В «период затмения», когда спутник находится на теневой стороне планеты, используется энергия батареи, поскольку на солнечные панели не падает свет. Кроме того, поддерживается связь между ведущей станцией и удаленными станциями сектора управления и контроля. Внутри корпуса, помимо радиотехнической аппаратуры и инерциальной системы для ориентирования спутника, установлен реактивный двигатель с запасом топлива, предназначенный для корректировки орбитального положения спутника в течение всего срока эксплуатации (5–15 лет). На спутнике также имеется радиоприемное устройство для приема информации, передаваемой с земли сектором управления и контроля.

Сравнительные характеристики систем ГЛОНАСС, GPS и Galileo приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Технические характеристики спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS и Galileo

Показатель	ГЛОНАСС	GPS	Galileo
Число КА в полной орбитальной группировке	24 (3)	24 (3)	27 (3)
Число орбитальных плоскостей	3	6	3
Число КА в каждой плоскости	8	4	9
Наклонение орбиты	64,8°	55°	56°
Высота орбиты, км	19 130	20 180	
Период обращения спутника	11 ч. 15 мин. 44 с.	11 ч. 58 мин. 00 с.	

Система координат	ПЗ-90	WGS-84	
Масса навигационного КА, кг	1450	1055	
Мощность солнечных батарей, Вт	1250	450	
Срок активного существования на орбите, лет	3–10	7,5	
Средства вывода КА на орбиту	«Протон-К/ДМ»	Delta-2	
Число КА, выводимых на орбиту за 1 запуск	3	1	
Космодром	Байконур (Казахстан)	Мыс Канаверел (Cape Canaveral)	
Эталонное время	UTS (SU)	UTS (NO)	
Метод доступа	FDMA	CDMA	
Несущая частота МГц, L1/E1 МГц, L2 МГц, L5	 1598,0625–1604,25; $^{7}/_{9}$ L_1	 1575,42– 1227,60 1176,45	 1575,42– 1227,60 1176,45
Поляризация	Правосторонняя	Правосторонняя	Правосторонняя
Тип псевдошумовой последовательности	m-последовательность	код Голда	
Число элементов кода С/А Р	 511 51x1000	 1023 2,35x1014	
Скорость кодирования Мбит/с: С/А Р	 0,511 5,11	 0,023 10,23	
Уровень внутрисистемных радиопомех, дБ	–48	–21,6	
Структура навигационного сообщения			
Скорость передачи, бит/с	50	50; 250	
Вид модуляции	BPSK (Манчестер)	BPSK NRZ	
Длина суперкадра, мин.	2,5 (5 кадров)	12,5 (25 кадров)	
Длина кадра, с	30 (15 строк)	30 (5 строк)	
Длина строки, с	2	6	

В Советском Союзе испытания системы ГЛОНАСС начались в 1982 г. Используемая методика требует нахождения в любой момент времени в поле зрения каждого пользователя не менее 4 спутников, поэтому высоты орбит и количество спутников в системах второго поколения значительно увеличены. Развертывание первой фазы системы, предусматривающей использование 10–12 ИСЗ в двух плоскостях, завершилось в 1991 г. В феврале 1992 г. количество работающих одновременно спутников впервые достигло 12. В настоящее время (2006 г.) количество работающих спутников ГЛОНАСС составляет 17.

Спутники системы ГЛОНАСС доставляются на рабочую орбиту 4-ступенчатыми носителями «Протон» по 3 штуки в одном пуске. При начальном периоде обращения 675 минут спутники дрейфуют вдоль рабочей орбиты до назначенных точек расположения, где и стабилизируются с помощью бортового двигателя, доводя период обращения до 675,7 минуты. Высота орбиты – 19100 км, наклонение (угол, образуемый плоскостью орбиты и плоскостью экватора) – 64,8°, период обращения – 11 ч. 15 мин. 44 с. Орбиты являются кратными и обеспечивают повторение наземной трассы каждого спутника через 8 суток по завершении им 17 витков. Это имеет определенные преимущества на начальном этапе, когда задействованы еще не все орбитальные плоскости и места расположения спутников. Кроме того, намного реже приходится корректировать орбиты.

ГЛОНАСС позволяет создавать сплошное навигационное поле над поверхностью Земли до высоты 2000 км, находясь внутри которого, потребитель в любой момент времени может принять радионавигационные сигналы не менее чем от четырех спутников. Время эксплуатации спутника первого поколения ГЛОНАСС-М – 5 лет, за это время параметры его орбиты не должны отличаться от номинальных значений больше чем на 5 %. Сам спутник весит до 1415 кг и представляет собой герметический контейнер диаметром 1,35 м и длиной 7,84 м, внутри которого размещается аппаратура. Каждый спутник построен на основе использования герметичного приборного отсека. Внутри отсека с помощью активного газового контура, системы жалюзи с электроприводами и набора управляемых обогревателей поддерживаются комфортные условия по температуре в диапазоне 0–40 °С. Там, где размещены блоки стандартов частоты, создана зона термостабилизации в пределах ±1 °С. Все тепловыделяющие приборы целевой аппаратуры размещены вне герметичного приборного блока на антенном модуле в зонах, не засвечиваемых Солнцем. Система коррекции, использующая двигательную установку, работает после выведения КА на орбиту в процессе приведения его в системную точку и позволяет удерживать КА в заданных пределах (±5° по аргументу широты) без последующих коррекций в течение всего срока функционирования КА. Ориентация продольных

и поперечных осей космического аппарата, а также солнечных батарей обеспечивается с помощью электромаховиков, периодически разгружаемых электромагнитами.

На втором этапе модернизации «созвездия» ГЛОНАСС используется космический аппарат «ГЛОНАСС-К», который имеет следующие отличительные особенности по сравнению с «ГЛОНАСС-М»:

а) введена третья частота в L-диапазоне для повышения точности и надежности навигационных определений потребителей;
б) срок активного существования КА увеличен до 10 лет;
в) масса КА уменьшена примерно в 2 раза;
г) размещается дополнительная полезная нагрузка, в т.ч. аппаратура спасения терпящих бедствие.

Космический аппарат (КА) «ГЛОНАСС-М» может выводиться по групповой схеме 3 КА одновременно с космодрома Байконур с использованием ракеты-носителя «Протон» («Протон-М») и по одиночной схеме с космодрома Плесецк с использованием ракеты носителя «Союз-2».

Как уже отмечалось, в настоящее время количество работающих спутников ГЛОНАСС составляет 17. До конца 2006 г. будут запущены еще три спутника «ГЛОНАСС-М», а в 2007 г. – еще три спутника. В 2008 г. планируется провести испытания спутника нового поколения «ГЛОНАСС-К», который имеет меньшую массу, лучшие характеристики и гарантированный срок работы на орбите 10–12 лет.

Американская система GPS, разработанная для Министерства обороны США и находящаяся под его управлением, по своим функциональным возможностям аналогична российской системе ГЛОНАСС. Навигационные космические аппараты системы GPS также проходили ряд усовершенствований. Ниже приведено краткое описание космических аппаратов, используемых в системе [132], в табл. 4.2 даны их технические характеристики.

Таблица 4.2

Краткие характеристики космических аппаратов Navstar

Тип НКА	Масса на орбите, т	Мощность энергоисточников, Вт	Расчетный срок активного существования, г.	Год запуска первого НКА
Блок-I	525	440	–	1978
Блок-II	844	710	5	1989
Блок-IIR	1094	1250	7,5	1997
Блок-IIF	–	–	14–15	2001–2002

Спутники BLOCK II (порядковые номера №№ 13–21) являются первым конструктивным типом спутников Navstar GPS, разработанных компанией Rockwell International. Спутники этого класса могут работать до 14 дней без взаимодействия с главной управляющей станций GPS. Девять спутников BLOCK II были запущены в период с февраля 1989 по октябрь 1990 г.

Спутники BLOCK IIA (порядковые номера №№ 22-40) являются спутниками второго поколения, разработанными компанией Rockwell International. Они способны работать 180 дней без контактов с главной управляющей станцией. В течение этого времени периоды деградирования точности могут быть легко обнаружены навигационным сообщением, передаваемым с каждого спутника. Запуск спутников этой группы был осуществлен с мыса Канаверел с ноября 1990 по ноябрь 1997 г. Плановый период эксплуатации для спутников группы BLOCK II/IIA составляет 7,3 года. На каждом спутнике размещено четверо атомных часов: двое цезиевых и двое рубидиевых.

Спутники BLOCK IIR (порядковые номера №№ 41–62) являются следующим поколением спутников, разработанных компанией Lockheed Martin. Спутники этой серии объединены в сеть для обмена навигационными данными между собой. Такая технология позволяет определять и обновлять ряд параметров их движения без связи с главной управляющей станцией. Плановый период эксплуатации для спутников такого класса составляет 7,8 года. На каждом спутнике размещено трое рубидиевых часов. Запуск спутников класса IIR осуществляется с января 1997 года.

Полнофункциональная система Navstar подразумевает минимум 24 спутника. В настоящее время по орбитам равномерно распределены тридцать рабочих спутников.

Космические аппараты первого поколения (Блок-I) обеспечивали нормальную работу системы без вмешательства сегмента управления в течение 3–4 дней. В аппаратах следующего поколения (Блок-II) этот срок был увеличен до 14 дней, а в новой модификации (Блок-IIR) позволяет автономно работать в течение 180 дней. Последняя модификация – аппараты Блок-IIF – используются взамен отработавших Блок-IIR и могут работать до 15 лет. В 2003 году начали запускать спутники модернизированной версии Block IIR-M, в которых предусмотрена модуляция частот L1 и L2 кодом C/A. В будущем предусмотрено введение третьей несущей частоты L5. В таблице 4.3 отражена программа дальнейшей модернизации GPS.

Таблица 4.3

Программа модернизации GPS

Действие	Дата реализации
Отключение избирательного доступа	май 2000
Модернизация спутников GPS IIR – L2CS на L2 – M-код на L1 и L2	2003–2010
Модернизация спутников GPS IIF – L2CS на L2 – M-код на L1 и L2 – L5	2005–2014
Модернизация спутников GPS III – L2CS на L2 – M-код на L1 и L2 с большей мощностью сигнала – L5 – возможные будущие расширения	2011 – до завершения
Модернизация Сегмента Контроля (OCS)	2000–2008

Созвездие Galileo создается с учетом опыта эксплуатации Navstar и ГЛОНАСС. Galileo будет состоять из 30 спутников в трех орбитальных плоскостях, каждая – с 9 спутниками, равномерно распределенными в пределах круговой орбиты и тремя активными резервными спутниками, которые необходимы в случае их отказа. В 4-м квартале 2005 г. запущен тестовый спутник. Практически готовы к запуску два аппарата. До 2008 г. предполагается осуществить запуск четырех спутников и создать наземную инфраструктуру. Ожидается, что эксплуатация системы Gallileo в полном объеме начнется до 2010 г. Ключевые параметры: орбитальный радиус – 29994 километра и склонение 56 градусов. Чтобы обеспечивать необходимую избыточность на орбите и производить быстрое восстановление, предполагается ввести по одному резервному спутнику в каждой орбитальной плоскости. Европейское сообщество запланировало предоставление пользователям системы Galileo четырех навигационных и одного поисково-спасательного сервиса. Основной сигнал системы Galileo, предназначенный для оказания услуги «Открытый сервис» («Open Service» – OS), состоит из шести различных навигационных сигналов на трех несущих частотах. Технические характеристики OS будут, по крайней мере, равны тем, какими их ожидают получить от модернизации текущего поколения спутников системы Navstar, запланированной к 2005 г., и будущей системы GPS III, архитектура которой сейчас разрабатывается.

Спутники системы Navstar тип IIF/III будут передавать широкополосные сигналы на трех гражданских (открытых) частотах (см. табл. 4.1). Одним из основных качеств системы Galileo является сов-

местимость и возможность взаимодействия с системой Navstar, что позволит уменьшить уязвимость систем позиционирования. Под этим подразумевается их защита или уменьшение вероятности одновременного выхода из строя двух систем. Для надежной работы все пользователи хотят иметь возможность отслеживать так много спутников, насколько это возможно, с целью увеличения качественных характеристик позиционирования и получения избыточных значений эффективности использования, целостности и непрерывности сигнала. Этого можно достичь, используя комбинированные многосистемные приемники.

Созвездия ГЛОНАСС и Navstar полного состава обеспечат непрерывную глобальную навигацию военных и гражданских потребителей за счет использования двух типов сигналов: стандартной точности для гражданских потребителей и высокой точности для военных потребителей.

Помимо этого, не исключено постепенное объединение ресурсов ГЛОНАСС и Galileo и формирование единой глобальной системы, совладельцами которой станут Россия и Евросоюз.

Сектор управления и контроля

Как уже отмечалось, определение местоположения точки на земной поверхности осуществляется по спутникам, положение которых известно. При абсолютном методе определения координат, когда используются данные только одного приемника, ошибка определения координат будет такого же порядка, что и точность определения параметров орбиты.

Как правило, параметры, используемые для вычисления орбит, нестабильны и требуют постоянного уточнения. Спутники, используемые для этих целей, находятся на высоких орбитах, где влияние атмосферы на движение спутника не сказывается. Поэтому полет спутника по орбите вокруг Земли описывается простыми математическими соотношениями. Спутники выводятся на свои орбиты достаточно точно. Так как торможение из-за влияния атмосферы отсутствует, то изменения орбиты и периода обращения в течение длительного времени достаточно малы и вызваны такими явлениями, как гравитационное притяжение Луны и Солнца, солнечное световое давление на спутник и др. факторами, которые приведены в табл. 4.4. Несмотря на незначительную величину все эти силы могут вносить существенные изменения в орбиту космического аппарата [184]. Существует также множество других сил, таких как эффект сопротивления среды, но они настолько малы, что их можно не учитывать.

Таблица 4.4

Факторы, влияющие на изменение орбиты спутника

Сила	Ускорение (м/сек^2)
Земная гравитация (смоделированная как точечная масса)	$6{,}1x10^{-1}$
Лунная гравитация	$3{,}9x10^{-6}$
Солнечная гравитация	$1{,}0x10^{-6}$
Суммирующий эффект гравитационных полей Земли, коэффициенты от 2,1 до 4,4	$2{,}2x10^{-7}$
Давление солнечной радиации	$7{,}2x10^{-6}$
Суммирующий эффект гравитационных полей Земли, коэффициенты от 5,0 до 8,8	$5{,}9x10^{-5}$
Альбедо (отражение от Земли)	$1{,}5x10^{-5}$
Обратное тепловое излучение	$1{,}4x10^{-4}$
Приливные силы от восхода Луны	$1{,}3x10^{-4}$
Приливные силы от восхода Солнца	$4{,}5x10^{-10}$
Гравитация Венеры	$1{,}1x10^{-10}$
Суммирующий эффект гравитационных полей Земли, коэффициенты от 2,1 до 4,4	$2{,}2x10^{-7}$

(Примечание: значения ускорений в таблице соответствуют стандартной высоте орбиты навинационного спутника ~20 тыс. км).

Моделирование сил, оказывающих сильный возмущающий эффект на орбиты спутников, важно на этапах разработки системы, ее эксплуатации и проведения научных исследований. Спутники отслеживаются относительно небольшим числом наземных станций, и поэтому число измерений, используемых для прогнозирования орбит, соответственно, мало. Для высокоточного вычисления параметров орбит используют эмпирические параметры и аналитическую модель, базирующуюся на всех доступных данных о конструкции и ориентации космического аппарата. Применение аналитической модели расширяет возможности понимания работы системы и помогает спрогнозировать ее работу в любой момент срока эксплуатации. Это позволяет повысить точность прогнозирования параметров орбит и уменьшить число станций слежения, необходимых для эксплуатации системы (следовательно, снизить ее стоимость), а также увеличить «время действия» спрогнозированных орбит. Фактические орбиты спутников вычисляют, опираясь на измерения дальности и моделирования сил, а также прогнозируя их изменения. Орбиты известны заранее, а каждый приемник имеет в памяти своего компьютера «альманах», т.е. постоянно обновляемый справочник, где содержится информация о местоположении каждого спутника в любой момент времени.

Навигационные спутники не располагаются на геостационарных орбитах подобно телевизионным спутникам. Обращаясь вокруг планеты один раз за 12 часов, они проходят над контрольными станциями дважды в сутки. Это дает возможность точно измерять их положение, высоту и скорость. Отклонения от теоретических орбит, которые обнаруживают контрольные станции, называются «ошибками эфемерид». Они обычно очень незначительны, и вычисленные поправки к орбите передаются обратно на спутник, заменяя собой в памяти его бортового компьютера прежнюю информацию. Каждый спутник вместе с дальномерными кодовыми сигналами непрерывно передает на Землю эти поправки о своем, точно вычисленном положении на орбите и движении остальных спутников данного созвездия. Кроме того, передается различная служебная информация. На земле определяются параметры движения спутников и прогнозируются значения этих параметров на заранее определенный промежуток времени. Параметры и их прогноз закладываются в навигационное сообщение при передаче спутнику навигационного сигнала. Одновременно передаются частотно-временные поправки бортовой шкалы времени спутника относительно системного времени. Измерение и прогноз параметров движения спутников производятся по результатам траекторных измерений дальности до спутника и его радиальной скорости. В течение 30–40 мин. выполняется анализ работоспособности спутника и, в случае необходимости, осуществляется соответствующая корректировка путем введения поправок в модель или в навигационные данные. Каждые 24 часа производится загрузка навигационных данных, состоящих из прогнозированных орбит и поправок часов для каждого спутника. Если спутник находится в зоне видимости, срочные загружаемые команды могут быть выполнены в течение нескольких минут.

Для определения и прогнозирования пространственного положения спутников и расхождения их шкал времени с временной шкалой системы, а также для приема и анализа телеметрической информации о состоянии бортовых систем служит сектор управления и контроля для каждой спутниковой системы. Он состоит из одной ведущей станции управления и нескольких станций слежения, расположенных в различных точках земного шара. Станции слежения ведут траекторные и временные измерения. Ведущая станция объединяет операторов и наблюдателей станций слежения, рассредоточенных по всей планете (рис. 4.5). Она собирает информацию от станций слежения, формирует массив служебной информации (альманах, эфемериды, частотно-временные поправки) и программу управления бортовыми средствами. Загружающая станция пересылает в бортовые запоминающие устройства служебную информацию и программу управления, а также ведет оперативное управление работой бортовых средств каждого из спутников.

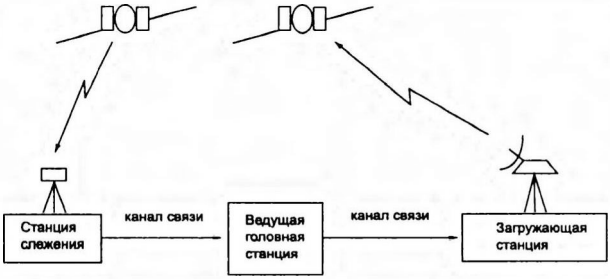


Рис. 4.5. Взаимодействие различных станций, входящих в сектор управления и контроля [132]

Все спутники находятся под постоянным контролем. Современные технические средства, установленные на станциях слежения, позволяют определять местоположение искусственных спутников с высокой точностью в любом месте Земли и в течение суток.

На рис. 4.6 показана схема станций слежения, управления и контроля, расположенных по всей территории России. В задачи сектора входит контроль правильности функционирования космических аппаратов, непрерывное уточнение параметров орбит и выдача на спутники временных программ, команд управления и навигационной информации. Этот сектор также включает навигационные приемники и устройст-

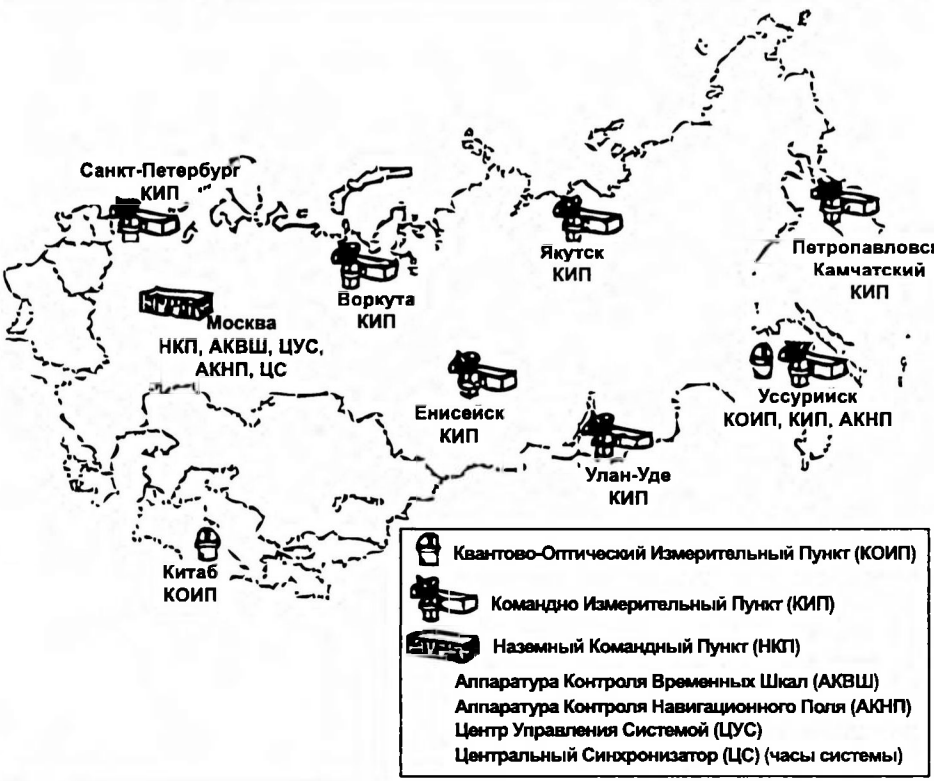


Рис. 4.6. Сегмент наземного комплекса управления системы ГЛОНАСС

ва обработки, предназначенные для приема навигационных сигналов спутников ГЛОНАСС и вычисления координат, скорости и времени.

В США главная управляющая станция (Master Control Station – MCS) для созвездия Navstar, с которой осуществляется управление GPS в мировом масштабе, находится на базе ВВС Шривер, шт. Колорадо, США (рис. 4.7).

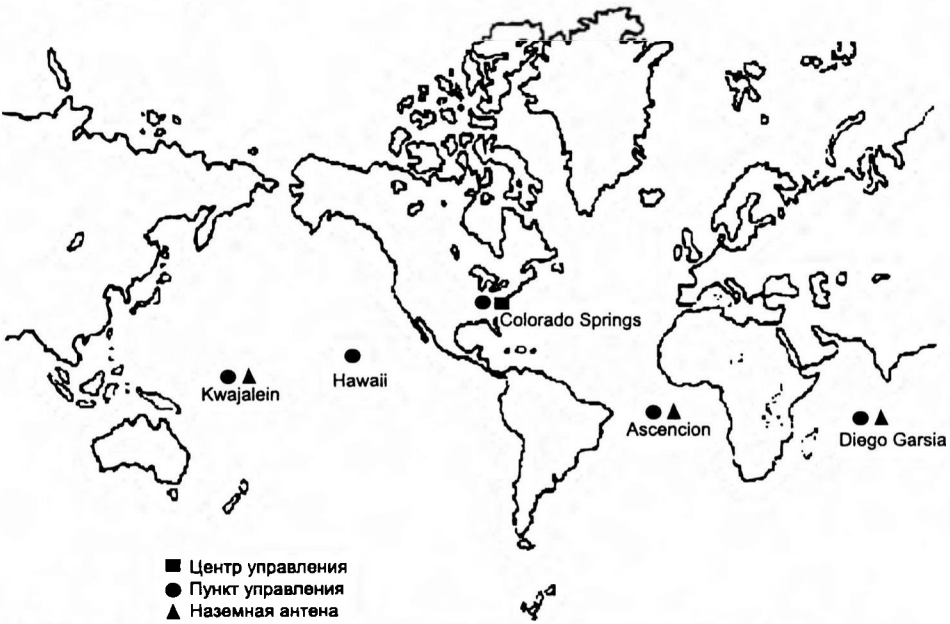


Рис. 4.7. Сегмент наземного комплекса управления системы GPS [132]

Эта станция обслуживает порядка 200 различных спутников, принадлежащих США и обеспечивающих связь, навигацию, наблюдения и определение погоды. (Всего в космосе функционирует более 500 спутников). Помимо пяти станций слежения, которые находятся на островах Кваджалейн и Гавайях в Тихом океане, на острове Вознесения, на острове Диего-Гарсия в Индийском океане, а также в Колорадо-Спрингс, планируется создание еще одной станции наблюдения на мысе Канаверал, шт. Флорида. К сети имеющихся станций наблюдения добавляются еще шесть станций Национального управления картографирования (NIMA). Информация со станций наблюдения, которые используют приемники GPS, передается на главную управляющую станцию, обрабатывается и используется для обновления эфемерид спутников и создания модели параметров спутника. Наземные антенны служат для приема данных о функционировании спутников (телеметрии) и для передачи команд и обновленной навигационной информации на спутники. За сутки проводится 70–80 контактов с

созвездием спутников, во время которых выполняются тесты функционирования подсистем.

Кроме того, в случае отклонения от штатной работы космического аппарата предпринимаются необходимые действия по корректировке режима работы тепловых, электрических и механических устройств спутника. О планируемых остановках в работе сообщается за 96 часов до перевода спутника в автономный режим. Корректировка положения спутника в плоскости орбиты с использованием небольших двигателей-ускорителей осуществляется в основном один раз в год, однако при необходимости может производиться и чаще. Если спутник отработал полностью, то он отводится на расстояние 1,1 тыс. км от стандартной орбиты для вывода его из созвездия.

Сектор потребителя

Сектор потребителя представляет собой комплект спутникового оборудования, который позволяет получать координаты пункта наблюдений, точное время, а также скорость и направление перемещения объекта. Во время работы осуществляется прием радиосигналов со спутников, регистрируются определяемые величины, производится предварительная обработка результатов непосредственно в полевых условиях и затем в камеральных условиях выполняется окончательная обработка (так называемая «пост-обработка») материалов, позволяющая получить окончательные значения величин, интересующих потребителя. Спутниковая аппаратура может быть использована для военных целей и поэтому должна работать оперативно и надежно в условиях проведения военных действий. При этом создаются условия, при которых использование системы позиционирования было недоступно для потенциального противника. Гражданское применение спутниковой аппаратуры ориентировано на ее использование в навигации, а также в геодезии.

Спутниковая геодезическая аппаратура состоит из целого набора аксессуаров. В комплект одного спутникового приемника входят: антенна, приемник, контроллер (управляющее устройство), блок питания (для зарядки аккумуляторов и питания от сети), аккумуляторы или батареи, кабели, штатив или вешка, а также устройства крепления или установки антенны на них, рюкзак или кейс, чехлы и пр. оснащение. При работе в режиме реального времени должен быть радиомодем с блоком питания и радиоантенна. Для обработки результатов наблюдений необходим компьютер и программное обеспечение. В настоящее время спутниковые приемники выпускает более 400 фирм, и они характеризуются сравнительно большим разнообразием, но отличительные особенности приемных устройств, выпускаемых различными фирмами, в большинстве случаев, носят непринципиальный характер.

4.3. Оборудование и методы измерений, используемые в спутниковой геодезии

При выполнении геодезических измерений на земной поверхности в основном используются теодолиты, нивелиры и электронные тахеометры. Все эти приборы достигли достаточно большого совершенства и работают в оптическом диапазоне электромагнитных волн. Дальнейшее повышение точности геодезических измерений в основном ограничено влиянием атмосферы, а не техническими возможностями высокоточных приборов. Дальнейшее повышение точности наземных геодезических измерений с помощью традиционных геодезических приборов возможно только при условии использования методов измерений, учитывающих влияние атмосферы.

Другой путь повышения эффективности геодезических измерений – использование спутниковых методов измерений с применением в качестве опорных точек мгновенных положений искусственных спутников Земли.

При разработке методов спутниковых измерений рассматривались такие методы, как спутниковая триангуляция, основанная на использовании угловых измерений, и спутниковая трилатерация, основанная на использовании линейных измерений.

При использовании спутниковой триангуляции, начиная с запуска первого советского искусственного спутника Земли, применялся метод фотографирования спутников на фоне звезд. По этим снимкам в сочетании с соответствующими фотограмметрическими методами получали необходимую информацию об ориентирных направлениях, используемых при построении глобальной геодезической сети. Этот метод обеспечивал сравнительно невысокую точность измерений. При наблюдениях требовалось чистое небо как минимум в двух точках, разнесенных на большие расстояния; кроме того, аппаратура была дорогостоящей и тяжелой. По этой причине указанный метод был вытеснен спутниковой трилатерацией, которая применяется и в настоящее время.

Спутниковую трилатерацию можно, например, выполнять с помощью дальномеров, работающих в оптическом диапазоне.

Оптические дальномеры, у которых в качестве излучателя используется лазер, обеспечивают значительную дальность измерений и высокую точность, но они достаточно дороги, громоздки и требуют хорошей видимости в момент наблюдений. По этой причине они находят ограниченное применение и в основном используются на пунктах наблюдений в наземном космическом секторе управления и контроля для уточнения орбит спутников, определения длин высокоточных базисов и др. К таким устройствам относятся дальномерная система «Syllvania» и лазерная система «Wett-Zell», для которых отражающим объектом является спутник.

Кроме того, были созданы спутниковые альтиметры, например, «Geosat», «ERS» и др., которые устанавливались на спутнике, а в качестве отражающей поверхности использовалась земная поверхность.

В этих устройствах используется двусторонний импульсный метод измерения расстояний. Измеряемое расстояние (высота) H определяется по измеренному времени прохождения светового сигнала τ удвоенного расстояния между земной поверхностью и спутником с учетом скорости распространения света v:

$$H = \frac{1}{2} v\tau. \qquad (4.2)$$

Недостатком импульсного метода измерений является то, что он менее точен, чем фазовый.

Другое направление связано с использованием радиосистем. При этом был учтен опыт создания доплеровских радиодальномерных систем, таких как Декка, Хиран, Транзит, «Цикада».

Для повышения точности радиодальномерных систем был использован фазовый метод измерений.

При выборе диапазона электромагнитных волн для спутниковых измерений необходимо, чтобы система была высокоточной, всепогодной, а влияние условий прохождения в ионосфере и тропосфере было сведено к минимуму. Наиболее полно этим требованиям отвечает дециметровый диапазон радиоволн.

Для создания портативной, экономичной и сравнительно недорогой аппаратуры целесообразно использовать односторонний метод измерения расстояний, исключающий двухсторонний обмен информацией со спутником, т. е. на спутнике устанавливается передатчик, а на земной поверхности — приемник, и измеряется время прохождения радиосигнала только в одном направлении — от спутника до приемника (см. формулу 4.1).



Рис. 4.8. Упрощенная функциональная схема устройства, работающего на одностороннем принципе измерений [40]

Структурная схема такого устройства показана на рис. 4.8.

Так как скорость радиоволны составляет около 300 000 км/с, то для обеспечения геодезической точности измерений необходимо измерять время с точностью $10^{-10}...10^{-12}$ с. Поэтому высокоточным измерениям вре-

мени придается большое значение. На спутниках устанавливают цезиевые стандарты частоты, одновременно являющиеся стандартами времени с относительной нестабильностью за сутки 10^{-13}, что может вносить погрешность в измерение дальности 0,03 мм. На наземном комплексе управления ГЛОНАСС используется центральный синхронизатор с водородным стандартом частоты, суточная относительная нестабильность которого $3 \cdot 10^{-14}$. Для обеспечения высокой точности измерений наземный и бортовой стандарты частоты сверяются, и поправки передаются на спутники дважды в сутки. По меткам времени синхронизируют измерения и определяют моменты отсчетов в аппаратуре пользователей.

В соответствии с международной конвенцией, в качестве эталонов для измерения времени используют периодические процессы, период которых с большой точностью постоянен (или обратную ему величину – частоту). До XX века таким эталоном было вращение Земли с соответствующими единицами измерения – сутками и 1/86400 частью суток – секундой.

Через период вращения Земли вокруг своей оси определяется звездное время. Вращение Земли является нерегулярным в сравнении с современными стандартами и имеет ряд сезонных, вековых и нерегулярных флуктуаций (рис. 4.9) [133].

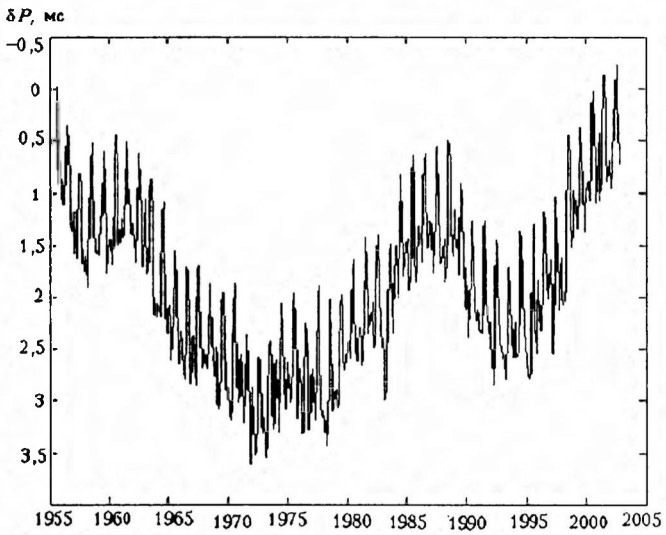


Рис. 4.9. Среднемесячные отклонения δP длительности земных суток от эталонных за период с 1965 г. по 2002 г.

Относительная суточная нестабильность скорости вращения Земли составляет 10^{-8}. Поэтому в Международной системе СИ принята более стабильная единица измерения времени, которая очень близка к 1/86400 части суток и основана на резонансной частоте квантовых переходов атомов цезия. Определенная таким образом единица времени называется «атомной секундой», а определяемая этой единицей шкала времени называется «атомным временем» – TAI (Time Atomic International).

Атомное время поддерживается с помощью атомных часов, а атомная секунда соответствует интервалу времени, в течение которого совершается 9 192 631 770 колебаний на резонансной частоте перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия - 133. Первичные атомные стандарты частоты в национальных метрологических лабораториях мира являются самыми точными часами. Эти приборы занимают порой вместе с научными подразделениями, которые обеспечивают эксплуатацию эталона, целые здания, представляя собой сложный комплекс, в который входят генераторы, дающие строго определенную частоту, водородные хранители частоты, хранители шкал времени, приборы для измерения временных интервалов и другая аппаратура. Они потребляют много электроэнергии, требуют сложного обслуживания и очень дорогостоящие.

Точность первичных атомных стандартов характеризуется уходом в 1 секунду за 30 миллионов лет, т.е. относительная погрешность составляет 10^{-15}. Первичные стандарты частоты (атомные часы) используются в основном для настройки менее точных часов (вторичных стандартов) и проведения прецизионных физических экспериментов.

В России главный эталон времени находится во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ) под Москвой [127].

Российский государственный эталон времени входит в группу лучших мировых эталонов, его относительная погрешность не превышает $5 \cdot 10^{-14}$, т.е. 0,00000000000005 сек, что позволяет накопить погрешность не более 1 секунды за полмиллиона лет. Всемирное время – UT (Universal Time), связанное с вращением Земли и соответствующее среднему времени меридиана Гринвича – расходится с атомным временем TAI, которое является более равномерным. Имеются несколько шкал всемирного времени: UT0 – всемирное время, полученное на основании астрономических наблюдений; UT1 – всемирное время, исправленное за счет учета смещения мгновенного полюса относительно его среднего положения: UT2 – всемирное время, полученное путем внесения поправок в UT1 за сезонные вариации вращения Земли.

Так как атомное время и всемирное время между собой не согласуются, то используют универсальное координированное время UTC (Universal Time Coordinated), которое в России соответствует Государственному эталону частоты и времени РФ и является атомным временем. UTC (SU) корректируется всякий раз на 1 с, если оно отличается от всемирного времени UT1 более чем на 0,9 с. Эта операция выполняется по мере надобности в полночь после последней секунды полугодия 30 июня или в конце года, 31 декабря.

В соответствии с договором между государствами Международному бюро мер и весов (Bureau International des Poids et Measures-BIMP) поручено «обеспечивать единообразие измерений во всемирном масштабе и

возможность их перевода в Международную систему единиц (SU)». Всемирное координированное время (UTC) состоит из поправок времени, получаемых во всемирном масштабе в лабораториях – членах BIMP.

Эталоны времени в США состоят из водородных мазеров, наилучшим образом хранящих время в течение короткого периода, и цезиевых устройств, которые лучше всего хранят время в течение длительного периода. Системы глобального позиционирования функционируют в собственном системном времени, которое является «атомным» временем. Это время может расходиться с всемирным временем. Шкала времени для навигационных спутников задается сектором управления и контроля, где она поддерживается с точностью более высокой, чем бортовое время спутников. Поправки к системному времени регистрируются с высокой точностью и передаются в навигационном сообщении, а также публикуются в специальных бюллетенях. Необходимость связана с особенностями способа навигационных измерений – пассивного дальномера (псевдодальномера). Так как приемником одновременно выполняются измерения до нескольких спутников, то необходимо, чтобы временные шкалы используемых спутников были согласованы между собой, т.е. необходима взаимная высокоточная синхронизации бортовых шкал спутников. Это достигается независимой привязкой к системному времени каждой из шкал спутников.

Время GPS (GPST) было установлено в 1980 г. на 19 с. меньше времени TAI, и с течением времени эта разница изменяется. Например, в 1994 г. GPST опережало UTC на 10 с. В навигационном сообщении время передается вместе с номером недели в виде поправки времени для каждой «GPS» недели. Текущий номер недели меняется от 0 до 1023. Счет недели с номером 0 начался 6 января 1980 г., а 21 августа 1999 г. закончилась неделя с номером 1023. После этого счет недель начался сначала. При такой смене номеров возможны ошибки из-за неправильного вычисления даты.

Системное время ГЛОНАСС корректируется с UTC (SU) с точностью до 1 мкс. Между временем ГЛОНАСС, которое функционирует по московскому времени, и UTC есть постоянный сдвиг 3 ч. Пользователь может определить время UTC (SU) с точностью в 1 мкс, так как в навигационном сообщении передается поправка для перехода времени ГЛОНАСС к времени UTC (SU). Время ГЛОНАСС отсчитывается от нуля часов, минут и секунд с 1 января последнего високосного года. Таким образом, в ГЛОНАСС, в отличие от Navstar, при корректировке времени проблем нет, так как используется более простая схема ввода поправок.

Так как передатчик удален от приемника, то сигнал, принятый приемником, будет запаздывать по отношению к сигналу, вырабатываемому приемником. Передатчик и приемник генерируют один и тот же бинарный (двоичный) код точно в одно и тоже время.

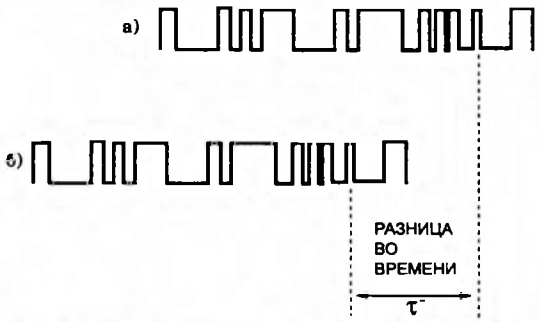


Рис. 4.10. Двоичные синхронные сигналы, вырабатываемые передатчиком спутника (а) и приемником (б)



Рис. 4.11. Фоновый радиошум

Чтобы оценить время сдвига τ, принимают код от спутника и сравнивают с кодом сигнала, который воспроизводит приемник (рис. 4.10). По времени сдвига одного кода относительно другого определяют расстояние S до спутника согласно (4.1).

Преимуществом использования кодовых посылок (кодовых последовательностей) является то, что можно выполнить измерение запаздывания в любой момент времени. Чтобы повысить надежность измерений, коды специально усложняют, и они выглядят как длинный ряд случайных импульсов, поэтому их называют «псевдослучайными кодами».

В действительности они не случайные, а являются тщательно отобранными, «почти» случайными последовательностями логических нулей и логических единиц, последовательности которых повторяются каждую миллисекунду. Коды усложняются специально, чтобы их можно было надежно и однозначно сравнивать. Коды настолько сложны, что они выглядят как длинный ряд случайных импульсов, как некоторая «шумовая дорожка».

Одна из причин применения такого кода — энергетическая экономичность. По этой причине дальномерные сигналы навигационных спутников могут иметь малую мощность, соизмеримую с фоновыми радиошумами (рис. 4.11).

Псевдослучайный код в значительной степени похож на фоновый радиошум, но порядок следования импульсов в кодовой последовательности постоянен и точно известен, а сама кодовая последовательность непрерывно повторяется в радиосигналах спутников. Еслисравнить



Рис. 4.12. Сравнение фонового радиошума и псевдослучайного кода

отрезки фонового шума и псевдослучайного кода (рис. 4.12), разбив их на тактовые интервалы, то из-за случайной структуры анализируемых процессов в половине тактов максимумы сигнала и шума совпадут, а в другой половине такого совпадения не будет, т.е. суммарная величина сигнала будет близка к нулю.

Спутник передает псевдослучайные импульсы такие же, какие вырабатываются в спутниковом приемнике (рис. 4.10). Если осуществлять потактовый временной сдвиг псевдослучайного кода в приемнике относительно общей шкалы времени, то в определенный момент времени код, принятый со спутника, и код, вырабатываемый приемником, совпадут. Вместо нуля счетчик совпадений покажет их очень большое количество.

Чем больше число периодов кодовой последовательности будет сравниваться, тем большее число совпадений будет зарегистрировано. Это является своего рода «усилением». Таким образом, псевдослучайное кодирование дает способ распознавания очень слабого сигнала и, следовательно, возможность использовать спутниковые передатчики очень малой мощности и малогабаритные приемные антенны. Дело в том, что сигналы GPS несут чрезвычайно мало информации: всего временную метку. Принцип, заложенный при использовании псевдослучайного кода, основан на осреднении по большому числу периодов кодовой последовательности, что позволяет повысить точность результатов измерений. Осреднение большого числа периодов кодовой последовательности, заложенной в основу применения псевдослучайного кода, не вызывает серьезных технических затруднений. Применение псевдослучайного кода допускает одновременную передачу дальномерных кодов и информационных сообщений всеми спутниками на одних и тех же двух (трех) несущих частотах без взаимных помех еще и потому, что мощность излучения спутников мала (на уровне фоновых помех), и поэтому он не «забивает» своими сигналами остальные.

Из-за несинхронной работы генераторов время запаздывания сигнала τ (см. формулу 4.1) определяется неточно. Обозначим уход показаний часов относительно эталонного времени на спутнике через $\delta t_{пер}$, а на приемнике – $\delta t_{пр}$. В этом случае регистрируемое время прохождения сигнала от спутника до приемника $\tau_{изм}$ будет отличаться от истинного $\tau_{ист}$ и составлять:

$$\tau_{изм} = t_{пр} - t_{пер} = \tau_{ист} + \delta t_{пр} + \delta t_{пер} = \tau_{ист} + \delta_{\tau}, \qquad (4.3)$$

где $t_{пер}$, $t_{пр}$ – моменты передачи сигнала со спутника и приема сигнала., $\delta_{\tau} = \delta t_{пр} + \delta t_{пер}$ – суммарная погрешность, обусловленная несинхронностью хода часов на спутнике и в определяемой точке.

Таким образом, учитывая скорость распространения света, значение расстояния R определяется как:

$$R = v\tau_{изм} = v(\tau_{ист} + \delta_{\tau}) = S + v\delta_{\tau}, \qquad (4.4)$$

где S – истинное расстояние между спутником и приемником; $v\delta_{\tau}$ – искажение дальности, обусловленное несинхронностью хода часов на спутнике и в определяемой точке, которое может составлять сотни метров и более.

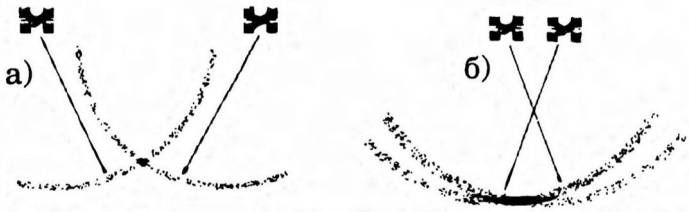


Рис. 4.13. К определению точки путем измерения псевдодальностей

Из-за различия между измеряемым R и истинным S значениями определяемой линии для величины R введено название псевдодальности, что подчеркивает отличие получаемого в результате измерений значения дальности R от ее истинного значения S. Таким образом, из-за ухода часов возникают ошибки в определении дальности до спутников. Так как каждое измерение содержит в себе и некоторую неопределенность, ранее четкие окружности на рис. 4.13 изображены размытыми, представляющими собой «область неопределенности», а точка пересечения таких окружностей превращается в четырехугольник (рис. 4.13, а).

При сближении спутников увеличивается эллипс ошибок (рис. 4.13, б). Так как местоположение точки определяется в пространстве по трем или четырем спутникам, то по измеренным псевдодальностям получаем область неопределенности в некотором объеме.

Разработка спутниковых систем определения местоположения на основе кодирования сигналов связана в значительной степени с тем, что эти системы предполагалось использовать в первую очередь для военных целей, и поэтому доступ к ним должен быть санкционированным. Псевдослучайное кодирование дает возможность управлять доступом к спутниковой системе: в военное время можно изменить код, чтобы исключить использование системы противником. Этот метод используется в системе GPS. Даже в мирное время можно сохранять некоторую «закрытость» системы. Кроме того, применение псевдослучайного кода допускает передачу дальномерных кодов и информационных сообщений всем спутникам одновременно и на одних и тех же двух несущих частотах L1 = 1575,42 МГц и L2 = 1227,6 МГц без взаимных помех. С целью повышения безопасности полетов в авиации и надежности позиционирования в настоящее время вводится третья частота L5 =1176,45 МГц. В системе используется кодовое разделение сигналов (CDMA), поэтому все спутники излучают сигналы на одинаковых частотах.

Каждый спутник имеет два определенных псевдослучайных кода. Выделение дальномерных кодов и информационных сообщений разных спутников в приемнике сводится к выбору соответствующих кодов в процессе приема и обработки сигналов. Ни один из спутников не «забивает» своими сигналами остальные, поскольку мощность излучения спутников мала. Существуют два различных типа псевдослучайных кодов: «C/A-коды» и «P-коды».

C/A-коды (Clear Acquisition – легкая распознаваемость), – это коды, которые используются для приемников как гражданского, так и военного назначения, тактовая частота в десять раз ниже, чем у P-кодов (Protected – защищенный). P-код представляет собой последовательность псевдослучайных бистабильных манипуляций фазы несущей частоты (Carrier Frequency) с частотой следования, равной 10,23 МГц и периодом повторения в 267 суток. Считается, что C/A-коды обеспечивают менее точные измерения времени распространения радиосигналов.

Выше упоминалось, что МО США, включая по командам с Земли на всех спутниках GPS так называемый S/A-режим, или «режим-1 селективного доступа» (Selective Availability – избирательная доступность), может уменьшить точность в режиме C/A-кодов. Это достигается тем, что преднамеренно создается значительный и непредсказуемый уход спутниковых часов. Если режим S/A установлен, то возникают самые значительные погрешности местоопределения.

P-коды могут быть дополнительно зашифрованы, т.е. переведены в новый Y-код. Это вводится для того, чтобы двухчастотный приемник не смог определить ионосферную задержку в реальном времени. Прием сигнала по коду P(Y) обеспечивает работу в режиме PPS (Precise Positioning Service– высокая точность измерений). Только военным пользователям всегда открыт доступ к ним. Кроме того, P-коды почти невозможно заглушить помехами, их обычно используют высокоточные геодезические приемники.

Кодированный сигнал представляет собой последовательность посылок сигнала прямоугольной формы единичного и нулевого уровня, причем кодированию подвергается длительность единичных и нулевых посылок. Для этого радиосигнал на частоте L1 модулируется двумя дальномерными кодами C/A и P (или засекреченным кодом Y), а на частоте L2 модулируется кодом P. На L2 излучаются также сигналы с военным кодом P(Y) с высокоточной информацией (Precision – точный, или Protected – защищенный) и защищенным от имитационных помех. Задержку, возникающую при прохождении радиоволн через ионосферу, можно вычислить, сравнивая время прихода сигналов на частотах L1 и L2, благодаря чему повышается точность измерений. Одновременно по радиоканалу передается так называемая навигационная информация, которая включает эфемериды спутника, поправки на показания часов, время, поправки на влияние ионосферы, состояние работоспособности

спутника, специальные сообщения, параметры, описывающие связь времени GPS с UTC, и прочее и др. Навигационные сигналы излучаются на двух частотах L-диапазона (L-band, полоса радиочастот от 390 до 1550 МГц): 1575,42 МГц (L1) и 1227,6 МГц (L2). Кроме того, предусмотрена модуляция обеих несущих военным М-кодом. Каждый спутник использует относящиеся только к нему дальномерные коды C/A и P(Y), что и позволяет осуществлять селекцию спутниковых сигналов. Одновременно с выполнением точного дальномерного P(Y) кодирования формируются метки времени спутникового сигнала, которые передаются по радиоканалу вместе с навигационной информацией, заключенной в суперкадре, состоящем из 25 блоков по 1500 бит. Каждый блок разбит на пять подблоков по 300 бит. Подблок состоит из 10 слов по 10 бит. В каждом слове 6 младших разрядов являются проверочными битами. В 1, 2 и 3-м подблоках передаются данные о параметрах коррекции часов и данные эфемерид спутников, с которым установлена связь. Содержание и структура в этих подблоках остаются неизменными на всех страницах суперкадра. В 4 и 5-м подблоках содержится информация о конфигурации и состоянии всех спутников системы и их альманахи. Суперкадр, включающий 25 блоков, передается в течение 750 с (12,5 мин.). Один блок передается в течение 30 с. Подблок передается в течение интервала 6 с. Начало каждого подблока обозначает метку времени, соответствующую началу/окончанию очередного 6-секундного интервала системного времени GPS. Подблок состоит из 10 слов.

По доплеровскому сдвигу несущей частоты сигнала спутника определяется скорость движения пользователя. Доплеровский сдвиг оценивается путем сравнения частот сигналов, принимаемых от спутника и генерируемых приемником. В ГЛОНАСС все сигналы модулированы одними и теми же кодами высокой точности (ВТ) и стандартной точности (СТ). Несущая L1 модулирована обоими кодами, а L2 – только кодом (ВТ), структура которого не раскрывается, так как он предназначен для военных нужд. Разделение сигналов частотное, так как каждый российский спутник работает на своей частоте, не ограничиваясь, как американские, встроенным в формат сигнала личным кодом. ГЛОНАСС использует более высокочастотную часть диапазона – навигационные сигналы вплотную примыкают к полосе, отведенной для спутниковой связи с самолетами, а также перекрывают диапазон 1607–1612 МГц, предназначенный для радиоастрономических исследований. Номинальное значение частоты бортового генератора равно 5,0 МГц.

В системе ГЛОНАСС используется частотное разделение сигналов (FDMA), излучаемых каждым спутником, – двух фазоманипулированных сигналов. Частота сигнала L1 лежит в диапазоне ~1600 МГц, а частота L2 – в диапазоне ~1250 МГц. Значения рабочих частот радиосигналов, передаваемых в диапазонах L1 и L2:

$f_{k1} = f_1 + k\Delta f_1$

$f_{k2} = f_2 + k\Delta f_2 k = 0,1, ..., 24,$

где k = 0,1, ..., 24 – номера каналов рабочих частот спутников;

f_1 = 1602 МГц; Δf_1 = 9/16 = 0,5625 МГц;

f_2 = 1246 МГц; Δf_2 = 7/16 = 0,4375 МГц.

Для каждого спутника рабочие частоты сигналов в диапазоне L1 и L2 когерентны и формируются от одного эталона частоты, они сдвинуты друг относительно друга по фазе на 90° (рис. 4.14). Отношение рабочих частот несущей каждого спутника [40, 132] f_{L1}/f_{L2} = 7/9.

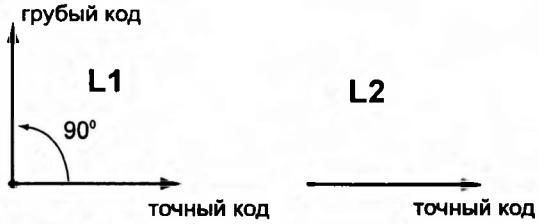


Рис. 4.14. Векторная диаграмма несущих сигналов системм ГЛОНАСС и GPS

Навигационное сообщение спутников системы ГЛОНАСС содержится в передаваемом суперкадре и делится на оперативную и неоперативную.

Оперативная информация относится к спутнику, от которого она была получена и содержит:

- оцифровку меток времени;
- сдвиг шкалы времени спутника относительно шкалы системы;
- относительное отличие несущей частоты спутника от номинального значения;
- эфемеридную информацию.

Неоперативная информация содержит альманах, включающий:

- данные о состоянии всех спутников системы;
- сдвиг шкалы времени спутника относительно шкалы системы;
- параметры орбит всех спутников системы;
- поправку к шкале времени системы ГЛОНАСС.

Полное навигационное сообщение формируется в виде непрерывно следующих строк, каждая длительностью 2 с. В начале строки первые 1,7 с передаются навигационные данные, а в следующие 0,3 с – метка времени. Она представляет собой укороченную псевдослучайную последовательность, состоящую из 30 символов с тактовой частотой 100 бит/с. Остальная часть строки содержит 85 символов цифровой информации, передаваемых с частотой 50 Гц. Группа из 15 строк образует блок длительностью 30 с. В составе каждого блока передается полный объем оперативной информации и часть альманаха системы. Полный альманах содержится во всем суперкадре, что позволяет на основе анализа выбрать оптимальное созвездие КА и прогнозировать доплеровский сдвиг несущей частоты.

Пять блоков образуют суперкадр длительностью 150 с (2,5 мин.), в котором содержится полный альманах всего созвездия. При этом информация суперкадра, содержащаяся в строках 1–4, относится к тому спутнику, с которого она поступает (оперативная часть), и не меняется в пределах суперкадра.

Таким образом обновление информации происходит быстро – за 2,5 мин. (против 12,5 мин. в GPS), что позволяет точно и быстро определять координаты и скорость движения спутника.

Принятый от спутников сигнал обрабатывается в процессоре приемника. В результате вычисляются три составляющих координаты потребителя, три составляющих скорости и точное время. В зависимости от типа приемника задача определения местонахождения решается в течение 3-6 минут с момента первого включения приемника. Затем эти измерения повторяются с заданной периодичностью: от 1 сек. и более. Результаты могут отображаться на дисплее (вместе с электронной картой) либо выводиться в виде числовых значений координат, скорости и времени. Возможно представление полученных значений в различных системах координат. Как уже отмечалось, при использовании системы Navstar передатчик, установленный на спутнике, непрерывно вырабатывает кодированный сигнал. Точно такой же кодированный сигнал вырабатывает приемник, установленный на Земле в определяемой точке, т.е. потребителю доступен принцип кодирования сигналов. Время прохождения сигналом определяемого расстояния измеряется за счет введения времени задержки в опорный сигнал, вырабатываемый приемником и фиксации максимального корреляционного совпадения с принимаемым от спутника аналогичным кодированным сигналом. При этом вводят понятие смещение по фазе одного кодированного сигнала относительно другого.

$$\Phi = \Phi_{пер}(t) - \Phi_{пр}(t), \qquad (4.5)$$

где Φ – смещение принимаемого сигнала по фазе; $\Phi_{пер}(t)$ – текущая фаза несущих колебаний, поступающих на вход приемника; $\Phi_{пр}(t)$ – текущая фаза, возбуждаемых в приемнике опорных колебаний.

В свою очередь

$$\Phi_{пер}(t) = f(t - \tau) + f\delta t_{пер}, \qquad (4.6)$$

$$\Phi_{пр}(t) = ft + f\delta t_{пр}, \qquad (4.7)$$

где $f = \omega/2\pi$ – частота несущих колебаний; τ – время прохождения расстояния; $\delta t_{пер}$ – уход часов, установленных на спутнике, на момент его работы; $\delta t_{пер}$ – уход часов, установленных в приемнике, на момент его работы. Следовательно, (4.4) можно написать как

$$\Phi = -f\tau + f(\delta t_{пр} - \delta t_{пер}) = -f\tau + f\delta\tau, \qquad (4.8)$$

где $f\tau = \delta t_{пр} - \delta t_{пер}$ – поправка, обусловленная несинхронностью хода часов на спутнике и в приемнике.

В процессе работы измеряется разность фаз $\Delta\Phi$ в пределах одного периода несущих колебаний (одного цикла), в то время как фазовый сдвиг Φ во много раз превышает эту величину, так как в измеряемом расстоянии, исчисляемом тысячами километров, количество длин волн, соответствующих этому расстоянию, исчисляется сотнями миллионов. Поэтому параметр Φ записывается в виде следующего соотношения [84]:

$$\Phi = N + \Delta\Phi, \qquad (4.9)$$

где N – число полных периодов изменения фазы за время прохождения сигналом определяемого расстояния. В спутниковых измерениях фазовый сдвиг Φ и разность фаз $\Delta\Phi$, измеряемая фазометром в пределах одного цикла, выражают в относительных единицах. (Обычно разность фаз выражается в угловых величинах – радианах или градусах).

$$\Phi = \varphi/2\pi = f\,2S/v, \qquad (4.10)$$

$$\Delta\Phi = \Delta\varphi/2\pi = f\,2S/v, \qquad (4.11)$$

где φ – фазовый сдвиг и разность фаз $\Delta\varphi$, выраженные в угловых единицах (градусах или радианах); $f = \omega/2\pi$ – частота несущих колебаний.

При спутниковых измерениях используются односторонние дальномерные измерения, и поэтому приходится учитывать поправки, обусловленные неодинаковыми показаниями часов на спутнике и в приемнике, т.е. необходимо учитывать начальные фазы сравниваемых колебаний. Текущая фаза колебаний $\Phi(t)$ может быть представлена с учетом начальной фазы Φ_0 в следующем виде:

$$\Phi(t) = ft + \Phi_0. \qquad (4.12)$$

В свою очередь

$$\Phi_0 = f\delta t, \qquad (4.13)$$

где δt – уход часов относительно эталонного времени в момент выполнения измерений.

Сигналы, поступающие от спутника, запаздывают относительно сигналов, формируемых в приемнике, и, следовательно, имеют отрицательный фазовый сдвиг. Поэтому первый член в правой части уравнения (4.7) имеет знак «–». С учетом этого формула (4.9) принимает вид:

$$\Phi = N - \Delta\Phi. \qquad (4.14)$$

Используя (4.9) и (4.10), можно написать:

$$\Phi = f\tau + N + f\delta\tau, \qquad (4.15)$$

где $\delta\tau = \delta t_{пер} - \delta t_{пр}$.

Так как $\tau = S/v$ – время запаздывания сигнала на трассе, то можно написать основополагающую формулу для односторонних спутниковых дальномерных систем в виде соотношения, связывающего значения измеряемой разности фаз $\Delta\Phi$ с определяемым расстоянием между спутником и приемником:

$$\Delta\Phi = fS/v + N + f\delta\tau. \qquad (4.16)$$

При определении расстояния между спутником и приемником, согласно (4.16), необходимо знать целое число фазовых циклов N, т.е. целое число длин волн, которое укладывается в измеряемом расстоянии между спутником и приемником. Это является довольно сложной проблемой, так как число N оценивается величиной порядка 10^6 (спутники находятся на высоте около 20 000 км, а длина волны несущих колебаний составляет 0,2 м). К тому же необходимо определять серию величин N для нескольких одновременно наблюдаемых спутников, расстояние до которых непрерывно меняется из-за орбитального движения.

Для решения проблемы разрешения неоднозначности используются следующие методы:

1) геометрический метод;
2) метод, основанный на комбинации фазовых и кодовых измерений;
3) метод поиска наиболее вероятных значений величины N;
4) метод, основанный на комбинации основных и вспомогательных методов (нетривиальные методы разрешения неоднозначности).

Ниже рассмотрена сущность указанных методов.

Геометрический метод

При приеме радиосигнала от спутника непрерывно отслеживаются изменения циклов, при этом неизвестная начальная величина N считается неизменной при выполнении измерений во всех последующих точках траектории спутника. На основании выполненных измерений решается система уравнений вида:

$$\Delta\Phi = f\rho/c + N + \Delta N + f(\delta`t_{пр} - \delta`t_{пер}) + f\delta`t_{атм}, \qquad (4.17)$$

где f — несущая частота; ρ — расстояние между спутником и приемником; c — скорость радиоволн в вакууме; $\delta`t_{пр}$ — уход показаний часов приемника относительно времени системы; $\delta`t_{пер}$ — уход показаний часов спутника относительно времени системы; $\delta`t_{атм}$ — временная задержка радиосигнала, вызванная влиянием атмосферы.

Число N определяется в процессе решения системы уравнений, которые получают по отсчетам при нахождении спутника в различных точках траектории. Надежность определения величины N зависит от длительности наблюдений спутника, при этом не допускается пропуск отсчитываемых фазовых циклов из-за потери радиосигнала.

Метод, основанный на комбинации фазовых и кодовых измерений

Точное определение расстояния осуществляется в два этапа. На основе кодовых измерений на дециметровом уровне точности определяют приближенное расстояние ρ` до спутника:

$$\rho` = R - (\delta`t_{пр} - \delta`t_{пер})c - \delta`t_{атм}, \qquad (4.18)$$

которое затем используется для нахождения целого количества фазовых циклов $N_{\Delta L}$ при использовании двухчастотных фазовых измерений. При этом определение величины R кодовым методом должно быть выполнено с погрешностью не хуже $(1/2)\lambda_{\Delta L}$ ~43 см:

$$N_{\Delta L} = f_{\Delta L}\rho'/c + \Delta\Phi_{\Delta L} - f_{\Delta L}(\delta' t_{пр} - \delta' t_{пер}) + \kappa(1/f_{L1} + 1/f_{L2}), \qquad (4.19)$$

где $f_{\Delta L}$ – разностная частота для двух передаваемых со спутника частот L1 и L2, которая является ниже частот L1 и L2; $N_{\Delta L}$ – целое количество фазовых циклов, соответствующих разностной частоте $f_{\Delta L}$; $\Delta\Phi_{\Delta L}$ – разность фаз двух несущих частот, передаваемых со спутника, а $f_{\Delta L}$ – разностная частота $f_{\Delta L} = f_{L1} - f_{L2}$ (для Navstar номинальное значение разностной частоты составляет 1575,42 – 1227,60 = 347,82Мгц.); к – коэфициент, характеризующий скорость распространения радиоволн и зависящий от концентрации электронов в ионосфере и длины пути прохождения радиосигнала через ионизированную среду.

Поправки за влияние атмосферы, а также за уход часов в приемнике и на спутнике определяют за счет совместного решения системы уравнений, включающих в себя кодовые и фазовые измерения, а также за счет использования дифференциальных методов измерений на двух несущих частотах.

Метод поиска наиболее вероятных значений N основан на том факте, что при наземных спутниковых наблюдениях в момент измерений расстояние между базовой точкой и определяемой (роверной) точками (базисной линии) остается неизменным. Следовательно, число длин волн, которое укладывается в этом расстоянии, также является постоянной величиной. При выполнении наблюдений накапливается большой объем информации, позволяющий многократно определить расстояние до наблюдаемых спутников. В свою очередь эти данные могут быть использованы для многократного определения базисной линии. Таким образом, появляется возможность разрешить неоднозначность при определении расстояний до спутников, а также и для длины базисной линии на местности.

Метод, основанный на комбинации основных и вспомогательных методов (нетривиальные методы разрешения неоднозначности)

Для повышения надежности определения целого числа фазовых циклов используется так называемый метод «реоккупации», согласно которому наблюдения на пунктах выполняются двумя циклами с промежутком не менее 1–2 часов между циклами наблюдений. Во время обработки данные наблюдений, полученные в обоих циклах, объединяются, что позволяет получить не только увеличенный объем информации, но и увеличенное количество спутников, отличающееся геометрией их расположения.

Дальнейшее развитие этого метода выполнено в работе [173], в которой предлагается решение системы уравнений на комплексной плоскости. Этот метод получил название метода неоднозначных функций.

При двухчастотных методах измерений используют не только разности отсчетов L1 и L2, но и различные комбинации этих отсчетов. В том числе получают данные, относящиеся к более низким разностным отсчетам, что облегчает нахождение искомых значений N.

На точность определения местоположения приемника влияют не только нестабильность хода атомных часов и ошибки орбиты спутника, но и другие факторы.

Одним из этих факторов является случайное изменение скорости распространения радиоволн в ионосфере, которая простирается от 50 до 1000 км от поверхности Земли; исключить ошибку, вызываемую флуктуациями скорости распространения радиоволн, этим способом невозможно. Величина нескомпенсированной задержки может искажать псевдодальности на величину 10 м [132].

Так как изменение скорости распространения радиоволн в ионосфере зависит от длины волны, то для уменьшения этих искажений используют измерения на двух длинах волн L1 и L2. При распространении радиоволн заряженные частицы, находящиеся в ионосфере, приходят в вынужденное колебательное движение, при этом путь и скорость радиоволн изменяются, так как плотность заряженных частиц неравномерна. Скорость распространения электромагнитных колебаний постоянна только в вакууме.

Чтобы уменьшить влияние этой ошибки, вычисляют скорость для средних ионосферных условий и на основании полученного значения вычисляют местоположение точки. Реальные условия распространения радиоволн практически всегда отличаются от среднестатистических и характеризуется соотношением:

$$R = S + A/f^2, \qquad (4.20)$$

где S – геометрическая дальность; A – зависит от концентрации электронов на пути радиолуча:

$$A = 40{,}4 \int N_e dS, \qquad (4.21)$$

N_e – число электронов в $м^3$.

Так как частота несущих колебаний для ГЛОНАСС и GPS известна, то, составив систему уравнений для псевдодальности с учетом двух несущих частот и решив ее, получим значение S, свободное от искажений.

Необходимо отметить, что аналогичный метод, называемый дисперсионным (см. 2.4), был предложен в 1956 г. М.Т. Прилепиным (СССР) и в 1965 г. разработан П. Бендером и Д. Оуэнсом (США) для повышения точности светодальномерных измерений. Практически этот метод используется в радиодиапазоне для корректировки ошибок в наиболее совершенных «двухчастотных» спутниковых приемниках. Пройдя ионосферу, спутниковые сигналы попадают в тропосферу, в которой происходят все погодные явления. Задержки при распростра-

нения радиоволн в тропосфере связаны в основном с наличием влаги. Их суммарный вклад в погрешность определения местоположения невелик, т. е. значительно меньше, чем в ионосфере. В нижних слоях атмосферы скорость распространения волн зависит от показателя преломления n электромагнитной волны, для описания которого обычно используют экспоненциальную формулу:

$$(n - 1) = (n_0 - 1)\cdot\exp(-H/H_m), \qquad (4.22)$$

где H — высота. Для модели международной стандартной атмосферы Международным консультативным комитетом по радиочастотам приняты значения $(n_0 - 1)\cdot 10^6 = 289$ и H_m — «масштаб высоты», равный 7,35.

Согласно экспериментальным данным, полученным в различных районах земного шара в разные сезоны и времена года $(n_0 - 1)\cdot 10^6$ в приземном слое атмосферы на уровне моря составляет 290–390 единиц, а по земному шару 240–400 единиц [9, 10, 16, 149]. В табл. 4.5 представлены значения индекса показателя преломления $N = (n - 1)\cdot 10^6$ для радиоволн дециметрового диапазона для различных высот.

Таблица 4.5

Значения индекса показателя преломления $N = (n - 1)\cdot 10^6$ для радиоволн дециметрового диапазона для различных высот

H, см	0	1	3	10	20	50
$N = (n - 1)\cdot 10^6$	289	252	192	74	19	0,3

Таким образом, используя полученные экспериментальные данные, можно считать, что максимальная погрешность в оценке величины N составляет не более 80 единиц у поверхности земли. Следовательно, при наклонной дальности среднеинтегральное значение N будет искаженно не более чем на 40 единиц, что приведет к относительной ошибке при оценке скорости распространения радиоволны $\delta_v = 40\cdot 10^{-6}$ и, следовательно, к такой же ошибке при измерении псевдодальности.

Необходимо отметить, что дисперсия радиоволн в приземном слое атмосферы ничтожно мала, т.е. изменение скорости не зависит от длины радиоволны, и поэтому исключить возникающие искажения измерениями на двух частотах невозможно.

Вследствие изменения плотности воздуха с высотой наблюдается искривление радиолуча, т.е. рефракция. Если в вакууме радиолуч распространяется по прямой, то в атмосфере — по пространственной кривой, имеющей двоякую кривизну. Когда спутник находится в зените, рефракция радиолуча равна нулю. Наибольшее значение рефракции — когда зенитный угол более 80°. В этом случае атмосферные задержки сигналов превышают 10 м [132].

Согласно [9, 10], искажение дальности за счет влияния приземного слоя атмосферы может быть охарактеризовано выражением:

$$\Delta_{атм} = \int_{Ho}^{Hc} (n-1)\,(R_з + H)dH/\sqrt{(R_Ç + H)^2 - R_Ç^2}. \qquad (4.23)$$

Для расчета $\Delta_{атм}$ обычно применяют эмпирические формулы, в которых используется экспоненциальная модель атмосферы и метеорологические параметры, полученные в пункте наблюдений. Для примера в табл. 4.6 приведены вычисленные значения $\Delta_{атм}$ в зависимости от величины зенитного угла для температуры T = 288 °K и влажности e = 10 мб в точке наблюдения.

Таблица 4.6

Вычисленные значения $\Delta_{атм}$ в зависимости от величины зенитного угла для температуры T = 288 °K и влажности e = 10 мб в точке наблюдения

Z, град	0	20	40	60	70	80	85
$\Delta_{атм}$, м	2,41	2,56	3,14	4,80	7,0	13,4	24,2

Необходимо отметить, что введение поправок, вычисленных на основе метеоизмерений, зачастую дает худшие результаты, чем вычисления, сделанные с применением модели стандартной атмосферы. Исключение представляют измерения в горах.

Другой тип погрешностей — это ошибки, вызываемые «многолучевостью», которая обусловлена многократными переотражениями сигнала со спутника от окружающих предметов и поверхностей до того, как он попадает в антенну приемника, а также дифракцией на мелких предметах, соизмеримых с длиной волны, находящихся на пути радиолуча. При этом радиолуч проходит по другому пути, что вызывает изменение его амплитуды и фазы. В приемной антенне происходит интерференция прямого и отраженного лучей и, следовательно, изменяются амплитуда и фаза результирующего поля, что, в свою очередь, ведет к искажению измеряемой дальности. Ошибки, вызванные многолучевостью, все время меняются, что вызвано движением спутников. Искажения в значительной степени можно компенсировать, если наблюдения длятся дольше периода изменения погрешностей, а накопленные измерения обрабатываются совместно.

Для уменьшения влияния этого эффекта в спутниковых приемниках применяются специальные антенны и усовершенствованная техника обработки сигналов.

Все вышеперечисленные ошибки влияют на точность определения координат приемника. Кроме того, на точность оказывает влияние местоположения спутников, так называемый «геометрический фактор» — «Delution of Precision» — DOP (фактор понижения точности). Чем ближе к прямому угол между направлениями на спутники, тем точнее

определяется местоположение приемника. Так как расстояния до спутников определяются с ошибками, то местоположение определяемой точки находится в области, называемой эллипсом ошибок. В случае, когда направления на наблюдаемые спутники взаимно перпендикулярны, эллипс ошибок преобразуется в окружность. При этом влияние на точность геометрии расположения спутников минимально.

Для оценки точности позиционирования используются различные модифицированные понятия, которые связывают ошибку позиционирования m с ошибкой измерения расстояний до спутников m_D. Для вычисления ошибки позиционирования используется параметр DOP и ошибка определения расстояния до спутников:

$$m = DOP \cdot m_D. \qquad (4.24)$$

Универсальным является GDOP (геометрический фактор (ГФ) понижения точности с учетом погрешности определения времени):

$$GDOP = \frac{\sqrt{m_N^2 + m_E^2 + m_h^2 + m_t^2 c^2}}{m_D}, \qquad (4.25)$$

где m_N, m_E и m_h – средние квадратические ошибки определения координат по направлениям на север и на восток и по высоте; m_t – средняя квадратическая ошибка определения времени; c – скорость электромагнитных волн.

Наиболее используемым является PDOP (фактор понижения точности трехмерного позиционирования без учета погрешности определения времени). Кроме того, можно вычислить также значения HDOP (фактор понижения точности определения плановых координат), VDOP (фактор понижения точности определения высоты) и TDOP (фактор понижения точности из-за ухода часов приемника). Значения геометрического фактора могут быть вычислены заранее, перед началом наблюдений, из самой геометрии спутникового созвездия на основании приближенных значений координат пункта наблюдений, а также значение маски по углу возвышения на точке наблюдений. В качестве примера на рис. 4.15 приведены графики PDOP для Москвы на 19.10.05.

Как видно из рис. 4.15, значения DOP в течение суток значительно меняются. Не рекомендуется проводить измерения при значениях GDOP больше 8. Значения PDOP, равные 4 и менее, указывают на хорошие условия наблюдений. При значениях $4 < PDOP < 8$ условия наблюдений удовлетворительные. При значениях $8 < PDOP$ условия наблюдений считаются плохими. Кинематические съемки, имеющие короткие периоды наблюдений очень критичны к значению фактора DOP, и поэтому их не рекомендуется выполнять при значениях PDOP более 7. Статические и быстростатические съемки, которые требуют значительно большего периода наблюдений по сравнению с кинематической съемкой, менее подвержены влиянию большого значения PDOP,

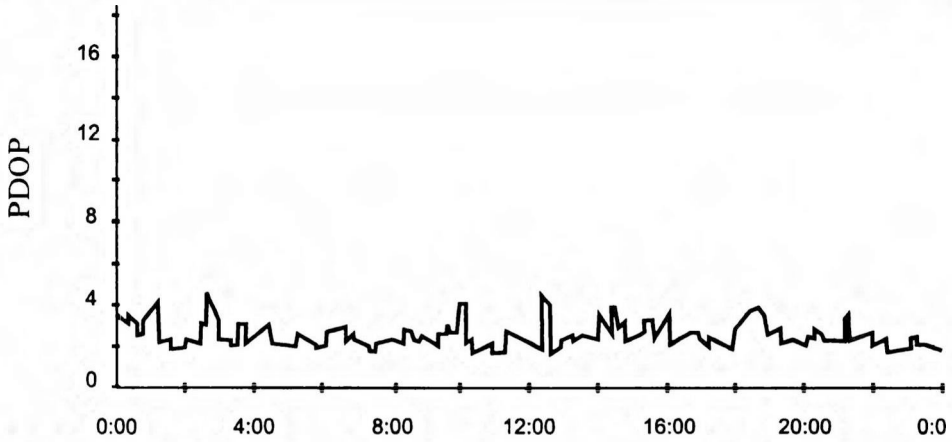


Рис. 4.15. График суточных изменений PDOP для пункта, расположенного в г. Москве (по альманаху от 19.10.05 – угол ограничения по высоте спутника над горизонтом – 15°)

так как это значение, как правило, снижается на протяжении периода наблюдений. Необходимо отметить, что эти расчеты иногда могут не соответствовать условиям наблюдений, когда спутники загорожены местными предметами (строениями, деревьями и т.п.), т.е. вычисленные значения DOP будут занижены по сравнению с реальными.

При углах закрытия горизонта 10° получают надежные значения координат определяемой точки. С увеличением угла закрытия горизонта, например, в горной местности, точность понижается. Согласно [6], на широтах свыше 20° и углах закрытия горизонта 30° и более, как правило, будут наблюдаться менее 4 спутников.

Спутники в «созвездии» Navstar обращаются синхронно с вращением Земли, и поэтому в каждой точке Земного шара создается в одно и тоже время суток одинаковый геометрический фактор. При этом могут образовываться области с пониженными значениями DOP. В ГЛОНАСС этот недостаток отсутствует, так как выбранные орбиты спутников обеспечивают непрерывное изменение конфигурации созвездия над одним и тем же местом для одного и того же времени, периодически повторяясь через каждые 8 суток.

Современные спутниковые приемники имеют программу, которая анализирует относительное положение всех доступных для наблюдения спутников и выбирает из них четыре, расположенные наилучшим образом, которые и используются для определения координат точки. Более точные результаты получают, когда выполняют обработку измеренных расстояний до всех спутников, находящихся в поле зрения.

Поэтому одним из важнейших направлений совершенствования и развития спутниковой радионавигации является совместное использование сигналов ГЛОНАСС и GPS, а в будущем – Galileo. Основные

цели этого процесса – повышение точности и надежности (доступности, непрерывности обслуживания и целостности) навигационных определений.

По сложности технических решений и объему аппаратных затрат спутниковые приемники разделяют на:

– одноканальные (в том числе мультиплексные, приемник очень быстро переключается между сигналами орбитальной группировки), которые в каждый текущий момент времени ведут прием и обработку радиосигнала только одного спутника, и
– многоканальные, позволяющие одновременно принимать и обрабатывать сигналы нескольких спутников.

В настоящее время в основном выпускаются многоканальные приемники.

Кроме того, приемники можно разделить на односистемные, принимающие сигналы GPS, и двухсистемные, принимающие сигналы ГЛОНАСС и GPS. В зависимости от вида принимаемых и обрабатываемых сигналов приемники делятся на:

– одночастотные, кодовые, работающие по С/А-коду;
– двухчастотные, кодовые;
– одночастотные кодово-фазовые;
– двухчастотные кодово-фазовые.

Кодовые приемники (handheld) предназначены для определения трехмерного положения точки, скорости и направления движения. Они позволяют определять плановое положение точки, как правило, с точностью до единиц м, а высотное положение определяется с точностью порядка 10 м. (Двухчастотные кодовые приемники обеспечивают субметровую точность (см. табл. 4.7 Приложения)). Для повышения точности высотных измерений в них встраивают баровысотомер. Эти приемники удобны при выполнении полевых географических и геологических работ, так как на экране можно отобразить карту маршрута, определять свое местоположение, расстояние, направление и время прибытия к цели. Полученные результаты могут накапливаться и храниться в памяти прибора, а затем вводиться в компьютер для дальнейшей обработки. Эти приемники имеют малые габариты и массу, работают в широком диапазоне температур и малоэнергоемки. Первым таким спутниковым приемником с встроенным микробаронивелиром, созданным для работ на закрытых территориях (в лесу), можно назвать ИГ-3К (рис. 4.16).

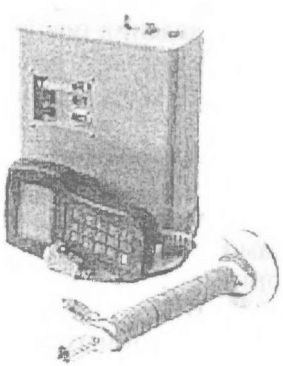


Рис. 4.16. Спутниковый приемник ИГ-3К с встроенным баронивелиром

В состав комплектации входит программное обеспечение работы в кодовом и фазовом режимах (см. табл. 4.8). Преимущества прибора ИГ-3К по сравнению с аналогичными одночастотными кодовыми приемниками GPS заключается в возможности определения высоты пунктов с точностью до 0,3 м при работе в залесенной местности, а также сравнительно невысокой стоимости.

Таблица 4.8

Технические характеристики ИГ-3К

Рабочий диапазон измерений: атм. давление, гПа	не ограничен
Рабочая температура прибора, С	от −30 до +50
Точность (СКО): по коду; в плане, м	от 0,5 до 1,5
по высоте, м	от 1,0 до 3,0
по фазе несущей, м	от 0,01 до 0,5
(в зависимости от времени измерений)	
по высотомеру, м	от 0,3 до 1,0
Память, МБ	128
Энергоснабжение	
от встроенной аккумуляторной батареи	7,5 В; 9,0 Ач,
от внешнего источника пост. тока	от 7 до 15 В
Потребляемая мощность, Вт	от 0,3 до 2,5
Масса с блоком питания, кг	3,3
Габариты, мм	95x200x250

Прибор ИГ-3К защищен патентом Российской Федерации № 2104487, зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 23269-02 и допущен к применению в Российской Федерации, сертификат RU.C3Q.Q04.A № 12687.

ИГ-3К позволяет осуществлять не только планово-высотную съемку местности, но и выполнять весь комплекс изысканий, включая и скоростной вынос проекта в натуру.

В последние годы фирмы, выпускающие портативные (персональные) спутниковые приемники типа Гармин, Магеллан и др., также начали оснащать портативные спутниковые приемники барометрическими альтиметрами (см. табл. 4.7 Приложения). Точность определения плановых координат такими приемниками по спутниковым наблюдениям составляет 3—5 м, а высот, измеряемых автономно барометрическим альтиметром — порядка 3 м, т. е. выше, чем определение высот из автономных спутниковых наблюдений. (Как уже отмечалось, спутниковое определение высот этими приемниками в закрытой местности может осуществляться с ошибкой в десятки метров.) Все большее распространение получают двухсистемные приемники, работающие с системами ГЛОНАСС и GPS.

Например, ручной персональный навигационный приемник (кодовый приемник СН-4001), выпускаемый ЗАО «КБ НАВИС», предназначен для определения по сигналам спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS (SBAS,WAAS, MSAS и EGNOS) в реальном масштабе времени текущих значений координат потребителя, вектора скорости в любой точке земного шара, в любой момент времени и независимо от метеоусловий (рис. 4.17).

Этот приемник осуществляет кодовый прием сигналов C/A и CT на частоте L1 с возможностью измерений по фазе кода и фазе несущей. Кроме того, он позволяет работать в дифференциальном режиме с широкозонными диффсистемами без использования дополнительного оборудования и с локальными диффсистемами (при этом необходимо дополнительное оборудование: модемы, MSK-приемники). Приемник имеет встроенные функции тестирования и калибровки приемных каналов, выход метки времени 1 с, синхронизацию работы приемника от внешней временной метки и обеспечивает контроль целостности сигналов СНС (RAIM). Технические характеристики приемника представлены в табл. 4.9.

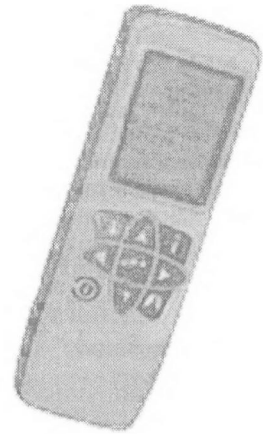


Рис. 4.17. Внешний вид двухсистемного кодового приемника СН-4001, выпускаемого ЗАО «КБ НАВИС»

Таблица 4.9

Технические характеристики двухсистемного кодового приемника СН-4001, выпускаемого ЗАО «КБ НАВИС»

24 универсальных канала All-in-view режим;	
ГЛОНАСС L1-диапазон (1595-1610 МГц), СТ-код;	
GPS/WAAS/MSAS/EGNOS L1-диапазон (1575,42 МГц), C/A-код.	
Точность определения координат:	
по СНС ГЛОНАСС/GPS	10–20 м;
по СНС ГЛОНАСС/GPS с использованием сигналов WAAS/MSAS/EGNOS	3–5 м;
по СНС ГЛОНАСС/GPS с использованием дифрежима	1–3 м.
Погрешность определения вектора скорости:	
по СНС ГЛОНАСС/GPS	0,1 м/с;
по СНС ГЛОНАСС/GPS с использованием дифрежима	0.1 м/с.
Время начального определения («холодный»/«теплый» старт)	90/50 с.
Дисплей	монохромный графический ЖКИ, 240x160 пикселей.
Антенна	встроенная (или выносная).
Частота обновления информации на ЖКИ	1 Гц.
Временная метка	1 Гц (систем GPS или ГЛОНАСС) синхронизирована по UTC.

Ввод и хранение	до 1000 маршрутных точек, до 50 маршрутов по 30 точек
Рабочая температура:	
приемник	–20 +55° С;
выносная антенна	–40 +55° С.
Размеры приемника	65x180x42 мм.
Масса (с элементами питания)	не более 0,5 кг.
Напряжение питания	6 элементов типа АА.
Потребляемая мощность	не более 1,5 Вт;
2 последовательных RS-232 порта.	
Протоколы обмена	NMEA-0183, BINR, RTCM SC-104.
Система координат	WGS-84, ПЗ-90, СК-42.

В геодезических работах в основном используются кодово-фазовые двухчастотные и одночастотные приемники. В последние годы из них все большее распространение имеют двухсистемные приемники, обеспечивающие более высокую точность и надежность измерений. Это объясняется тем, что в северных широтах российская система ГЛОНАСС, разрабатывавшаяся для навигации, связи и наведения, например, истребителей МиГ-31 над Северным полюсом, действует в 1,3–2,5 раз точнее, чем американская система Navstar. В средней и южной полосах России это преимущество ГЛОНАСС перед американской системой сведено на нет, зато преимущество Navstar – в числе спутников, сигналы с которых одновременно «прослушивает» навигационный приемник.

В качестве примера на рис. 4.18 [40] представлена обобщенная структурная схема GPS-приемника. Антенна может быть встроена в приемник либо быть в виде модуля, подключаемого к приемнику с помощью каоксиального кабеля. Мощность передатчика, установленного на спутнике, сравнительно невелика (около 10 Вт), и поэтому принимаемый сигнал очень мал. Усиление сигнала осуществляется с помощью СВЧ предусилителя, который, как правило, встроен в корпус антенны. Антенны бывают одночастотные, настроенные на частоту L1, либо двухчастотные для приема частот L1 и L2.

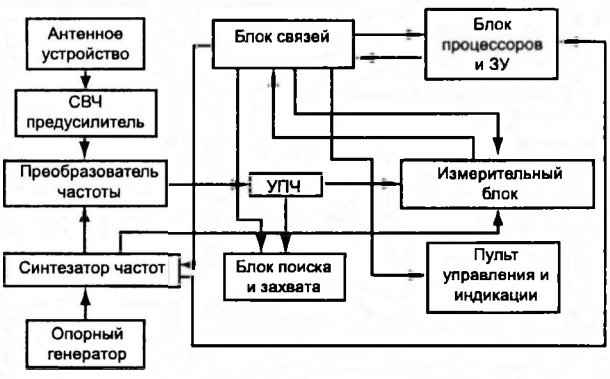


Рис. 4.18. Обобщенная структурная схема GPS-приемника [40]

Наряду с диаграммами направленности, важным показателем антенного устройства

спутникового приемника является понятие фазового центра, его положение и стабильность этого положения с течением времени. Фазовый центр антенны является определяемой точкой, поэтому предусмотрена возможность ее центрирования на станции. При этом под фазовым центром понимают ту неподдающуюся геометрическим измерениям точку в антенной системе, от которой отсчитываются все измеряемые до спутников расстояния, а ее положение «привязывается» к центру знака на пункте наблюдения.

Антенны, как правило, выполнены в виде полусферы, что позволяет в идеальном случае обеспечивать одинаковую задержку по фазе для радиоволн, приходящих с разных сторон. В действительности все же наблюдается зависимость величины фазовой задержки от направления на спутник, и поэтому для каждой антенны такую зависимость (диаграмму направленности) определяют в заводских условиях. Для высокоточных геодезических спутниковых приемников уклонения реальной фазовой характеристики антенны от идеальной обычно не превышают 5—10 градусов, что соответствует ошибкам в определении расстояний на уровне около 3—5 мм. При этом на корпус антенны наносят метку, по которой ее ориентируют на север, что позволяет учитывать заводскую характеристику антенны. Чтобы уменьшить влияние радиосигналов, отраженных от подстилающей поверхности и различных местных предметов, используют экранирующие диски, установленные под антенной.

Для усиления мощности принятого сигнала служит усилитель, который подключен, как и синтезатор частот, к преобразователю частоты. Принимаемые колебания после предварительного усиления подвергаются преобразованиям, вследствие чего понижается частота несущих колебаний до нескольких десятков мегагерц, т.е. применяется супергетеродинный принцип приема. Образующуюся при этом промежуточную частоту часто называют частотой биений. Синтезатор частот работает от высокостабильного опорного кварцевого генератора, входящего в состав приемника. В результате преобразователь частоты понижает частоту несущих колебаний до частоты биений в несколько десятков МГц, которые усиливаются в усилителе промежуточной частоты (УПЧ).

С УПЧ сигналы поступают в измерительный блок и блок поиска и захвата, который осуществляет поиск сигнала на основе кодово-корреляционных методов и отслеживание в течение всего сеанса наблюдений. В измерительном блоке сигналы разделяются на кодовые и гармонические, а также сигналы навигационного сообщения. Полученные из кодовых сигналов значения псевдодальностей используются для грубого определения координат и вектора скорости перемещения подвижного объекта, на котором установлен приемник. В камеральных условиях на стадии «постобработки» производится окончательная обработка фазовых измерений.

Блок процессоров осуществляет управление предварительными вычислениями и работой приемника в автоматическом режиме на основе заложенного в него программного обеспечения. Регистрация отсчетов

производится с высокой частотой (как правило, через 0,1 с) с выполнением последующей корректировки, обусловленной изменениями измеряемых дальностей, вызванных быстрыми перемещениями спутников. Полученные данные подвергаются сглаживанию и уплотнению, в результате чего образуются выборки, интервал между которыми находится в пределах от 1 до 60 с и может изменяться по желанию оператора.

Пульт управления и индикации включает в себя буквенно-цифровую клавиатуру и индикаторное табло, на котором по желанию оператора могут отображаться определяемые с помощью приемника величины, а также другая вспомогательная информация. Информация о местоположении определяемой точки отображается на экране дисплея непосредственно в процессе сеанса наблюдений, а клавиатура позволяет оператору вводить необходимую информацию и различного рода команды, связанные с управлением работой приемника.

В процессе работы в приемнике производится предварительная обработка получаемой информации и ее регистрация с помощью тех или иных запоминающих устройств, выполняется самодиагностика правильности функционирования приемника, контролируются источники питания и выполняется целый ряд других операций. Для этих целей служит встроенная специализированная микро-ЭВМ, включающая в себя процессоры, таймер, различные запоминающие устройства (ОЗУ и ПЗУ), интерфейсные платы для стыковки с пультом управления и индикации, с внешней регистрирующей аппаратурой и т. п. Управление осуществляется с помощью пульта управления и индикации согласно вводимой в приемник программы.

Геодезические спутниковые приемники обеспечивают высокую точность измерений, малогабаритны, имеют значительный объем внутренней памяти, которая может наращиваться и составлять 100 и более Мб, просты в обращении. Технические характеристики спутниковых геодезических приемников приведены в табл. 4.10 Приложения.

В РФ выпускается двухсистемный геодезический приемник РИРВ ГЕО-161 (рис. 4.19), который имеет внутреннюю память и панель управления. При необходимости к нему может быть подключен контроллер, поддерживающий Windows CE, с программным обеспечением, разработанным в ОАО «Российский институт радионавигации и времени».



Рис. 4.19. Внешний вид двухсистемного геодезического приемника ГЕО-161

В рабочий комплект аппаратуры входят 2 или более приемников, программа управления приемником, пакет программ постобработки BL-G1, руководство по спутниковой съемке.

При необходимости в состав комплекта вместо одного из приемников может быть включена базовая станция СБС-161, предназначенная для стационарной установки. С приемником ГЕО-161 можно использовать набор аксессуаров многих фирм-производителей благодаря комплекту установочных переходников.

Технические характеристики аппаратуры ГЕО-161 приведены в табл. 4.11.

Таблица. 4.11

Технические характеристики двухсистемного геодезического приемника ГЕО-161

Навигационные системы	ГЛОНАСС и/или GPS
Число каналов	16 универсальных каналов на частоте L1 (код, фаза несущей)
Запись данных	3,5 Мб (применяется эффективный алгоритм сжатия, позволяющий записывать 11 часов при 1 секундной регистрации)
Коммуникационные порты	1 последовательный
Статика, быстрая статика при 5 и более спутниках (точность в плане)	при длине линии < 10 км: 5 мм + 1 мм/км и при длине линии > 10 км: 5 мм + 2 мм/км
Статика, быстрая статика при 5 и более спутниках (точность по высоте)	10 мм + 2 мм/км
Кнематика (точность в плане)	10 мм + 2 мм/км
Кинематика (точность по высоте)	20 мм + 2 мм/км
Кинематика без инициализации	при длине линии < 50 км: 0,5 м
Режим реального времени	не применяется
Время инициализации	не более 2 мин.
Ударопрочность	выдерживает падение с высоты 2 м
Рабочая температура, °С	от –40 до +65
Электропитание	встроенный аккумулятор, до 12 час.
Размеры приемника, см	21 x 21 x 13
Вес приемника с аккумулятором, кг	2,3
Антенна	микрополосковая, встроенная в корпус приемника
Корпус	является экраном для отражений от подстилающей поверхности
Гарантийный срок	1 год

За рубежом выпускают как односистемные (Navstar), так и двухсистемные (Navstar + ГЛОНАСС) геодезические спутниковые приемники, которые могут быть как одночастотными, так и двухчастотными. Одночастотные приемники имеют малые габариты и массу и отличаются небольшим энергопотреблением. Так, например, геодезический спутниковый одночастотный 12-канальный приемник Stratus фирмы

Sokkia имеет массу 0,8 кг и может работать при температуре от –40 до +65 °С. Он работает на частоте L1 по коду и полной фазе несущей. Используемая программа предназначена для планирования работ, сбора и обработки информации и выполнения съемки с использованием контроллера. Программа Stratus Controller, входящая в комплект поставки, после инсталляции позволяет управлять приемником без проводных соединений, получать информацию о количестве наблюдаемых спутников и объеме свободной памяти, а также о заряде батарей.

Приемник Stratus объединяет в одном корпусе GPS-процессор геодезического класса, антенну, память и элементы питания. Конструкция прибора предназначена для эксплуатации даже в неблагоприятных погодных условиях. Приемник Stratus имеет следующие технические характеристики:

Число каналов:	12 каналов, L1 C/A-код и полная фаза несущей, 55 ч. с интервалом 10 с
Внутренняя память	4 МБ
Запись данных	11 ч. с интервалом 2 с. (8 спутников)
Коммуникационные порты	1 инфракрасный, 1 последовательный
Статика, быстрая статика при 5 и более спутниках (точность в плане)	5 мм + 1 мм/км
Статика, быстрая статика при 5 и более спутниках (точность по высоте)	10 мм + 2 мм/км
Кинематика (точность в плане)	12 мм + 2,5 мм/км
Кинематика (точность по высоте)	15 мм + 2,5 мм/км
Режим DGPS (точность в плане)	нет
Режим DGPS (точность по высоте)	нет
Точность дифференциального координирования WAAS, м	нет
Режим реального времени (точность в плане)	не применяется
Режим реального времени (точность по высоте)	не применяется
Время инициализации, с	45
Ударопрочность	Выдерживает падение вместе с вешкой высотой 2,2 м Отдельно приемник выдерживает падение с высоты 1 м
Рабочая температура, °С	от –20° до +65° (при использовании внешнего питания – от –40° до+65°)
Электропитание	2 аккумулятора BDC46, 30 ч непрерывной работы (при 20 °С)
Размеры приемника, см	12,5x15,5
Вес приемника с батареями, кг	0,8
Антенна	встроенная в корпус приемника
Гарантийный срок	2 года

4.4. Способы спутниковых измерений

В работе [132] приведена классификация способов спутниковых измерений, которые можно условно разделить на:

- АБСОЛЮТНЫЕ
  - автономные;
  - дифференциальные (DGPS, DGLONASS);
  - постобработка (postprocessing);
  - реального времени (RT DGPS).
- ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ (relative, baselines).
- СТАТИЧЕСКИЕ
  - статика (statics);
  - ускоренная статика (fast, rapid statics);
  - псевдостатика (pseudostatics, reoccupation).
- КИНЕМАТИЧЕСКИЕ (kinematics)
  - непрерывная (continuous) постобработка;
  - «Стой и иди» («Stop and go») постобработка;
  - реального времени (Real Time K. – RTK).

Автономное определение координат

Способами абсолютного позиционирования определяют координаты пунктов наблюдения, а относительными – находят приращение координат или вектора между двумя пунктами. Относительные методы измерений обеспечивают большую точность, при этом основные измерения выполняются фазовым методом; параллельно с этим в целях нахождения приближенных значений координат и разрешения неоднозначности фазовых циклов измеряют кодовые псевдодальности.

Точность способов значительно различается и колеблется от долей сантиметра до сотни метров. Наибольшую точность обеспечивают дифференциальные и особенно относительные способы, в основе которых лежит предположение, что измерения с двух станций до спутника искажены примерно одинаково. Чем станции ближе друг к другу, тем коррекция ошибок измерений эффективнее.

При автономном определении точки ее положение определяется с помощью одного спутникового приемника независимо от измерений на других станциях. Для определения координат точки на земной поверхности с помощью спутников необходимо знать координаты не менее четырех спутников и дальность от точки до спутника. Расстояние между определяемой точкой и спутником в декартовой (геоцентрической) системе координат определяется согласно формуле:

$$\rho = \sqrt{(X_s - X_p)^2 + (Y_s - Y_p)^2 + (Z_s - Z_p)^2}. \qquad (4.26)$$

Здесь X_p, Y_p и Z_p, X_s, Y_s и Z_s – координаты точки и координаты спутника в геоцентрической системе координат.

Измеряемое расстояние до спутника (псевдодальность) $R_{изм}$ отличается от истинного за счет уклонения показаний часов приемника $\delta t_{пр}$, уклонения показаний часов спутника δt_c относительно эталонного времени, а также за счет временных задержек $\delta t_{атм}$, обусловленных влиянием атмосферы:

$$R_{изм} = \sqrt{(X_в - X_р)^2 + (Y_в - Y_р)^2 + (Z_в - Z_р)^2} + c(\delta t_{пр} - \delta t_c + \delta t_{атм}). \qquad (4.27)$$

При вычислении $R_{изм}$, согласно (4.27), величина δt_c для каждого спутника определяется с помощью станций слежения, входящих в состав сектора управления и контроля, и передается в составе навигационного сообщения каждому потребителю; значение поправки $\delta t_{атм}$ предвычисляют на основе моделирования задержек, возникающих при прохождении радиосигнала через ионосферу и тропосферу. Следовательно, формула (4.27) содержит в своем составе четыре неизвестные величины: координаты станции ($X_р$, $Y_р$, $Z_р$) и поправку на уход часов приемника $\delta t_{пр}$. Эти неизвестные определяют путем решения системы уравнений, полученных по результатам одновременных наблюдений не менее четырех спутников.

Для того чтобы координаты спутников были известны, излучаемые ими радиосигналы модулируются сообщениями о параметрах их движения. Приемник, установленный в определяемой точке, принимает и обрабатывает эти сигналы. В результате происходит выделение этих сообщений и определение координат спутников на нужный момент времени. Так как координаты и составляющие вектора скорости меняются очень быстро, то сообщения о параметрах движения спутников содержат сведения не об их координатах и составляющих вектора скорости, а информацию о параметрах некоторой модели, аппроксимирующей траекторию движения спутника на достаточно большом интервале времени (около 30 минут). Траектория полета спутника разбивается на участки аппроксимации длительностью в один час, и в центре каждого участка задается узловой момент времени. При этом основными определяющими параметрами являются измеренные псевдодальности до четырех и более спутников, на основании которых линейной засечкой определяется пространственное положение определяемой точки. В приемнике выделяется интервал времени между узловым моментом и моментом, в котором определяется положение спутника. На основе навигационного сообщения для этого периода вычисляются параметры модели, и затем определяются координаты и составляющие вектора скорости спутников. На последнем этапе определяют дальность до каждого видимого спутника.

Для вычислений в системе GPS используют Кеплеровскую модель, а в ГЛОНАСС для определения точного положения спутника – дифференциальные модели движения. В последнем случае координаты и составляющие вектора скорости спутника определяются численным интегрированием дифференциальных уравнений движения спутника,

учитывающих силы, действующие на спутник. Начальные условия интегрирования задаются на узловой момент времени, располагающийся посередине интервала аппроксимации.

Средняя квадратическая ошибка определения плановых координат точки одночастотным кодовым приемником в автономном режиме довольно значительна и составляет 5 м, а в режиме избирательного доступа SA ~±10 м. Это объясняется тем, что данный способ чувствителен ко всем искажениям, которые представлены в табл. 4.12. Как видно из этой таблицы, наибольшие искажения в результаты измерений с помощью одночастотного кодового приемника вносят задержки в верхних и нижних слоях атмосферы.

Таблица 4.12

Источники ошибок при измерении одночастотным кодовым приемником

Источники ошибок	Средняя квадратическая ошибка, м
Спутник – нестабильность частоты, уход шкалы времени	1
Спутник – эфемериды	1
Атмосфера – задержки в верхних и нижних слоях	4,5
Приемник – нестабильность частоты, уход шкалы времени, шумы, многолучевость	1
SA – избирательный доступ	9,5

Чтобы оценить точность определения координат, необходимо учитывать геометрический фактор. Как сказано выше, геометрический фактор (ГФ) характеризует потери точности из-за геометрии засечки (геометрии расположения спутников). Средняя квадратическая ошибка положения пункта в пространстве равна произведению ГФ на среднюю квадратическую ошибку измерения псевдодальностей (см. формулу (4.24). При наблюдениях стремятся, чтобы ГФ < 4. Если полагать, что при автономных наблюдениях геометрический фактор равен 3, и учитывать ранее указанные точности измерений, получим, что положение станции в пространстве характеризуется СКО ~±15 м, а в режиме SA ~±30 м. Точность можно значительно повысить, если увеличить время измерений и выполнять их двухсистемным приемником (наблюдая одновременно спутники GPS и ГЛОНАСС) и использовать для обработки все измерения.

Атмосферные задержки значительно компенсируются, когда используется двухчастотный кодовый приемник. Средняя кадратическая ошибка при автономном определении плановых координат этим приемником составляет порядка 4 м. Средняя квадратическая ошибка определения высоты кодовыми приемниками в несколько раз больше плановой и может составлять десятки метров, поэтому для повышения

точности определения высот точек в кодовые приемники встраивают барометрические нивелиры, которые определяют высоты с субметровой точностью.

Дифференциальный способ

При выполнении геодезических работ, как правило, требуется более высокая точность определения координат точек, чем при автономных измерениях. Один из основных методов повышения точности определения местонахождения объекта основан на применении известного принципа дифференциальных измерений. Поэтому при выполнении геодезических работ в основном используется дифференциальный способ – DGPS (Differential GPS) спутниковых измерений как более точный. Дифференциальный способ основан на предположении, что многие погрешности одинаково влияют на измерения с каждой станции. При измерениях один спутниковый приемник устанавливается на «опорной» или, как ее называют, «базовой» точке. Одновременно с этим приемником принимает сигналы другой приемник – подвижный (rover), он последовательно перемещается на определяемые точки. Одновременно работающих подвижных приемников может быть несколько. Программа обработки позволяет вычислить координаты базовой точки по спутниковым измерениям и оценивать их изменения во времени, которые учитываются при вычислении координат определяемых точек. Таким образом, поправки для подвижной станции находятся путем сравнения известных (постоянных) координат базовой станции с определяемыми в соответствующий момент времени координатами этой же станции.

Существуют несколько методов дифференциальной коррекции: в реальном времени и в постобработке. Поправки могут вводиться как в псевдодальности, так и в координаты. В первом случае поправки определяют из сравнения измеренных на базовой станции псевдодальностей с вычисленными псевдодальностями по известным координатам базовой станции и спутника.

Во втором случае определяют поправки в координаты, которые получают как разности между определенными в автономном режиме координатами базовой стации, относящимися к различным моментам времени. При использовании дифференциальной коррекции очень важно, чтобы базовый и подвижный приемники измеряли псевдодальности одновременно до одних и тех же спутников.

При реализации дифференциального способа в значительной степени компенсируются искажения, вызванные погрешностями работы спутниковой аппаратуры (например, ошибки показаний спутниковых часов), погрешностей в определении текущего положения спутника, ионосферных и тропосферных задержек. Необходимо отметить, что задержки в приемнике пользователя исключаются тем же путем, как и при работе в автономном режиме, т. е. наблюдением че-

тырех спутников. При дифференциальной коррекции значительно снижаются требования к точности определения эфемерид спутника. На схеме, представленной на рис. 4.9, S – расстояние между станциями; δS – допустимая ошибка; r – расстояние до спутника, тогда δr – допустимая ошибка определения орбиты. Из рис. 4.20 можно заключить, что $\delta r/r = \delta S/S$.

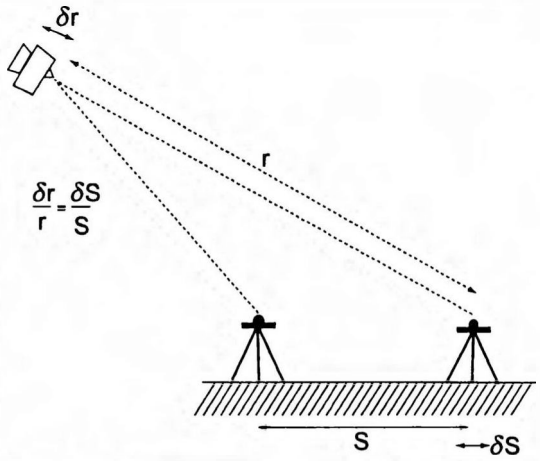


Рис. 4.20. Влияние погрешности в эфемеридах

Например, если требуется получить ошибку определения базовой линии не более 50 мм при ее длине в 50 км, необходимая точность определения параметров орбиты составит 20 метров.

Таким образом, погрешности в эфемеридах в значительной мере исключаются: чем меньше расстояние между станциями, тем точнее коррекции. Так как приемники находятся на незначительном расстоянии друг от друга, то условия прохождения сигнала на них примерно одинаковы, и поэтому атмосферные задержки в значительной степени компенсируются. При длине базовой линии менее 10 км искажения, вызываемые влиянием атмосферы, практически одинаковы, и они возрастают при увеличении ее длины, а также из-за локальных неоднородностей на трассах.

Точность дифференциального способа зависит от приемника, используемой антенны, программного обеспечения и расстояния между объектом и опорной станцией, которое может быть от нескольких десятков до нескольких сотен и даже тысяч км. Получаемая точность главным образом зависит от расстояний между пунктами. При выполнении геодезических работ опорную станцию обычно располагают не далее 50 км от объекта. При фазовом методе измерений точность характеризуется величинами от см до дм. Для навигационных измерений радиус действия базовой станции может составлять до 2000 км. Для кодовых приемников точность составляет от нескольких дециметров до нескольких метров. Наиболее эффективно компенсируются систематические ошибки, обусловленные внешними (по отношению к приемнику) причинами.

Постобработка

Наиболее точные результаты при выполнении геодезических работ получают в постобработке при наблюдениях в статике, которые являют-

ся наиболее трудоемкими. В этом случае базовая станция записывает наблюдения прямо в компьютерный файл. Передвижной приемник также записывает свои данные в компьютерный файл. Накопление измерений может происходить с интервалом от 1 с до 5 мин. В камеральных условиях эти два файла обрабатываются вместе с помощью специального программного обеспечения, и на выходе получается дифференциально скорректированный файл данных передвижного приемника. При этом фазовые измерения одного приемника комбинируются с данными другого приемника с целью образования так называемых двойных разностей, в которых ошибка не синхронности часов приемника и спутника сводится к минимуму. Далее, после процедуры фильтрации, при помощи двойных разностей вычисляются координаты фазового центра антенны одного приемника относительно другого. Если координаты одного приемника известны в некоторой местной системе координат, то координаты второго приемника тоже получают в этой же системе координат. Точность результатов зависит от продолжительности наблюдений и длины базы (расстояния между точками). Первое применение измерений на несущей фазе для точного статического позиционирования было выполнено в начале 1980-х годов. При этом приходилось выполнять непрерывные измерения в течение продолжительного промежутка времени, что было связано с небольшим количеством спутников. В дальнейшем при увеличении созвездия спутников и более точным моделированием их орбит время наблюдений значительно сократилось.

Обычно в статике одновременные GPS-наблюдения на базовой и подвижной точках выполняются в течение 1 часа. При этом большинством геодезических спутниковых приемников достигается следующая точность в плане:

$5\ \text{мм} + 1 \cdot 10^{-6}\ D$ при $D \leqslant 10$ км,

$5\ \text{мм} + 2 \cdot 10^{-6}\ D$ при $D > 10$ км,

а точность по высоте:

$10\ \text{мм} + 2 \cdot 10^{-6}\ D$, где D – длина базы.

Как показали исследования [173], при наблюдениях в течение 6 часов точность увеличивается в 1,5 раза. Если длительность наблюдений 5 мин., то фазовые наблюдения обеспечивают дециметровую точность. Необходимо отметить, что одновременные наблюдения спутников GPS и ГЛОНАСС, которые могут быть выполнены с помощью двухсистемных геодезических спутниковых приемников позволяют достичь сантиметровой точности в 3–6 раз быстрее [132].

Так как статика обеспечивает наибольшую точность и наиболее трудоемка, то ее обычно используют при изучении деформаций сооружений, на геодинамических полигонах и на наиболее важных геодезических работах. Для этих работ обычно используют двухсистемные

двухчастотные приемники, которые позволяют выполнять высокоточные измерения при длине базы в несколько десятков км. Одночастотные приемники рекомендуется использовать на длинах линий не более 10 км. Дальнейшее развитие спутниковых съемок привело к созданию новых способов измерений, таких как быстрая статика, псевдокинематика, кинематика Stop&Go.

Быстрая статика

Способ быстрой статики требует значительно меньше времени при выполнении наблюдений, причем длительность наблюдений зависит от числа наблюдаемых спутников. При этом точность результатов наблюдений по сравнению со статикой несколько снижается.

При 5 спутниках длительность наблюдений составляет ~20 мин., а при 6 спутниках – ~10 мин. Этот метод рекомендуется использовать на длинах линий не более 10 км. Другая разновидность статики – метод реокупации, который иногда называют псевдостатикой или псевдокинематикой. Согласно этому методу, подвижный приемник принимает сигнал на точке в течение 10 мин., затем его перемещают на другие точки и выполняют наблюдения. Через час приемник возвращают на прежние пункты и вновь повторяют наблюдения. Таким образом, на определяемых точках измерения зафиксированы в начале и конце интервала наблюдений. На базовой станции измерения выполняются непрерывно в течение всего времени наблюдений.

Кинематика

Для повышения производительности работ, когда требуется определять на местности значительное количество точек, используют ряд разновидностей кинематического позиционирования. При этом могут быть использованы как одночастотные, так и двухчастотные приемники. При работе в кинематике выполняются кратковременные наблюдения. Работа начинается с привязки (инсталляции) подвижного приемника к базовому вектору D, который определяется двумя конечными точками, координаты которых должны быть известны. Цель инсталляции – разрешить неоднозначность на известном базисе D.

Инсталляция может быть выполнена по четырем и более спутникам следующими способами.

Если положение базового вектора определено точнее 5 см, приемники устанавливают на его концах и выполняют наблюдения в течение нескольких минут. Затем подвижный приемник перемещают в определяемую точку и измеряют ее координаты. Накопление результатов осуществляется в течение нескольких секунд с интервалом 0,5–0,25 с. Все наблюдения должны осуществляться по одним и тем же спутникам, приемник при перемещении нельзя выключать.

При непрерывной кинематике можно цифровать весь маршрут подвижного приемника, фиксируя координаты через интервалы времени, затрачиваемые на перемещение приемника от точки к точке. Способ Stop&Go — «стой—иди» — позволяет определять требуемую точку и при необходимости выполнять на ней более длительные измерения, а затем перемещаться в следующую точку.

1. Если базовый вектор неизвестен, то в статике определяют координаты его конечных точек. Чтобы не использовать длинный базис, применяют способ перестановки антенн, одна из которых устанавливается на базовой станции, а другая – в стороне на расстоянии 10—15 м. Выполняют наблюдения в течение нескольких минут и затем наблюдения повторяют, поменяв места установки антенн (не смещая ранее установленные трегеры и штативы). Затем выполняют измерения, описанные в п. 1.

2. Часто применяется OTF – On The Fly (инициализация на лету), когда исходное положение приемника определяют по псевдодальностям. Этот метод инициализации используется при аэрофотосъемке для привязки центров фотографирования, а также в наземных маршрутных съемках. При этом выбирают объем пространства, в котором содержатся точные значения расстояний, их оценивают, используя средние квадратические погрешности псевдодальностей. Перебором вариантов в этом пространстве рассчитывают числа неоднозначности, которые разрешают за несколько секунд.

Вышерассмотренные способы кинематики, как и статики, подразумевают, что все полевые наблюдения и камеральная обработка накопленных данных разделены во времени. Для постобработки можно использовать также наблюдения, выполняемые на сотнях базовых станций, которые расположены в различных странах мира преимущественно в прибрежных зонах. Информация с этих станций может передаваться по телеметрическому каналу. Например, в России с 1998 г. действует бесплатная открытого пользования DGPS станция под Петербургом, которая передает поправки в международном формате по радиоканалу на частоте 298,5 кГц. Дальность действия – 150 км на суше и 300 км на море. При необходимости с этой станции можно получить поправки для требуемого момента наблюдений по Интернету. DGPS станции в основном предназначены для навигации и передают поправки по радиоканалам, т.е. для получения навигационных данных в реальном масштабе времени.

Получения точных координат непосредственно во время проведения полевых измерений для некоторых видов геодезических работ также является предпочтительнее. Для этого используется кинематика в реальном времени – RTK. При выполнении геодезических работ во многих случаях не требуется определять координаты пунктов в реальном време-

ни, а окончательную обработку результатов полевых измерений можно получать в камеральных условиях, т. е. выполнять «постобработку». Однако некоторые геодезические задачи, например выполнение работ по выносу в натуру, требуют проведения измерений в реальном времени.

Измерения в реальном времени – RTK

Одной из самых передовых технологий является RTK (Real Time Kinematik) – кинематика в реальном времени, которая позволяет определять координаты точек с сантиметровой точностью по фазе несущей в момент измерений. Ориентировочно точность кинематического позиционирования характеризуется СКО: ((10–20) + 2Dкм) мм.

RTK дает возможность полностью исключить необходимость повторного выезда на объект для исправления недостатков, выявленных в процессе обработки. Этот метод позволяет выполнять высокоточное позиционирование в реальном времени, даже во время движения передвижного приемника.

Для реализации этого способа необходимо иметь цифровой радиоканал, по которому данные с базового приемника передаются на подвижный (рис. 4.21).

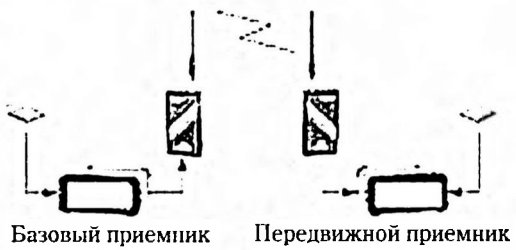


Рис. 4.21. Состав оборудования RTK

В состав оборудования входят базовая и передвижная станции, каждая из которых состоит из спутникового приемника, передающей антенны (для базового приемника), радиомодема и приемной антенны (для подвижного приемника). Как правило, модем на базовой станции используется для передачи данных, а на подвижной станции – только для их приема. Поэтому для базовой станции используется мощное передающее устройство, а для подвижной – недорогой принимающий радиомодем. Как правило, передающая антенна имеет больший коэффициент усиления, чем принимающая антенна. В некоторых RTK системах радиоприемник и радиопередатчик размещены в одном корпусе.

Во время работы базовая станция превращается как бы в «псевдоспутник». Эта станция с известными координатами вычисляет поправки и передает в эфир комбинированные сообщения для коррекции спутниковых измерений по радиоканалу в заранее оговоренном формате. В 1985 г. морская радиотехническая комиссия (RTCM) предложила стандартный формат для кодирования и передачи подобных поправок. Обычно используют формат RTCM SC-104. Этими сообщениями может воспользоваться любое количество ведомых приемников для устранения ошибок в своих измерениях. В настоящее время разработан новый

формат передачи данных «NTRIP». Можно использовать стандартный радиомодем, работающий в частотном диапазоне 410–470 МГц. К недостаткам при работе в режиме RTK следует отнести ограниченную эффективность дальности радиоканала (как правило, до 10–15 км) и обязательное требование к наличию радиовидимости между модемами базовой станции и подвижного приемника. Кроме того, достаточно высока вероятность радиопомех при работе в индустриальных районах. Для работы в RTK необходимо иметь разрешение ГРЧЦ на использование фиксированной радиочастоты – это обстоятельство также усложняет использование RTK.

Другим способом передачи поправок является использование технологии GSM RTK (т.е. сотовой телефонной связи), когда такого разрешения не требуется [29, 86], и кроме того, не требуется закупки дорогого радиооборудования. При этом можно легально работать везде, где существует GSM-покрытие. В этом случае в состав RTK системы входят базовая и передвижная станции, состоящие из GPS-приемника, антенны, радиоантенны и радиомодема с SIM-картой, обеспечивающей поддержку и включение услуги передачи данных. Проверка PIN-кода на обеих SIM-картах (для базового и для подвижного приемников) должна быть отключена. Базовая станция устанавливается на пункте с известными координатами, а с помощью передвижных GPS-приемников выполняется съемка объектов. Услуга передачи данных реализуется большинством операторов сотовой связи, например, московской сотовой сетью МТС (см. сайт www.mts.ru). Таким образом, ограничения, связанные с необходимостью иметь разрешение ГРЧЦ на использование фиксированной радиочастоты, отсутствуют при передаче данных по GSM-каналу. Помимо того, что для использования GSM-телефонов не требуется разрешение, они обладают и рядом других преимуществ – меньшими размерами, весом, энергопотреблением и стоимостью. Все крупнейшие российские операторы связи обеспечивают пакетную передачу данных в GSM-сетях. При использовании GPRS данные собираются в пакеты и передаются в эфир, заполняя не используемые в данный момент голосовые каналы, которые всегда есть в промежутках между разговорами абонентов. Использование сразу нескольких голосовых каналов обеспечивает более высокую скорость передачи данных. GPRS занимает участок частотного диапазона только в моменты фактической передачи пакетов, что обеспечивает чрезвычайно эффективное использование доступной полосы частот и позволяет делить один канал между несколькими пользователями (мобильными RTK приемниками). Пользователь платит не за время соединения, а за фактический объем переданной или полученной информации. Зона покрытия GPRS пока невелика и в основном соответствует крупным мегаполисам.

При работе в RTK «возраст» поправок, как правило, не должен превышать 0,5–2 секунды, а скорость передачи данных должна быть не

менее 2400 бит/с. Для осуществления передачи поправок полоса частот находится в спектре очень высоких частот (VHF) или ультравысоких частот (UHF). «Ведомые» приемники получают данные коррекции тем же путем, что и данные об эфемеридах от реальных спутников, поэтому при некоторых условиях базовая станция, т.е. «станция-псевдоспутник», может быть источником помех. Для реализации данного принципа используется комбинация фазовых данных L1 и L2. Методика OTF включает в себя фильтр поиска и технологию вычисления неоднозначности по методу наименьших квадратов. Скорость, с которой реализуется этот метод, зависит от ряда факторов, таких как количество отслеживаемых спутников, значения PDOP, величины шумовой составляющей сигнала спутников. При благоприятных условиях, разрешение неоднозначности выполняется в течение 10 секунд.

Для достижения наилучших результатов GPS-антенну базовой станции следует размещать в открытом месте, при этом поднимая радиоантенну на максимальную высоту. Даже при отсутствии препятствий радиосигнал после выхода от передающей антенны ослабляется согласно закону обратных квадратов. К тому же в приемник попадает вместе с «прямым» сигналом отраженный сигнал и искажает его. Мощность принимаемого сигнала также зависит от физических особенностей местности, рефракции, наличия зданий или других объектов.

В связи с тем, что нельзя точно описать детали окружающей среды, очень сложно точно предсказать величину затухания сигнала. Обычно передающая станция имеет мощность от 2 до 35 Вт. В большинстве случаев максимальная дальность распространения радиосигнала d в километрах может быть рассчитана по следующей эмпирической формуле:

$$d = 3{,}57\sqrt{k}\sqrt{h_{пер} \cdot h_{пр}}, \qquad (4.28)$$

где $h_{пер}$ и $h_{пр}$ – высоты антенн (в метрах) передающего и принимающего устройства; k – фактор эффективного радиуса Земли, учитывающий увеличение зоны радиовидимости за пределы геометрического горизонта вследствие влияния атмосферной рефракции. Значение k при стандартных климатических условиях составляет 1,33, но в зависимости от реальных условий может колебаться от 1,2 до 1,6. Например, при отсутствии препятствий на пути распространения радиосигнала и передающей антенны на высоте 30 м, а принимающей – на 2 м, максимальная дальность распространения радиосигнала составит 28 км. Любые препятствия на пути радиосигнала могут блокировать или переотражать радиосигнал, и поэтому влияют на дальность действия передатчика. Поэтому практически достичь такой дальности достаточно сложно. В то же время вследствие атмосферных аномалий дальность распространения радиосигнала может быть больше вычисленной.

В регионах, где требуется выполнение значительных объемов геодезических работ, обычно устанавливаются базовые станции с мощны-

ми радиопередатчиками, которые обеспечивают дальность действия до 50 км и дециметрово-сантиметровую точность. Из-за того, что передача данных в RTK передается в UHF и VHF диапазонах, существует ограничения в ее использовании.

Как уже отмечалось, в настоящее время существует множество локальных, региональных, широкозонных (глобальных) дифференциальных навигационных систем. Создано более 500 базовых станций, расположенных в разных странах мира, которые в своих прибрежных зонах передают дифференциальные коррекции в стандартном международном формате RTCM SC-104 и предлагают поправки свободно или за плату. Организованы службы, которые передают поправки через спутники связи. Например, в Швеции 21 станция обеспечивает дифференциальные измерения по всей стране. В Российской Федерации также систематически вводятся такие станции.

В качестве широкозонных известны такие системы, как американская, европейская EGNOS, японская. Эти системы используют сеть наземных станций, передающих информацию в центр управления для ее совместной обработки и затем – на геостационарные спутники для передачи поправок всем потребителям, находящимся в зоне их покрытия. Поправки RTCM SC-104 передаются в кодовом DGPS режиме со скоростью 200 бит/с. WAAS обслуживает Северную Америку и Северную Атлантику, MSAS – Японию и северную часть Тихого Океана, а глобальная система OMNISTAR охватывает весь Земной шар, за исключением Сибири, Гренландии и Канады. С 1993 года была запущена программа EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Services), направленная на улучшение работы систем GPS и ГЛОНАСС на территории Европы. В будущем планируется развернуть в Европе, Африке, Малайзии, Южной Америки и Канаде 34 станции для сбора информации и передаче ее на геостационарные спутники, зона действия которых показана на рис. 4.22. Точность определения координат составляет 2,5–5 м. Для приема сигналов EGNOS могут быть использованы как одночастотные, так и двухчастотные спутниковые приемники, выпускаемые отечественной промышленностью.



Рис. 4.22. Зоны действия геостационарных спутников EGNOS

Если широкозонные дифференциальные системы навигации охватывают значительные участки земного шара, то региональные системы предназначены для навигационного обеспечения несколько меньших участков земной поверхности (400–2000 км). Они могут иметь в своем составе одну или несколько опорных станций. Региональные системы используют в портах и по берегу морей и океанов, в крупных городах, на транспортных магистралях и судоходных реках.

Еще меньший радиус действия – от 50 до 220 км – имеют локальные системы. Как правило, они имеют одну базовую станцию. По способу применения их разделяют на морские, авиационные и геодезические.

4.5. Обработка спутниковых измерений

Так как геодезические измерения практически производятся на физической земной поверхности, то все непосредственные результаты этих измерений предварительно должны быть редуцированы на поверхность эллипсоида. Для числового решения геодезических задач на поверхности эллипсоида необходимо знать его размеры, которые характеризуются экваториальной или большой полуосью a = OE = OE = OA и полярным сжатием $\alpha = (a - b)/a$ (здесь b – полярная или малая полуось эллипсоида $b = OP = OP_1$). Размеры земного эллипсоида выводились неоднократно различными учеными. В табл. 4.13 приведены результаты некоторых выводов. В разных странах для вычисления своих триангуляций используются различные эллипсоиды. Так, например, в США применяются размеры эллипсоида Кларка 1886 г., во Франции – эллипсоида Кларка 1866 г., в Финляндии – эллипсоида Хейфорда.

Постановлением Совета Министров СССР от 7 апреля 1946 г. утверждены для геодезических работ размеры эллипсоида Красовского (экваториальная полуось a = 6 378 245 м, b = 6 356 863 м, полярное сжатие $\alpha = 1 : 298{,}3$).

Таблица 4.13

Размеры эллипсоидов, полученные различными авторами

Автор	Год	Большая полуось в м	Сжатие
Вальбек	1819	6 376 896	1/302,8
Бессель	1841	6 377 397	1/299,15
Кларк	1880	6 378 249	1/293,5
Слудский	1892	6 377 494	1/297,1
Жданов	1893	6 377 717	1/299,0
Хейфорд	1910	6 378 388	1/297,0
Красовский	1936	6 378 210	1/298,6
Красовский	1940	6 378 245	1/298,3

На основе выполненных геодезических измерений вычисляются координаты точек, расстояния между этими точками и т.п. Чтобы облегчить учет искажений и редуцирование геодезических данных с эллипсоида на плоскость, используют систему координат, непосредственно связанную с поверхностью Земли. Системы прямоугольных плоских координат с единым началом для всей поверхности эллипсои-

да, которая позволила бы отобразить все точки, быть не может, так как искажения становятся очень большими.

Поэтому земную поверхность разделяют на части или зоны, которые изображаются на плоскости одна независимо от другой, каждая со своим началом координат. В зависимости от величины и характера искажений возникают определенные требования к размерам и конфигурации этих зон. При выборе проекции следует стремиться к минимальному числу зон на территории данного государства. В нашей стране принята конформная проекция Гаусса–Крюгера. Эта проекция обеспечивает легкость перехода из зоны в зону и возможное единообразие при вычислениях в разных зонах.

В проекции Гаусса–Крюгера осевой меридиан изображается без искажения, а искажение длин на краю шестиградусной зоны может достигать величины порядка 1/500–1/2000. При учете этих искажений измеренные длины линий исправляют путем введения поправок.

Координаты точек определяют в системах координат СК-42 или СК-95. При ориентировании эллипсоида на исходном пункте совмещается отвесная линия на исходном пункте с нормалью к референц-эллипсоиду, а плоскость меридиана исходного пункта устанавливается параллельно оси вращения Земли по астрономическому азимуту. Система координат 1942 г. имеет начальный пункт – Пулково (широта B = +59°46′18,5″, долгота L = +30°19′38,6″). В некоторых случаях используют местную систему координат.

В различных странах используются различные размеры референц-эллипсоида и исходный пункт, на котором осуществлено внешнее ориентирование данного референц-эллипсоида.

В тоже время спутниковые GPS-приемники определяют координаты точек в WGS-84 (World Geodetic System) – Мировой геодезической системе координат 1984 г. для GPS, а спутниковые геодезические приемники ГЛОНАСС – в ПЗ-90 [13]. Эти системы координат являются геоцентрическими (прямоугольными пространственными) с началом в центре масс Земли. Поэтому возникает необходимость пересчета координат из одной системы в другую. В этом случае можно перейти от WGS-84 к ПЗ-90 (см. ГОСТ Р51794-2001), затем – на эллипсоид Красовского, вычислить геодезические координаты, нормальные высоты и плоские координаты Гаусса–Крюгера. Преобразование координат связанно с переносом начала координат и разворотом осей [2-4].

Как уже отмечалось, спутниковые приемники ГЛОНАСС определяют координаты точек в системе координат ПЗ-90, которая является геоцентрической прямоугольной пространственной системой с началом в центре масс Земли. Система ПЗ-90 включает [134] (табл. 4.14):

- основные геодезические и астрономические постоянные;
- единую геоцентрическую систему координат (ЕСК), которая закреплена на поверхности Земли координатами пунктов космической геодезической сети (КГС);

– модели гравитационного поля Земли в виде коэффициентов разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям и систем точечных масс;
– каталоги высот квазигеоида над общим земным эллипсоидом;
– параметры связи ЕСК с национальной референцной системой координат 1942 г.

Таблица 4.14

Значения фундаментальных постоянных ПЗ-90

Фундаментальные параметры	Значение
Скорость света в вакууме, с	299 792 458 м/с
Геоцентрическая гравитационная постоянная (с учетом атмосферы), fM	$398600{,}44 \cdot 10^9$ м^3/с^2
Угловая скорость вращения Земли, ω	$7\,292\,115 \cdot 10^{-11}$ рад/с
Большая полуось эллипсоида, a_e	6 378 136 м
Знаменатель сжатия	298,257839303
Нормальный потенциал, U_0	62 636 861,074 м^2/с^2
Второй гармонический коэффициент, C_{20}	$-484\,164{,}953 \cdot 10^{-9}$

При выполнении спутниковых измерений для оценки условий наблюдений определяется наличие видимых спутников, допустимость геометрического фактора в процессе наблюдений и определяются координаты точек в навигационном режиме. Для оценки качества геометрического фактора пользуются следующей шкалой:

PDOP	**Оценка**
⩽4	Хорошо
5–7	Удовлетворительно
>7	Плохо

В приемном устройстве производится регистрация измеренных величин и их первичная обработка как при использовании кинематического режима (когда определяют координаты точек в реальном масштабе времени), так и в статике. Это делается с целью возможности предварительного контроля данных для возможной корректировки процесса. При этом в процессорном блоке приемника обрабатываются кодовые измерения, используемые для получения псевдодальностей, навигационные сообщения и фазовые измерения несущих колебаний для получения точных значений расстояний. Псевдодальности получают на основе определения времени прохождения кодовых сигналов расстояний между спутниками и приемником. Основным источником ошибок при измерении расстояний является нестабильность опорного кварцевого генератора, характеризуемая величиной порядка 10^{-9}. Эта погрешность в значительной степени компенсируется за счет использования более

стабильного опорного времени, передаваемого со спутника в навигационном сообщении.

Из навигационного сообщения также получают информацию о текущих эфемеридах спутников, об ионосферных поправках, об альманахе и других вспомогательных показателях. Эта информация используется для вычисления приближенных координат станции, определения расположения наблюдаемых спутников и их номеров, оценки геометрического фактора и т. д. Используя полученные значения псевдодальностей и значений эфемерид спутников на основе пространственной линейной засечки, вычисляют с навигационной точностью (единицы метров) координаты точки стояния приемника. В процессе сеанса измерений можно наблюдать информацию о местоположении станции на экране дисплея приемника.

При обработке фазовых измерений в приемнике производится уплотнение регистрируемых данных, так как длительность наблюдений может составлять несколько часов, а отсчеты в фазовых циклах производятся на одной или двух несущих частотах с интервалом в десятые доли секунды, т.е. получают значительные массивы данных, которые требуют для записи больших объемов памяти. Этот процесс называют компрессией. Чтобы его реализовать, для каждого ряда измерений длительностью 10–15 с вычисляют среднее. Длина интервала в диапазоне 1–60 с может быть выбрана оператором. Одновременно с уплотнением устраняют отсчеты со значительными уклонениями от среднего, используя фильтр Калмана, а также устраняют пропуски циклов наблюдений, которые вызваны отсутствием по каким-либо причинам сигналов от спутников.

Дальнейшая обработка результатов осуществляется, как правило, на полевой базе партии с использованием стандартного программного обеспечения фирмы-изготовителя спутниковых приемников. Качество полученных результатов наблюдений оценивается на основании:

- разрешения неоднозначности по всем линиям сети;
- определения точности по внутренней сходимости результатов обработки;
- сходимости результатов по замкнутым построениям в сети. Если сумма приращений координат по замкнутому векторному ходу соответствует паспортной точности прибора, то измерения считаются качественными;
- сравнения сходимости с результатами ранее выполненных измерений и контрольными расстояниями между известными пунктами.

4.6. Применение спутниковых геодезических систем для измерения современных движений земной коры

В настоящее время спутниковое геодезическое оборудование применяется для решения широкого круга геодезических задач, включая в

первую очередь спутниковые координатные определения при создании геодезических сетей [1, 38, 100, 101].

Как известно, государственная плановая геодезическая сеть состоит примерно из 350 тыс. геодезических пунктов, включая пункты триангуляции и полигонометрии 1 и 2 кл., которых около 164 тыс. [100, 101]. Ошибки координат пунктов увеличиваются к востоку и северу относительно исходного пункта и достигают 10—15 м.

В работе [101] предлагается не только восстанавливать и поддерживать существующую сеть, но и создать спутниковую геодезическую сеть 2 класса. Точность определения приращений координат при длительности сеанса наблюдений 1—2 ч. двухчастотными приемниками характеризуется величиной порядка $1 \cdot 10^{-6}$ от расстояния между пунктами. При этом из экономических соображений сеть второго класса целесообразно создавать на отдельные регионы страны. Современные методы уравнивания такой сети, в которой используются результаты как прежних традиционных измерений, так и полученные по спутниковым наблюдениям, позволяют не искажать спутниковые данные. В настоящее время разрабатываются основные положения о государственной геодезической сети, которые базируются на использовании спутниковых наблюдений.

Применение спутниковых приемников для привязки центров фотографирования позволило в несколько раз снизить общую стоимость работ за счет уменьшения объемов полевых работ, связанных с привязкой аэрофотоснимков [56].

Широкое применение получили спутниковые измерения в режиме RTK, которые используются для плановой и высотной съемки открытых территорий, создания локальных сетей сгущения на небольших удаленных объектах, выносе в натуру проектов. Режим кинематики обычно используется при топографической съемке.

С созданием спутникового геодезического оборудования значительно расширились возможности изучения деформаций земной поверхности на больших территориях, вызванных движением материковых плит, следить за деформациями земной поверхности, вызываемыми осадками (снегом, дождем, изменением барометрического давления и т. д.), а также изучать деформации земной поверхности, вызываемые техногенными факторами [150]. Под деформациями земной коры обычно понимают линейные деформации, которые характеризуются относительной величиной изменения расстояния S между двумя опорными точками [122]:

$$\varepsilon = \Delta_{(S - So)}/S, \qquad (4.29)$$

где So — эталонное расстояние между опорными точками. В работах [92—94] приведены оценки вертикальных деформаций земной коры под действием переменных нагрузок на регионы с характерными разме-

рами порядка тысячи км, возникающих при развитии и перемещении циклонов и антициклонов, в результате накопления снега, а также при прохождении паводков на больших реках. Дополнительная нагрузка на земную кору вызывает как вертикальные, так и горизонтальные деформации.

Среднее годовое количество осадков на территории Сибири составляет 400 мм. Согласно расчетам [93], вертикальный прогиб только из-за накопленного к весне снега в центральной части Сибири составляет 3,8 см. Вертикальные прогибы, вызываемые паводками на сибирских реках (Обь, Енисей, Амур и Лена), которые входят в первую десятку крупнейших рек мира как по длине, так и по площади водосбора, вызывают вертикальные деформации порядка 10 см. Значительные деформации земной поверхности могут быть вызваны важнейшими формами атмосферной циркуляции: циклонами и антициклонами. В зимние месяцы на большей части территории Сибири наблюдается повышенное давление, а летом — пониженное. Расчет вертикальных деформаций земной коры в районе Иркутска [94], вызванных перепадами атмосферного давления, дает оценку порядка 25 см. Таким образом, суммарная деформация на территории Сибири, вызванная погодными условиями (без учета паводков), может достигать 30 см. Такая же величина деформаций может наблюдаться и на Европейской части России.

Для экспериментальных исследований сезонных деформаций земной поверхности предлагается расположить пункты деформометрической сети в местах прогнозируемых наибольших вертикальных смещений земной коры, вызываемых динамическими нагрузками. Эту сеть следует строить по иерархической схеме с тремя уровнями:

- первый уровень – локальная сеть с длинами сторон до 100 км;
- второй уровень – региональная сеть поперек пойм крупных рек с масштабом базисов порядка 1000 км;
- третий уровень – субконтинентальная сеть с опорой на стационарные пункты.

Наблюдения точек сети должны выполняться с помощью высокоточных спутниковых приемников для локальных сетей — в периоды кратковременных нагрузок, для региональных сетей наблюдения должны иметь длительность от суток до недели. На пунктах субконтинентальной сети должны выполняться непрерывные наблюдения в продолжении всего интервала времени действия динамических нагрузок при исследовании атмосферных эффектов.

Данные об уровне подъема паводков, грунтовых вод и высоте снегового покрова можно получать от действующих гидрометеорологических постов.

Ожидаемые погрешности определения вертикальных деформаций в локальных сетях составляют 5 мм, в региональных и субконтинентальных — 20–30 мм.

В работе [94] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований периодических деформаций земной коры, вызванных влиянием погодных условий, на примере спутниковых четырехмесячных (с 15 августа по 30 ноября 1993 г.) наблюдений координат пункта Юзефослав [183] в районе Варшавы. В этой статье на графиках приведены данные суточных приращений координат. За этот же интервал времени получены ежесуточные значения атмосферного давления. В результате прямого сопоставления вариаций давления вариациям радиуса вектора пункта наблюдений, коэффициент корреляции между двумя случайными процессами оказался равным — 0,32–0,083.

Одна из наиболее значимых проблем, стоящих перед наукой — разработка методов надежного прогноза землетрясений, что, по мнению специалистов [124], неразрывно связано с изучением деформаций земной поверхности, вызываемых различными факторами. Согласно основным положениям теории глобальной тектоники плит, литосфера Земли представляет собой относительно жесткую оболочку, «плавающую» на поверхности достаточно вязкой мантии. Эта оболочка представляет собой ряд крупных литосферных блоков, размеры которых достигают нескольких тысяч километров. Эти блоки, в свою очередь, разбиты на множество более мелких блоков системами, по которым также происходят тектонические подвижки. Уже установлено, что зоны даже с незначительными тектоническими нарушениями обладают достаточной подвижностью, которая имеет как постоянную составляющую, так и динамические колебания различной природы. В настоящее время достаточно хорошо известно о движениях литосферных плит в горных районах, а также в зонах глобальных разломов. На большинстве же территории Земли литосфера представляется как среда статическая и незыблемая. Вместе с тем некоторые исследователи считают [119, 120], что даже на небольших участках земной поверхности могут иметь место деформационные процессы с различными периодами и амплитудой. Деформации земной поверхности в свою очередь могут привести к авариям таких объектов, как магистральные нефтепроводы и газопроводы, подземные коллекторы, железные дороги и т. п.

Величина деформаций земной коры зависит от ряда факторов. Согласно оценке только из-за векового уменьшения гравитационной постоянной ожидаемые деформации должны составлять 10^{-10} в год. На деформационные процессы влияет также атмосфера Земли — над Евразией масса воздуха в январе на $6 \cdot 10^{15}$ кг больше, чем в июле, что обусловлено перераспределением массы воздуха и влаги между материками и океанами, а также между Северным и Южным полушариями. Современные движения земной коры также вызываются приливными явлениями. Земной прилив проявляется в виде куполообразного горба земной поверхности высотой до 60 см, который с некоторым запаздыванием перемещается за возбуждающим небесным телом [144]. При-

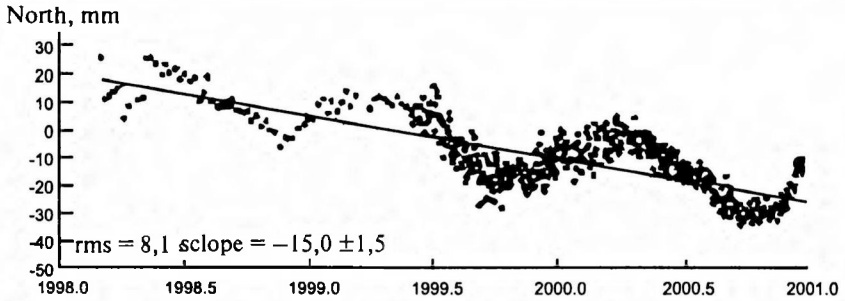


Рис. 4.23. Смещение абциссы X точки, наблюдаемой с помощью GPS [144]

ливные деформации имеют очень сложный спектр, основные гармоники которого имеют периоды 18; 1,14 лет; а также 1 мес. и 0,5 суток, что связано с движениями Луны и Солнца. Значительные погрешности в измерения вносит годовая волна. Временные смещения абсциссы X точки, определяемой с помощью GPS, позволяют прослеживать тренд наклонов земной поверхности, косвенно влияющий на изменение положения GPS станции по оси абсцисс (рис. 4.23).

Долгопериодические деформации, связанные с геологическими процессами, как правило, имеют большую величину и отражают степень тектонической активности. Они представляют как значительный теоретический, так и практический интерес при изучении смещений вдоль разломов. Эти движения могут иметь скорость порядка 10^{-5} в год и в значительной степени отличаются от места к месту. Обычно темпы новейших горизонтальных движений земной коры составляют несколько сантиметров в год, а вертикальных – от миллиметров до 1–2 см в год. Так, например, Африка последние ~80 миллионов лет сближается с Евразией со скоростью горизонтальных перемещений порядка 5 см в год.

Как известно, землетрясение – это механический процесс внезапного высвобождения заключенной в геофизической среде энергии, когда напряжения превосходят критические, причем первичным признаком подготовки землетрясения в тектонически активном регионе являются деформационные процессы, обуславливающие накопление напряжений в среде. Вследствие деформирования изменяются свойства среды, в частности, меняются скорости распространения сейсмических волн, перемещаются флюидо-газовые компоненты в литосфере, изменяются электрические и магнитные свойства пород. Все эти изменения также изучают с целью использования при прогнозе землетрясений [51, 172].

Для повышения достоверности прогнозов необходим комплексный подход при изучении эффективности различных прогностических параметров, который включал бы и деформационные признаки при разработке реальной службы прогноза. С этой целью обширные исследования с помощью лазерных дальномеров выполняют на геодинами-

ческих полигонах, которые созданы в ряде стран в зонах повышенной сейсмической активности, где происходят движения земной коры, обусловленные взаимным смещением тектонических плит. Обычно дальномерные наблюдения в зоне разлома осуществляют по нескольким направлениям и в течение значительного времени. При незначительных изменениях скорости смещения может наблюдаться высокая сейсмичность, но с малыми амплитудами. Более сильным землетрясениям предшествуют аномальные изменения скорости деформаций. Рядом экспериментов [129] установлено, что за несколько минут, а иногда и несколько суток до землетрясения происходит аномальное изменение длины линии или сети линий, если они расположены достаточно близко к эпицентру готовящегося землетрясения (первые десятки километров). Так например, связь подтверждается результатами исследований на разломе Сан-Андреас, где за 15 мин до землетрясения началось резкое увеличение длины линии протяженностью 25 км, которая пересекала разлом и измерялась геодиметром (рис. 4.24). Эти аномальные изменения вполне могут служить прогностическим признаком землетрясения. С появлением спутникового геодезического оборудования появилась возможность проводить изучение деформаций земной поверхности в сейсмоопасных районах на территориях, охватывающих десятки и сотни км, создавая высокоточные сети. Схема расположения реперов должна выбираться таким образом, чтобы обеспечить достаточный охват тектонических зон.

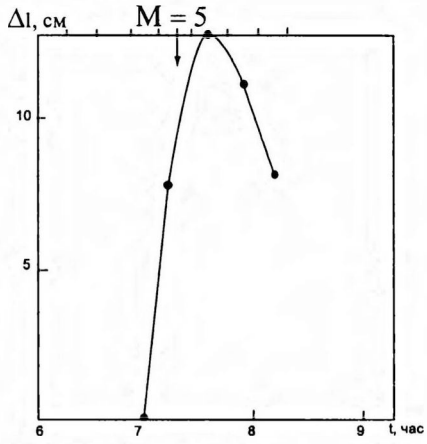


Рис. 4.24. График аномального изменения длины линии на разломе Сан-Андреас [129]

Основу таких наблюдений составляют комплексные повторные высокоточные геодезические измерения, выполняемые по специальной программе в специально созданной сети геодезических пунктов. При этом должен осуществляться мониторинг деформаций с выдачей результатов каждые 15–30 минут. Эти сети могут также использоваться во всех областях хозяйственной деятельности, включая проведение съемочных и разведочных работ, возведения и эксплуатации инженерных сооружений и т.д. Так как ожидаемые величины деформаций земной поверхности характеризуются величинами от нескольких мм до нескольких см в год, то спутниковые измерения должны обеспечивать точность, близкую к фоновым значениям. Как показывают результаты проведенных ранее исследований, скорости изменения деформаций

за 10–15 мин перед землетрясением могут достигать значений порядка $3 \cdot 10^{-8}$, а суточные скорости могут составлять $2–7 \cdot 10^{-7}$ за 13 суток до события [127]. В настоящее время точность спутниковых измерений горизонтальных компонент относительных координат пунктов сети для расстояний в первые сотни километров, полученная в постобработке с использованием прецизионных эфемерид спутников при продолжительности наблюдений на пунктах не менее 3 суток, характеризуется величиной порядка $2 \cdot 10^{-8}$. (Вертикальные компоненты определяются с ошибками в 2–5 раз большими по сравнению с горизонтальными). Для расстояний до нескольких десятков км при тех же условиях наблюдений может быть обеспечена точность на уровне $1 \cdot 10^{-7}$. Таким образом, спутниковые наблюдения отвечают требованиям точности, необходимым при исследовании деформаций земной коры.

Параллельно со спутниковыми наблюдениями необходимо проводить геофизические, гидрологические, термометрические и другие наблюдения. На основе периодических измерений деформационных параметров в сейсмоопасных регионах предполагается не только определить постсейсмические деформации в эпицентральных областях происшедшего землетрясения, но и получать оперативный прогноз и координаты будущего эпицентра на основе анализа аномального поведения деформационных характеристик, оценить магнитуду события по размеру площади, вовлеченной в деформирование, а также оценить вероятное время сейсмического события для долгосрочного и среднесрочного прогноза по различию критического и текущего значений деформаций сдвига и скорости изменения текущего значения.

Одним из успешных применений спутникового оборудования для оценки скорости движения геотектонических плит и поиска предвестника землетрясения являются наблюдения на Камчатке [43]. В районе Камчатки находится тройное сочленение Тихоокеанской, Североамериканской и Евроазиатской плит. Скорость движения плит составляет порядка 80 мм/год, что вызывает мощную сейсмичность и дает возможность оценить скорость движения плит даже по краткосрочным наблюдениям с помощью спутникового оборудования. Такие наблюдения сети из девяти станций GPS выполняются, начиная с 1996 г. В каждом пункте размещен спутниковый приемник, с помощью которого получают стандартные 24-часовые средние положения каждого пункта. Затем вычисляются относительные положения станции при условно фиксированной станции с точностью порядка 3–4 мм для горизонтальной компоненты, которая используется далее. На основании обработки результатов наблюдений на расстояниях до нескольких сот километров выявлены относительные движения между Тихоокеанской, Североамериканской и Евроазиатской плитами, что подтверждает надежность всей системы измерений и, особенно, вполне хорошую точность данных GPS, полученных в измерениях на коротких интервалах времени.

Непрерывные измерения координат в 9 точках на полуострове Камчатка выявили деформации, связанные с сильным Кроноцким землетрясением 5 декабря 1997 г. (M_w = 7,8). На основании этих измерений в конце 1997 г. было зафиксировано изменение скорости на четырех точках. Такие вариации скорости, по мнению авторов, связаны с сильным землетрясением 5 декабря 1997 г. Этот факт имеет важное значение, так как позволяет постфактум идентифицировать истинный среднесрочный деформационный предвестник сильного землетрясения.

Результаты дальнейших наблюдений показали, что постсейсмические движения в общем имеют гораздо более обыкновенный характер, т.е. соответствуют идее медленного продолжения скольжения по площадке очага «быстрого» землетрясения с сохранением направления скольжения.

Аналогичные исследования проводятся и в других сейсмоопасных регионах Земли. Так например, в Калифорнии используется около 200 приемников, а в Японии создана сеть мониторинга по всей территории с привлечением около 600 приемников [124].

Помимо фундаментальных исследований, выполняемых с целью изучения сейсмической активности того или иного региона, важное значение имеют исследования, связанные с изучением влияния техногенных факторов на деформации земной поверхности, особенно в районах интенсивной разработки нефти и газа [88, 89, 91, 113, 162, 166].

Как известно, вследствие разработки газовых и нефтяных месторождений происходят значительные деформации земной поверхности, что приводит не только к срезанию скважин, развитию разломов и опусканию поверхности, но в зонах повышенной сейсмической активности – к землетрясениям. Эти деформации обусловлены потерей устойчивости системы «месторождение углеводородов — дискретная, геодинамически активная среда» вследствие удаления подземных углеводородных залежей и газа. При этом усиливаются просадки земной поверхности на территории месторождения, происходят межпластовые сдвиги и наблюдается наведенная техногенными факторами сейсмическая активность [89, 95].

Впервые катастрофические землетрясения, вызванные техногенными факторами, привлекли внимание в Газли (СССР), где с 1976 по 1984 гг. произошло три землетрясения силой до 10 балов по шкале Рихтера. Обычно временной интервал даже между двумя сейсмическими ударами такой силы составляет не менее столетия. Поэтому землетрясение на месторождениях нефти и газа в Газли подтверждает, что оно имеет не только тектонический характер. Практически все крупнейшие месторождения нефти и газа бывшего Советского Союза представляют потенциальную угрозу в сейсмическом плане. Наглядным подтверждением этому утверждению является Ромашкинское месторождение (запасы – около 600 млн тонн нефти) в Татарстане, где с 1987 г. зафик-

сировано более 700 землетрясений, сила которых достигала 4—5 баллов. На месторождениях за рубежом из-за интенсивной эксплуатации нефтегазовых месторождений тоже наблюдаются подобные аварии. В отличие от легко регистрируемых просадок и горизонтальных смещений массивов горных пород, поверхностное разломообразование развивается, как правило, внезапно, и поэтому более разрушительно для объектов хозяйственной деятельности. Например, широко известен факт значительных аномальных деформаций (опускание на 8,8 метра) на нефтяном месторождении Willmington (США), что привели к повреждению обсадных колонн в 292 скважинах, из которых более 100 были ликвидированы Buena Vista (США) [18].

Значительные деформации поверхности, вызванные техногенными факторами, наблюдаются и на других месторождениях, например, на нефтяном месторождении Lagunilas (Венесуэла) максимальное накопленное опускание – 4,1 метра к 1976 г.

В Тюменском регионе также наблюдаются интенсивные современные вертикальные движения земной поверхности тектонического и техногенного характера (скорости вертикальных движений достигают 20 мм/год), что является одной из причин разрыва колонн эксплуатационных скважин, повреждения наземных и подземных коммуникаций. Другим примером является Самотлорское месторождение, где из-за смещения пластов на одной и той же глубине (500—600 метров) были срезаны сотни скважин.

Если до начала разработки провести геодинамический мониторинг, то можно снизить социально-экономический и экологический риски. Такие работы, например, проводились институтом горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург [119, 120] для выяснения причин и механизма аварийных разрушений канализационных коллекторов города Сургута, расположенных в местах пересечения ими локальных тектонических разломов. Геофизические исследования подтвердили предположения о том, что причиной аварийных ситуаций являются подвижки по тектоническим нарушениям. Для оценки величин деформационного процесса был создан геодинамический полигон, на котором были заложены грунтовые реперы, координаты которых определялись с помощью спутниковых приемников. Сеть из 15 точек состояла из забивных металлических реперов, применение которых обеспечивало возможность повторения эксперимента. Для контроля часть из наблюдаемой системы точек захватывала также нетронутый массив горных пород за пределами зоны влияния тектонического нарушения. Таким образом, сеть закрепленных на местности точек, охватывала зону разлома, которая должна была обладать наибольшей активностью. Наблюдения точек выполнялись в статике.

При камеральной обработке результатов повторных спутниковых измерений оценивалась точность определения длин линий и превыше-

ний между реперами не только по показателям качества получения векторов, но и путем расчета невязок замыкания замкнутых контуров. При этом ошибки замыкания не превышали величин 1 мм в горизонтальной плоскости и 2 мм в вертикальной плоскости. При этом оценивались деформационные процессы, проистекающие в верхней части земной коры. Выявлено, что за период наблюдений горизонтальные деформации составили 35–57 мм, а вертикальные 86–108 мм. Несколько раньше этой же организацией проводились аналогичные работы на участке магистрального 9-ниточного газопровода в районе г. Краснотурьинска. Как известно, на 40-километровом участке магистрального 9-ниточного газопровода в районе г. Краснотурьинска за период с 1990 по 1995 г. произошло 45 аварий, что составило около 90 % всех аварий РАО «Газпром» за этот период. На данном участке геофизическими методами был выявлен тектонический разлом, под острым углом пересекающий трассу газопровода, а также несколько секущих разломов более низкого ранга. Здесь также был создан геодинамический полигон для непрерывного мониторинга деформаций земной поверхности. Данные исследований подтвердили активность разлома.

В настоящее время ведутся обширные геодинамические исследования на Астраханском газоконденсатном месторождении [88, 89, 90, 91, 113], где разрабатывается гигантское газоконденсатное месторождение. На первом этапе работы в течение 2002–2005 гг. выполняется маркшейдерско-геодезический, сейсмологический и микрогравиметрический мониторинг наряду с другими исследованиями геологического и геохимического характера. Создан полигон из 36 точек, на которых начали выполняться прецизионные спутниковые наблюдения. В ближайшие годы (на начальном этапе эксплуатации месторождения) ожидаются подвижки, характерная величина которых составит 200 мм [90].

В настоящее время Правительством России утвержден документ «Концепции геодинамической безопасности освоения углеводородного потенциала недр России», регламентирующий выполнять геодинамический мониторинг для обеспечения безопасной эксплуатации недр.

ГЛАВА 5
ПРИБОРЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

5.1. Приборы для геодезического контроля вертикальности сооружений

При строительстве зданий малой этажности для передачи разбивочных осей на верхние монтажные горизонты обычно используются механические, оптические либо лазерные приборы вертикального проектирования. Монолитные сооружения такого типа, как водонапорные башни, опоры мостов, элеваторы, силосные башни, градирни, дымовые трубы, башенные копры, ядра жесткости промышленных и гражданских зданий возводят в скользящей опалубке. В настоящее время в скользящей опалубке возводят жилые и гражданские здания повышенной этажности. Выполнение геодезических работ в процессе строительства надземной части монолитных зданий и сооружений имеет ряд особенностей, обусловленных тем, что возведение стен методом скользящей опалубки является поточно-скоростным процессом. Так как сама опалубка при движении имеет несколько степеней свободы, то допущенные отклонения от проектных значений трудно исправимы. Поэтому при подъеме скользящей опалубки требуется высокая точность проведения геодезического контроля. Механический метод контроля подъема опалубки не нашел широкого применения в строительстве высотных зданий и сооружений из-за ряда недостатков. Основной недостаток этого метода состоит в том, что на отвесы действует ветровая нагрузка, которая может значительно исказить результаты измерений. При благоприятных внешних условиях точность такого способа на высоте 20 м составляет 10 мм.

Теодолитные измерения не удовлетворяют требованиям точности при возведении высотных зданий и сооружений, так как метод передачи осей наклонным лучом обладает рядом недостатков, и суммарная ошибка в положении оси на 16—20 этажах может достигать 10 мм и более. Кроме того, решить поставленную задачу существующими геодезическими методами и средствами, особенно методом наклонного проецирования с помощью теодолита, можно лишь при значительных затратах труда и времени.

Широкое применение при геодезическом контроле подъема опалубки получил оптический метод с применением зенит- и надир-приборов, а также лазерных приборов вертикального проектирования. Для работы в нижней части строящегося сооружения разбивают вспомогательную опорную плановую сеть, состоящую из ряда базовых точек, и определяют их взаимное плановое положение обычными геодезическими методами.

Чтобы передать плановые координаты с нижнего монтажного горизонта на верхние вертикальным проектированием в перекрытиях здания оставляют небольшие сквозные отверстия (рис. 5.1).

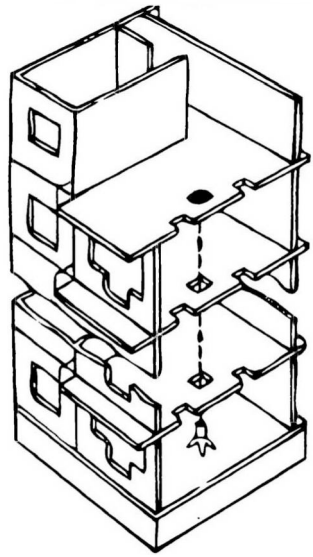


Рис. 5.1. Передача осей на верхние монтажные горизонты

Для определения планового положения проекции визирной оси на горизонтальную плоскость, т. е. для передачи координат x и y базовой точки на соответствующие монтажные горизонты, в этих отверстиях укрепляют прозрачные палетки, на которых нанесена сетка прямоугольных координат. Перед работой прибор вертикального проектирования центрируется на базовой точке. Визируя, оператор находит положение точки визирования на палетке, установленной на соответствующем монтажном горизонте. Для уменьшения влияния ошибок, вызванных несовпадением визирной оси и оси вращения прибора, проекцию визирной оси отмечают при четырех положениях вращающейся части центрира, отличающихся на 90°, а затем находят среднее из четырех положений визирной оси. Эта точка является опорной для данного монтажного горизонта, и относительно нее разбивают монтажные оси.

В некоторых случаях передают плановые координаты с нижнего монтажного горизонта на верхний с внешней стороны здания, используя выносные марки и экраны, которые крепятся к стенам здания.

На рис. 5.2 показан внешний вид оптического центрира FG-L 100. Этот прибор является современным аналогом широко известного PZL (рис. 5.3), который выпускался в прошлом фирмой Carl Zeiss Jena. FG-L 100 передает плановое положение точки стояния прибора в зенит. Технические характеристики прибора FG-L 100 приведены в табл. 5.1.

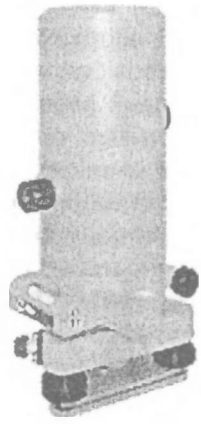


Рис. 5.2. Внешний вид прибора FG-L 100 (Zeiss)

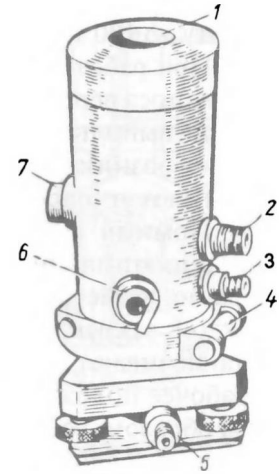


Рис. 5.3. Внешний вид прибора PZL

Таблица 5.1

Технические характеристики прибора FG-L 100

Точность	±1 мм / 100 м
Диапазон работы компенсатора	±10′
Точность установки компенсатора	±0,15°
Увеличение зрительной трубы, крат	31,5
Угол зрения, °	1,3
Минимальное расстояние визирования, м	2,2
Точность центрирования на высоту 1,5 м, мм	0,5
Предел фокусирования оптического центрира, м	0,5
Высота инструмента, мм	295
Размеры (в футляре), мм	385x225x170
Масса прибора, кг футляра	3,7 3,3

Основное условие, которому должен удовлетворять оптический центрир – ось вращения прибора и вертикальная часть визирного луча должны совпадать.

Поверку выполняют проектированием линии визирования на высоко расположенную горизонтальную плоскость при четырех, отличающихся на 90°, положениях вращающейся части центрира. Исправление положения линии визирования производится перемещением сетки нитей. В хорошо проверенном центрире ошибка выноса вертикали на высоту до 100 м не превышает 1 мм.

При работе в высотных сооружениях основным источником ошибок выноса вертикали является боковая рефракция, которая имеет место при выполнении сварочных работ вблизи траектории луча. В этом случае возникают значительные температурные градиенты, которые вызывают угловое отклонение визирного луча на минуту и более.

Помимо оптических приборов вертикального проектирования, применяют лазерные центриры, у которых вертикальная линия визирования задается лазерным пучком. В первом случае (рис. 3.11, а) над каждой закрепленной разбивочной точкой на исходном горизонте устанавливают лазерный зенит – прибор, который после приведения в рабочее положение посылает вертикально вверх лазерный пучок. Таким образом, все точки плановой основы передаются на монтажные горизонты. В данном случае лазерный пучок выполняет роль отвеса. Этот способ по существу не отличается от производства работ традиционными оптическими приборами вертикального проецирования, но лазер-

ные приборы более удобны в работе, так как задают лазерным пучком вещественную линию, положение которой при пересечении с заданным горизонтом довольно легко находится с помощью экрана, на который проецируется яркое лазерное пятно диаметром в несколько мм. Кроме того, при работе в затемненных и запыленных помещениях лазерный пучок хорошо виден в воздухе, что удобно для контроля вертикальности стен сооружения.

Один из первых лазерных центриров – ЛЗП (рис. 5.4) был разработан в СССР в начале 1970-х годов [111]. Этот прибор использовался для дистанционного контроля за горизонтальными сдвигами арочной плотины Чиркейской ГЭС (см. 5.3).

ЛЗП создан на базе гелиево-неонового лазера, установленного вертикально в корпусе прибора. Пучок из лазера проходит систему из призм и попадает в телескопическую систему, имеющую увеличение 25х. Затем коллимированный лазерный пучок проходит жидкостный компенсатор, задающий пучку отвесное направление. В ЛЗП жидкостный компенсатор устанавливают так, чтобы лазерный пучок, входящий в него сверху, был перпендикулярен плоскопараллельным пластинам

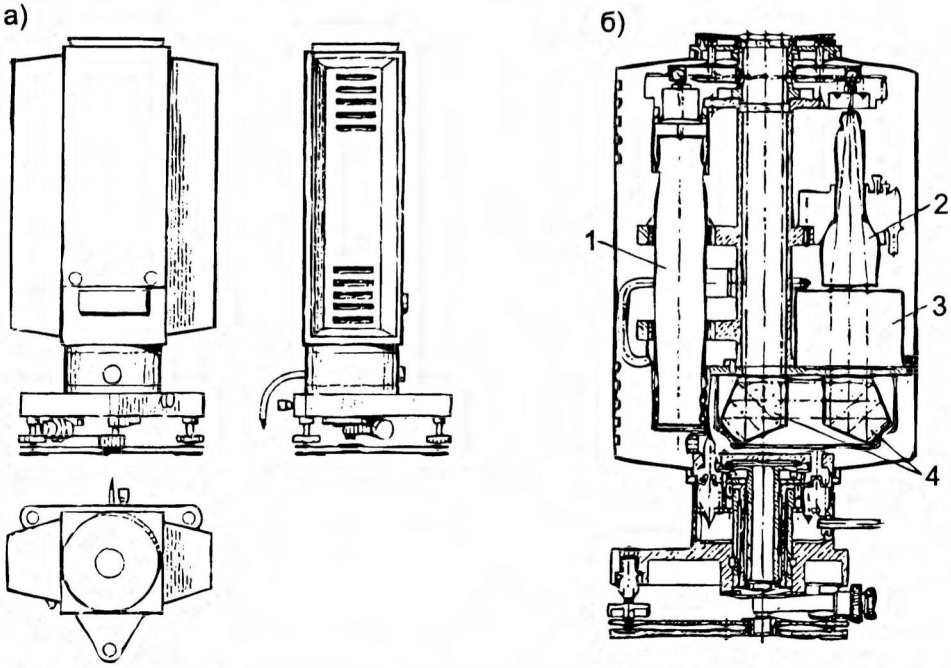


Рис. 5.4. Прибор вертикального проектирования ЛЗП с жидкостным компенсатором: а) внешний вид; б) конструкция ЛЗП

1 – лазер; 2 – телескопическая система; 3 – жидкостный компенсатор; 4 – пентапризмы

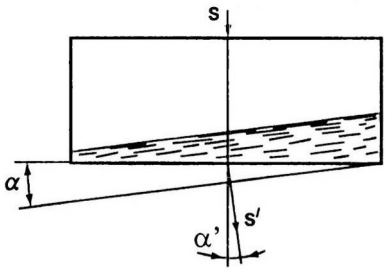


Рис. 5.5. Принцип действия жидкостного компенсатора

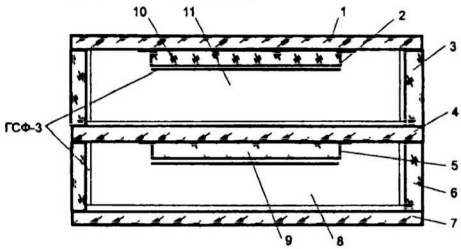


Рис. 5.6. Устройство жидкостного компенсатора

1, 4, 7 – плоскопараллельные пластины; 2, 5 – диафрагмы; 3, 6 – кольца; 8, 11 – смесь жидкостей дибутилфтолата и демитилфтолата; 8, 10 – плоскопараллельные пластины

(рис. 5.4, б). Для изменения направления лазерного пучка на противоположное служат две пентапризмы, установленные после жидкостного компенсатора по ходу лазерного пучка. Жидкостный компенсатор представляет собой сосуд, в который налита жидкость, имеющая коэффициент преломления n. Принцип действия компенсатора (рис. 5.5) основан на свойстве жидкостей принимать в состоянии покоя горизонтальное положение.

При наклоне прибора на угол α наклоняется и компенсатор, в результате чего жидкость образует оптический клин с углом преломления α. При прохождении через клин пучок лазерного излучения отклоняется к основанию клина на угол $\alpha' = \alpha(n - 1)$.

Полная компенсация угла наклона прибора наблюдается в том случае, когда $\alpha' = \alpha$, т. е. при соблюдении условия $n = 2$.

Во время работы ЛЗП устанавливают в рабочее положение по круглому уровню, а для центрирования над точкой служит оптический центрир.

Сравнение данных, полученных при работе с ЛЗП и зенит-прибором PZL, показало, что при строительстве высотных зданий максимальные значения отклонений составляют 2–3 мм.

В ЛЗП жидкостный компенсатор устанавливают так, чтобы лазерный пучок, входящий в него сверху, был перпендикулярен плоскопараллельным пластинам (рис. 5.6). Во время работы ЛЗП устанавливают в рабочее положение по круглому уровню, а для центрирования над точкой служит оптический центрир.

Современные лазерные приборы вертикального проектирования более компактны и менее энергоемки, так как источником излучения у них является полупро-



Рис. 5.7. Прибор вертикального проектирования (лазерный центрир) LV1 фирмы Sokkia (Япония)

водниковый лазер, генерирующий луч в красной области спектра. На рис. 5.7 представлен один из таких приборов – LV1 производства фирмы Sokkia (Япония). Линия визирования в этом приборе задается пучком лазерного излучения на длине волны 0,635 мкм (красный цвет).

Вертикальность лазерного пучка достигается с помощью оптического компенсатора, имеющего диапазон работы порядка 10′. Технические характеристики этого прибора приведены в табл. 5.2.

Лазерные приборы вертикального проектирования пользуются достаточно большим спросом для контроля вертикальной опалубки, особенно там, где идет строительство зданий повышенной этажности из монолитного бетона. Как известно, возведение стен методом скользящей опалубки является поточно-скоростным процессом, и сама опалубка при движении имеет несколько степеней свободы.

Таблица 5.2

Технические характеристики прибора вертикального проектирования (лазерного центрира) LV1 фирмы Sokkia (Япония)

Точность	Зенит ±5″ (2,5 мм / 100 м) / надир ±1′ (1,5 мм / 5 м)
Диапазон измерений	зенит – до 100 м / надир – до 5 м
Компенсатор	маятниковый, с воздушным и магнитным демпфером
Диапазон работы компенсатора	±10′
Класс лазера	класс 2 (IEC 825-I 1993), класс II (CFR21)
Длина волны лазера	635
Диаметр лазерного пятна на максимальных расстояниях	зенит – 7 мм / 100 м, надир – 2 мм / 5 м
Размеры, мм	194x150x248
Масса, кг	2,5
Диапазон рабочих температур, °С	от –10 до +50

При расчете точности геодезического контроля вертикальности подъема опалубки необходимо принять во внимание существенное влияние деформации опалубки в начальный период ее подъема. Поэтому необходимо поставить условие, чтобы деформация опалубки на высоте 10 м не превышала величины, равной половине допуска на не вертикальность, т. е. 5 мм, а на высоте 50 м достигала не более10 мм.

Лазерные приборы вертикального проектирования используются также при монтаже сборных элементов зданий и сооружений, при ко-

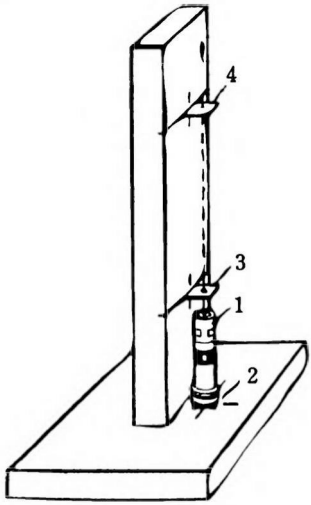


Рис. 5.8. Схема установки колонн в проектное положение с помощью лазерного прибора вертикального проектирования

1 – лазерный прибор; 2 – разбивочные риски; 3 – нижняя марка-диафрагма; 4 – верхняя марка

тором выполняется операционный контроль их планового, высотного и вертикального положения относительно разбивочных осей и горизонтов. Например, в каркасных зданиях основными конструктивными элементами, требующими монтажа, являются колонны (рис. 5.8). При подготовке колонны к монтажу в верхней ее части закрепляют контрольную марку с диафрагмой, а в нижней – марку с координатной сеткой. Марки закрепляются по ориентирным рискам, нанесенным на гранях колонны. При монтаже металлических колонн, а также железобетонных колонн с металлическими закладными деталями можно использовать марки с магнитным основанием.

Лазерный прибор вертикального проектирования устанавливается в рабочее положение на фундаменте и центрируется над ранее вынесенной в натуру точкой, расположенной на линии, параллельной разбивочной оси, примерно в 10–15 см от проектного положения соответствующей грани колонны. Затем, перемещая колонну, совмещают центры марок с центром проекции лазерного пучка.

Для контроля поверхности при выполнении отделочных работ, при установке панелей, монтаже решеток для подвесных потолков, для контроля положения фундамента, задания «нулевого» уровня для полов, выравнивания стен и т. п. обычно применяют построитель лазерных плоскостей, задающий видимые опорные плоскости на расстоянии до 30–50 м.



Рис. 5.9. Лазерный построитель плоскости Trimble SP-1422

Такие лазерные приборы обычно служат для создания двух или трех видимых ортогональных лазерных плоскостей, относительно которых выполняют соответствующие измерения.

На рис. 5.9 показан SP-1422 – наиболее простой из серии лазерных построителей плоскости, выпускаемых фирмой Trimble для строительства.

В основном приборы этой серии применяются на строительных площадках внутри помещений. Они имеют возможность задания горизонтальной и вертикальной плоскости (табл. 5.3) и работы с сенсором, что позволяет увеличить радиус действия.

Эти приборы могут задавать зону сканирования, т.е. создать опорную лазерную плоскость только в определенном секторе, тем самым увеличивая яркость и, соответственно, видимость опорной лазерной плоскости.

Таблица 5.3

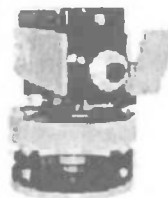
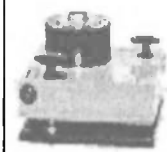
Технические характеристики лазерных приборов для строительных работ, выпускаемых фирмой Trimble (США)

Марка прибора	Trimble-SP 1422	Trimble-SP 1452	Trimble-SP 1452 XL	Nedo Benjamin
Длина волны излучения, нм	635 (красный)			
Точность задания горизонтали/ вертикали	±8 мм на 30 м	±6,4 мм на 30 м	±6,4 мм на 30 м	±0,3 мм/м
Диапазон работы компенсатора	–	±5°	±5°	–
Дальность действия, м	100	100	150	100
Рабочая температура	от –5 °С до +50 °С	от –5 °С до +50 °С	от –20 °С до +50 °С	–
Источник питания	2 батареи по 1,5 В	NiCd аккумулятор	NiCd аккумулятор	NiCd аккумулятор
Время работы без замены батарей, час.	40	10	10	15
Вес, кг	1,2	6,3	2,5	

Аналогичные приборы (табл. 5.4) выпускает фирма «Лимед» (г. Новосибирск). Дальность действия приборов в горизонтальной плоскости составляет 20 м, а вертикальной – 10 м, что является в большинстве случаев достаточным при выполнении работ внутри зданий. Эти приборы крепятся к элементам конструкций с помощью струбцины и приводятся в рабочее положение с помощью цилиндрических уровней. Горизонтальная плоскость задается развернутым пучком лазерного излучения. Для задания вертикальной плоскости (направления) используется пентапризма.

Таблица 5.4

Технические характеристики лазерных приборов, выпускаемых фирмой «Лимед», г. Новосибирск

Внешний вид приборов, выпускаемых фирмой «Лимед»				
Название прибора	Лимка-Горизонт 1Л	Лимка-Горизонт 1Л	Лимка-Зенит	Лимка-Мини
Длина волны излучения	Видимый, 635 нм	Видимый, 635 нм	Видимый, 650 нм	Видимый, 650 нм
Приведение к горизонту	Цилиндрический уровень	Маятниковый уровень	Цилиндрический уровень	Цилиндрический уровень
Диапазон работы компенсатора	–	+/–30′	–	–
Точность построения	+/–60″ или 3 мм на 10 м	+/–60″ или 3 мм на 10 м	+/–60″ или 3 мм на 10 м	+/–60″ или 3 мм на 10 м
Радиус действия прибора				
в горизонтальной плоскости	50 м	50 м	50 м	50 м
в вертикальной плоскости	10 м	10 м	10 м	10 м
Рабочая температура	–10 °С – +45 °С	–10 °С – +45 °С	–10 °С – +45 °С	–10 °С – +45 °С
Питание				
– щелочные батареи	2х типа АА 10 ч.	2х типа АА 10 ч.	2х типа АА 10 ч.	2х типа АА 10 ч.
– аккумулятор	2х типа АА 8 ч.	2х типа АА 8 ч.	2х типа АА 8 ч.	2х типа АА 8 ч.
Масса	1,0 кг	1,2 кг	1,0 кг	1,4 кг
Гарантия	1 год	1 год	1 год	1 год

Производительность работ при замене существующих оптических зенит приборов, теодолитов и нивелиров лазерными приборами, по данным литературных источников, увеличивается до 40 % и более. Как показывает опыт эксплуатации, стоимость приборов окупается за счет уменьшения объемов работ, сокращения продолжительности строительства и улучшения его качества. Так, например, при нивелировании рабочего пола опалубки и вынесении проектных отметок под закладные детали потребовалось установить 400 высотных маяков на каждый этаж. Для того чтобы вынести в натуру один высотный маяк, бригаде из двух человек требовалось затратить в среднем 5 мин., т. е. 10 чел./мин., или 0,167 чел./час. Применение лазерного прибора позволило вести нивелирные работы одному рабочему, исключив операцию по устройству высотных маяков.

При строительстве монолитного здания в 12 этажей снижение затрат труда составило: (0,167 чел./час) х (12 этажей) х (400 маяков) = 801,6 чел./час.

Стоимость приборов быстро окупается, если в течение года они регулярно эксплуатируются при выполнении таких видов работ, как задание уклонов в процессе прокладки самотечных водостоков, при монтаже подвесных потолков или при контроле устройства бетонных полов, выравнивании стен.

5.2. Применение лазерных приборов при разбивочных работах, планово-высотном контроле и задании направления

При выполнении целого ряда инженерно-геодезических работ зачастую наиболее удобным является использование не традиционных оптических нивелиров и теодолитов, а лазерных приборов, задающих опорную линию или плоскость. К таким видам работ можно отнести детальную разбивку осей, вынесение отметок при возведении сооружений, геодезический контроль по высоте земляных, асфальтовых или бетонных площадок и полов, междуэтажных перекрытий, навесных потолков и витражей, а также контроль направлений при прокладке траншей, туннелей, насыпей, трубопроводов, коллекторов. Эти приборы также используются при установке в проектное положение несущих конструкций (свай, колонн, стеновых панелей и т. д.). Лазерные геодезические приборы применяют как с визуальной, так и фотоэлектрической индикацией лазерного пучка. Приборы с визуальной индикацией целесообразно использовать в условиях плохой освещенности, когда необходимо при одной установке прибора выполнить большой объем работы в тех случаях, если использование обычных геодезических инструментов затруднено, например, при работах над водной поверхностью, в помещениях и в узких траншеях и т.п. Как показывает опыт использования этих приборов, повышается не только производитель-

ность, но и качество монтажных и инженерно-геодезических работ, а также снижается количество обслуживающего персонала.

Достоинство лазерных приборов — возможность задавать с их помощью вещественную линию, соответствующую визирной оси обычных геодезических инструментов. Недостатки — необходимость в источниках питания, а также из-за высокой плотности световой энергии в лазерном пучке при работе с ними следует соблюдать дополнительные меры предосторожности (см. 1.8).

Как правило, конструктивно лазер устанавливают в геодезическом приборе так, чтобы пучок излучения, выходящий из лазера, направлялся с помощью оптических элементов параллельно визирной оси зрительной трубы, служащей для наведения пучка. Перед выходным отверстием лазера для уменьшения угловой расходимости пучка лазерного излучения и его фокусировки устанавливают оптическую систему.

По методу формирования лазерного пучка и конструктивным признакам лазерные приборы можно разделить на несколько групп: приборы, задающие световую линию; световую плоскость в ограниченном секторе; световую плоскость в пределах окружности на основании сканирования и универсальные, т. е. задающие одновременно световую плоскость либо несколько световых плоскостей и линий. Кроме того, выпускаются специализированные лазерные приборы, предназначенные для прокладки трубопроводов, аналогов которым среди традиционных приборов нет. К таким приборам можно отнести, например, лазерный прибор Dialgrade 1280/1285 фирмы Trimble-Spectra Precision (США).

В последние годы выпускают в основном лазерные нивелиры и теодолиты, которые задают световую плоскость и линию. Большинство из них является самоустанавливающимися, т.е. снабжены оптическим компенсатором, который автоматически обеспечивает заданный угол наклона световой линии или плоскости. Нивелиры, не имеющие компенсатора, снабжаются цилиндрическим уровнем. Некоторые из них снабжены оптическими элементами в виде цилиндрических линз. Пучок, проходя через такой объектив, трансформируется и приобретает веерообразную форму.

В свою очередь лазерные нивелиры можно условно разделить на приборы для выполнения внутренних работ и приборы для выполнения наружных работ, они отличаются функциональными возможностями и мощностью пучка лазерного излучения.

В нивелирах, предназначенных для внутренних работ, предусмотрена возможность задания горизонтальной и вертикальной плоскости. Для работ по вертикальному проецированию и разбивке перпендикуляров в некоторых моделях установлена призма, делящая луч на два перпендикулярных направления. Чтобы задать световую плоскость в пределах 360°, обычно сканируют пучком лазерного излучения с по-

мощью оптико-механических устройств, например электродвигателя, на выходном конце вала которого установлен отражательный элемент (см. 2.9).

Во время работы лазерный прибор устанавливают на исходной точке и световому пучку задают нужное направление в пространстве. В требуемых точках контролируемого сооружения (местности) по ходу лазерного пучка устанавливают рейку или экран, по которым отсчитывают положение лазерного пучка.

Экраны выполняют в виде сетки квадратов со сторонами, параллельными осям X и У, ориентированными соответственно по вертикали и горизонтали. Иногда применяют подвижные экраны с нанесенными на них линиями в виде концентрических окружностей.

Отсчеты по световому пятну на экране или рейке позволяют определять положение снимаемой точки относительно пучка. Так как края светового пятна обычно размыты и его границы во многом зависят от внешних условий освещенности, то обычно при визуальной индикации отсчет производится по «центру тяжести» лазерного пучка, т. е. максимуму интенсивности (рис. 5.10).

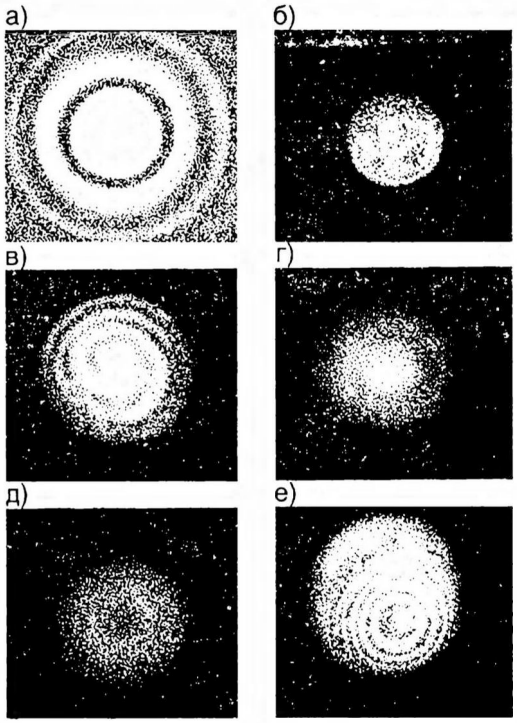


Рис. 5.10. Дифракционные картины, создаваемые лазерным прибором на выходе из коллиматора

а – идеальная, в центре дифракционной картины наблюдается кружок Эри радиусом $r = 1{,}22\lambda z/D$ (z – расстояние от выходного объектива диаметром D до экрана)/D. В кружке Эри – 83% всей энергии пучка; б, в, г – дифракционные картины, создаваемые на экране пучком одномодового лазера, снабженного телескопической системой, на расстоянии 2; 50; 700 м; д – получаемая на экране при дефокусировке телескопа (в центре основного максимума наблюдается падение освещенности); е – создаваемые на экране пучком одномодового лазера, снабженного телескопической системой, на расстоянии 100 м. Ось пучка смещена относительно оптической оси телескопа

Также и при использовании фотоприемных устройств за точку отсчета обычно принимают «центр тяжести» светового пятна.

«Центр тяжести» светового пятна в большинстве случаев совпадает с центром кружка Эри дифракционной картины, создаваемой оптической системой прибора. Идеальная дифракционная картина показана на рис. 5.10, а. В центре дифракционной картины наблюдается кружок Эри радиусом $r = 1{,}22\lambda z/D$ (z – расстояние от выходного объектива диаметром D до экрана). В кружке Эри сосредоточено 83 % всей энергии пучка. На рис. 5.10, б, в, г представлены дифракционные картины, создаваемые лазерным прибором на расстояниях 2, 50 и 700 м. В световом пятне наблюдается перераспределение энергии, связанное с воздействием условий прохождения пучка лазерного излучения на трассе, а также неравномерностью распределения энергии в самом пучке. Так как одномодовый лазер имеет гауссово распределение энергии в пучке, то в данном случае наблюдается суперпозиция гауссового и бесселева распределения энергии в пучке. Однако «центр тяжести» пучка и в этом случае совпадает с центром кружка Эри, но часть энергии из него перераспределяется в кольца. Визуальный отсчет можно производить и по другой какой-либо точке лазерного пучка, например по минимуму освещенности в центре светового пятна, который может быть создан при дефокусировке телескопической системы (рис. 5.10, д). В том случае, если ось лазерного пучка не совпадает с оптической осью коллиматора (телескопа), световое пятно наблюдается дефомированным (рис. 5.10, е). Если влияние турбулентности атмосферы незначительно, то и в этом случае в световом пятне кружок Эри достаточно четко различим.

При прохождении лазерного пучка в атмосфере вследствие пульсации показателя преломления воздуха происходит перераспределение интенсивности в поперечном сечении пучка («кипение»), колебания пучка, а также хаотические изменения поперечного сечения («дыхание») (см. гл. 8). Все эти эффекты оказывают влияние на картину распределения энергии в пучке лазерного излучения и затрудняют нахождение «центра тяжести пятна».

Эмпирическая зависимость точности отсчета по «центру тяжести» светового пучка на расстояниях до 1000 м выражается формулой [111]:

$$m_0 = 0{,}23\,(r + A) + 1{,}5 \text{ мм},$$

где r – радиус светового пятна (кружка Эри), $r = 1{,}22\lambda z/D$ (здесь λ – длина волны лазерного излучения; z – длина трассы; D – диаметр передающего объектива), мм; A – средняя квадратическая амплитуда колебаний светового пятна, мм).

Так как в большинстве случаев величина амплитуды колебаний лазерного пучка неизвестна, то для оценки точности отсчета на экране, имеющем координатную сетку в виде квадратов со стороной 1 см, погрешность отсчета

$$m_0 = 0{,}5 \cdot 10^{-5} L, \qquad (5.1)$$

где L – расстояние между экраном и лазерным прибором, мм.

Числовой коэффициент в (5.1) меняется в зависимости от увеличения телескопической системы, используемой для коллимирования светового пучка. Коэффициент 0,5 соответствует увеличению телескопической системы, равному 25х.

Увеличение точности визуального отсчета достигается размещением зонных пластин в световом пучке, выходящем из телескопической системы. Зонные пластины могут быть выполнены из чередующихся прозрачных и непрозрачных концентрических колец, нанесенных на прозрачное основание. При установке такой зонной пластины на выходе из телескопа световой пучок вследствие дифракции преобразуется, и на экране можно наблюдать световое пятно, состоящее из чередующихся светлых и темных концентрических колец (рис. 5.11), позволяющих с высокой точностью отыскать ось светового пучка. Для отсчета по экрану, на который проектируется такое световое пятно, служит специальное приспособление, состоящее из окуляра с сеткой нитей. Во время отсчета центр сетки нитей при помощи микрометренных винтов совмещается с центром дифракционной картины. Винты обеспечивают вертикальное и горизонтальное перемещение с точностью до 0,01 мм. Точность отсчета по дифракционной картине в значительной степени зависит от условий прохождения лазерного пучка в атмосфере, так как из-за влияния турбулентности дифракционная картина становится нечеткой и хаотически колеблется.

Для формирования пучка с заданными параметрами могут быть использованы зонные пластины и другого типа, например такие, на которых прозрачные и непрозрачные зоны нанесены в виде полос [156].

В некоторых случаях применяется способ «вхождения в луч», заключающийся в том, что отсчеты берут с помощью линейки по краям лазерного пучка, направленного в глаз наблюдателя. Однако этот способ целесообразно не использовать, так как прямое попадание в глаз пучка достаточной мощности может привести к ухудшению зрения. Кроме того,

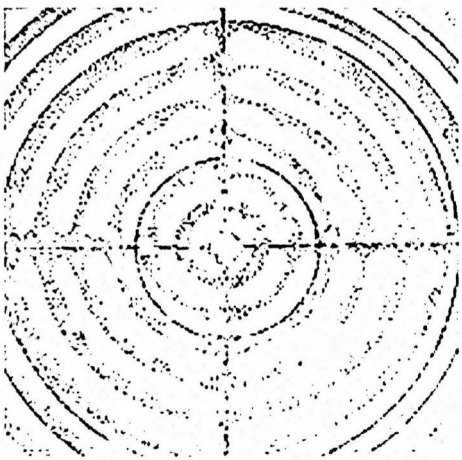


Рис. 5.11. Дифракционная картина, создаваемая на экране зонной пластиной, установленной на выходе из лазерного прибора.
Для повышения точности отсчитывания на экране нанесены концентрические кольца

лазерное излучение обладает свойством вызывать комулятивный эффект, следовательно, допустимая доза облучения зависит от времени и спектрального состава излучения (см. 1.7).

Одним из первых лазерных геодезических приборов, который был разработан в СССР, можно назвать лазерный прибор ЛВ-2. В 1965 г. этот прибор был использован в Москве для контроля положения горнопроходческого щита во время строительства туннеля для р. Неглинной.

Известные методы геодезического контроля направления проходки тоннеля имеют ряд недостатков, так как контроль проходки осуществляется в отдельных точках и требуется остановка работ во время измерений. С появлением механической проходческой машины и проходческого комбайна скорости проходки сильно возросли, поэтому обычные методы маркшейдерского контроля проходки тоннелей недостаточны. Это объясняется большой трудоемкостью обычных методов контроля и малой производительностью. Направление проходки контролируют, по крайней мере, через каждые 30 м, т. е. при скорости 3 м/час через 10 ч. работы.

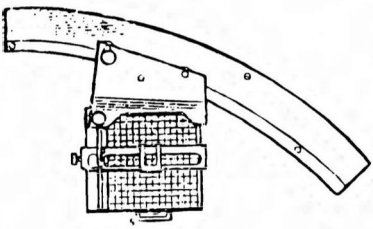


Рис. 5.12. Экран для визуального контроля

При строительстве туннеля ЛВ-2 устанавливался на неподвижном основании, и лазерному пучку задавалось проектное направление. Для визуальной индикации положения горнопроходческого щита использовались два экрана (рис. 5.12), укрепленные на передние и задние опорные кольца щита с помощью дуг. Установка экранов в рабочее положение осуществляется по цилиндрическим уровням. При установке экраны перемещаются по дугам до тех пор, пока пузырек уровня не устанавливается в нуль-пункте. Задний экран был полупрозрачным, поэтому после него часть лазерного пучка попадала на передний экран. На каждом экране нанесена сетка квадратов со сторонами 10 мм.

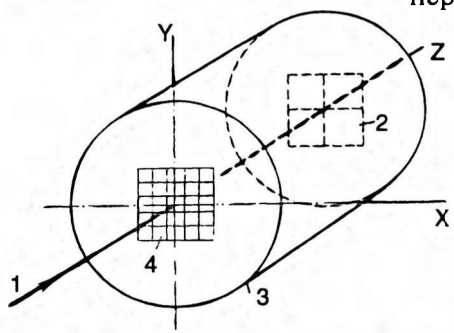


Рис. 5.13. Схема определения координат щита

1 – пучок лазерного излучения; 2 – задний экран; 3 – корпус проходческого щита; 4 – передний экран

Положение щита относительно проектного направления определялось путем визуального взятия отсчетов по экранам. Помимо линейного смещения щита по осям X и У (рис. 5.13), в процессе работы контролировались углы разворота щита α и β по осям X и У:

$tg\alpha = (\Delta x_1 - \Delta x_2)/L$; $tg\beta = (\Delta y_1 - \Delta y_2)/L$, где Δx_1; Δx_2; Δy_1; Δy_2 – приращения координат по осям X и У при измерениях по первому и второму экранам, мм; L – расстояние между экранами, мм.

Положение горнопроходческого щита определялось с точностью 3–4 мм на расстоянии до 100 м. В настоящее время для контроля положения щита обычно используют лазерные цифровые теодолиты типа LDT50 (Sokkia). Этот прибор предназначен для выполнения работ в туннеле. В качестве излучателя в этом теодолите используется полупроводниковый лазер, корпус сделан пылевлагозащищенным и взрывобезопасным, что делает его особенно ценным при выполнении туннельных работ. С помощью встроенного электронного компенсатора исправляются ошибки за наклон инструмента в вертикальных кругах, тем самым обеспечивается высокая точность угловых измерений. LDT50 (Sokkia) имеет достаточно компактный размер для более удобного использования и весит 5,7 кг.

При использовании лазерных цифровых теодолитов для задания направления проходки может быть также применена и несколько другая методика. В этом случае излучатель размещается в одной вертикальной плоскости с осью тоннеля и крепится к кровле на болтах (рис. 5.14). Пучок лазерного излучения ориентируют параллельно оси туннеля в соответствии с проектом. На пути пучка на стене подземного коридора в фиксированной точке построенного участка туннеля закрепляют полупрозрачный экран (диафрагму), а второй экран (диафрагму) закрепляют на ближайшем к лазерному излучателю конце (хвостовике) щита.

На щите на расстоянии 2 м от второго экрана установлен третий экран, причем во время проходки лазерный пучок проходит через центры трех экранов (один экран – на стене туннеля недалеко от лазерного излучателя, другой – на хвостовике щита и третий – в головной части щита). Обычно в высотном отношении пучок проходит почти на 2 м выше оси туннеля. На этом уровне в цепочке машин оставлен свободный просвет размером около 50х50 см, который обеспечивает беспрепятственное прохождение пучка. Экраны могут

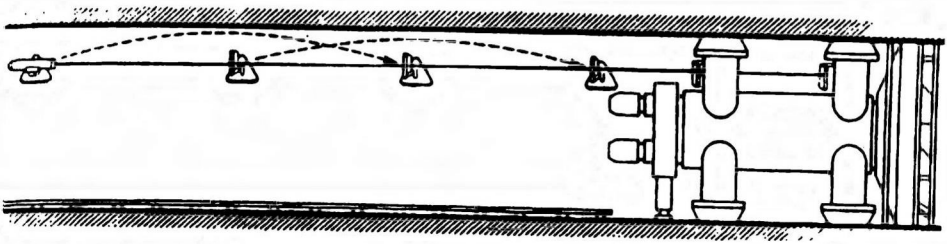


Рис. 5.14. Контроль положения горнопроходческого щита с помощью трех экранов, один из которых закреплен в тоннеле, а два других – на проходческом щите

перемещаться на роликах каждый по дугообразному рельсу, концентрично расположенному по отношению к оболочке щита. У каждого экрана есть свой уровень, ось которого перпендикулярна вертикальной оси экрана. Такое решение обеспечивает вращение экрана вокруг продольной оси во время продвижения щита. С помощью уровней можно добиться такого положения, когда вертикальные оси экранов пересекают продольную ось щита. Если проходческий щит идет в заданном направлении, то пучок, проходя через два экрана (диафрагмы), попадает точно в центр третьего экрана, установленного на щите. Водителю необходимо только следить, чтобы пучок всегда был в центре приемного устройства.

В настоящее время уже накоплен значительный опыт применения лазерных приборов, обеспечивающих визуальный контроль положения горнопроходческого щита при прокладке туннелей не только на прямолинейных, но и на криволинейных участках.

На криволинейных участках трассы положение щита определяется относительно хорды, направление которой задается лазером. Величины вертикальных и горизонтальных отклонений относительно хорд для участков трассы переходных и круговых кривых рассчитываются заранее. Эти расчетные данные наносят на прозрачную пленку, которую крепят на прозрачной рамке из пластика, установленного на щите.

При разбивке круговой кривой на короткие хорды, стрелкой прогиба можно пренебречь, щит можно вести по прямолинейному пути, т.е. по хорде, но в этом случае количество перестановок лазерного излучателя увеличивается.

При использовании лазерных приборов для геодезического контроля при укладке труб, строительстве каналов, разработке подводных траншей можно значительно повысить производительность труда (до 20—50 %), что обусловлено следующими факторами: лазерные приборы обеспечивают постоянное видимое направление, постоянный контроль за неупругими деформациями грунта; отпадают необходимость в проведении контрольных измерений, необходимость в использовании реек, отвесов и створных проволок, разметочных средств типа причалок, шнуров, досок, колышек и т. п.

Например, при прокладке канализационных магистралей традиционным методом приходится выполнять не менее 60 операций по контролю задания направления и вычислению углов наклона на каждые 100 м между двумя входными шахтами и провешивать направления для натяжения проволоки через каждые 8 м. При использовании лазерных приборов, имеющих небольшие габариты, отпадает необходимость в проведении таких операций, и значительно сокращается объем геодезических работ. Лазерные приборы, используемые для контроля укладки труб, иногда называют «трубными лазерами» (Pipe laser) или «уклонофиксаторами».

В связи с тем, что часто приходится работать в условиях повышенной влажности и наличия воды в траншеях, лазерные приборы должны быть хорошо изолированы, влаго- и пыленепроницаемы.

При строительстве трубопроводов используют два основных способа укладки: в открытую траншею и бестраншейный. В первом случае траншею отрывают землеройными машинами, во втором случае укладку осуществляют из направляющей шахты методом продавливания без нарушения поверхности земли. При укладке труб в открытую траншею необходимо между точками излома трассы (в большинстве случаев – между колодцами) обеспечить прямолинейность участка трубопровода и проектный уклон. При строительстве трубопроводов допускают недоборы грунта в основании траншеи и котлованов не более 5 см. Неровности дна траншеи, превышающие это значение, создают перенапряжение конструкции трубопровода на отдельных участках, приводят к потере его прочности и герметичности, утечке воды и удорожанию ремонтных работ.

При строительстве на просадочных грунтах необходимо соблюдать названные выше требования к точности дренажных, планировочных и других работ после проведения противопросадочных мероприятий. Перед производством земляных работ необходимо вынести в натуру начальную точку трассы трубопровода в плане и по высоте, закрепить точки положения промежуточных колодцев или точки поворота трассы.

При укладке трубы лазерный прибор может быть установлен на дне траншеи или колодца, а лазерному пучку задается требуемый уклон, неизменность положения которого контролируется во время работы. Положение начала и конца трубы контролируется с помощью самоцентрирующихся полупрозрачных визирных марок, устанавливаемых внутри трубы (рис. 5.15).

На концах трубы устанавливают самоцентрирующиеся марки, а лазерный пучок направляется по проектной оси трубопровода. Перемещая концы трубы, добиваются совмещения центров марок с лазерным пятном, создаваемым пучком лазерного излучения. Все модели имеют цифровой экран для задания уклона, направления и контроля работы инструмента. Одним из перспективных приборов на сегодняшний день является Dialgrade 1280/1285, который имеет прочный и водонепроницаемый корпус, позволяя проводить работы при самых неблагоприятных

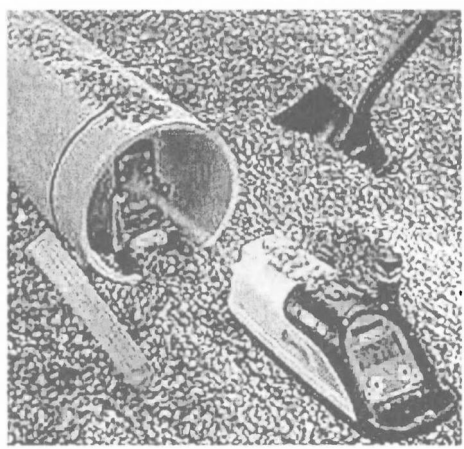


Рис. 5.15. Уклонофиксатор Dialgrade 1280/1285 фирмы Trimble-Spectra Precision, используемый при укладке труб

условиях, возникающих при укладке труб, автоматическую систему контроля нивелировки прибора и возможность управления при помощи дистанционного пульта. Для работы на больших расстояниях предусмотрено использование лазеров с увеличенной мощностью пучка лазерного излучения до 5 мВт. Установка прибора для работы осуществляется автоматически, благодаря наличию компенсатора, работающего в продольном направлении в диапазоне от −15 % до +40 %, и в поперечном в диапазоне ± 3° и управляемого дистанционно (до 150 м). В комплекте поставки имеются марки для труб различных диаметров, подставки и крепежные комплекты для монтажа прибора в колодцах и в трубах большого диаметра.

Технические характеристики лазерного прибора Dialgrade 1280/1285 фирмы Trimble-Spectra Precision

Продолжительность работы батареи	до 60 часов
Длина волны излучения	635 нм
Дальность действия	до 150 м
Мощность лазерного излучения	5,0 мВт
Компенсатор:	
– продольная ось: в пределах диапазона задания уклона	от −15% до +40%
– поперечная ось:	±3°, предупреждение о наклоне
Точность установки	±10″
Диапазон задания уклона	-15% до +40%
Диапазон задания направления	±5,4 м на 30 м
Дистанционное управление	до 150 метров
Защита от внешней среды	полная водо-и пылезащищенность
Вес	около 2,8 кг

Лазерные уклонофиксаторы, используемые для укладки труб, выпускают нескольких типов (табл. 5.5 Приложения).

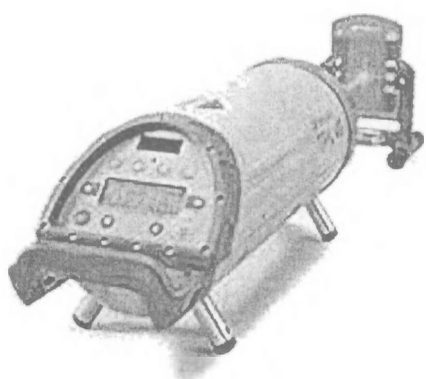


Рис. 5.16. Внешний вид лазерного уклонофиксатора TP-L4 Topcon

Как правило, все они достаточно компактны, чтобы их можно было устанавливать в колодце или крепить к стенке трубы, и имеют водозащитный корпус. На рис. 5.16 показан лазерный уклонофиксатор TP-L4 фирмы Topcon, который, как и другие уклонофиксаторы этой фирмы (TP-L4AV, TP-L4B, TP-L4BG, TP-L4G), имеет функцию автоматического нивелирования и может задавать раздельно лазерные пучки в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Модель TP-L4AV и модель TP-L4BG к тому же имеют функцию автоматического

наведения на цель. Модель TP-L4BG характеризуется теми же самыми особенностями, что и модель TP-L4AV, с дополнительной функцией автоматического наведения, но последняя модель более автоматизирована, так как имеет еще опции автоматического задания уклона и фокусировки при наличии специального шаблона цели.

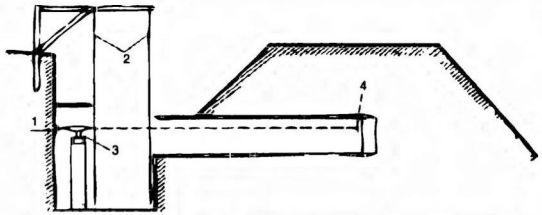


Рис. 5.17. Контроль направления при продавливании труб
1 – контрольная точка направления проходки; 2 – отвесы; 3 – лазерный излучатель; 4 – экран марки; 5 – опорный столб

Как и при работе с аналогичными приборами, выпускаемыми фирмой Trimble, в процессе работы конец трубы перемещают до тех пор, пока лазерный пучок, совпадающий с проектным направлением оси трубы, не попадет в центры марок, установленных в начале и в конце секции трубы. Технические характеристики уклонофиксаторов, выпускаемых фирмой Topcon, приведены в табл. 5.6. Схема контроля направления с помощью лазерных приборов при продавливании показана на рис. 5.17. В направляющую шахту из двух точек, которые в наименьшей степени подвержены смещениям или внешнему воздействию, опускают отвесы, в плоскости которых лежит и ось направления продавливания. В начале работы это направление выносят на поверхность и закрепляют.

Таблица 5.6

Технические характеристики уклонофиксаторов, выпускаемых фирмой Topcon (Япония)

	TP-L4GV/G	TP-L4AV	TP-L4BG	TP-L4B
Длина волны излучения, нм	532 (зеленый)	635 (красный)	532 (зеленый)	635 (красный)
Горизонтальная точность	10″			
Функция «SmartLine»	есть			нет
Отвес	лазер/ светодиод	лазер	светодиод	нет
Диапазон уклона, %	от –15 до +40			
Питание	Щелочные батареи, до 40 часов непрерывной работы			
Рабочая температура	от –20 до +50 °С			
Размеры (дл., диам.), мм	286 x 108			

В колодце на опорный столб устанавливают лазерный прибор по линии, заданной двумя отвесами, таким образом, чтобы пучок лазерно-

го излучения проходил параллельно проектной оси трубы. Для контроля задаваемого направления служит экран, установленный в плоскости забоя или на проходческом оголовке. По положению пятна, создаваемому лазерным пучком на экране, контролируют через каждые 50 см продавливания задаваемый уклон, а по совпадению теней на экране от нитей отвесов – направление проходки. С помощью лазерных приборов можно осуществлять разбивки осей и отметок, контроль монтажа мостовых конструкций и контроль за перемещениями конструкций в процессе их испытаний под нагрузками.

Например, при разбивке осей моста следует развить геодезическую опорную сеть на всю территорию строительства моста, включая примыкающие сооружения (дороги, туннели, канализационные сети и т. д.), методами триангуляции, трилатерации или их комбинациями. Когда монтаж конструкций выполняется в пролете моста, необходимо вынести в натуру точки забивки свай, наметить продольную и поперечную оси моста, вынести точки узлов конструкций и мест соединения, а также проконтролировать геометрию смонтированной конструкции.

Для выноса в натуру продольной оси моста обычно применяют лазерный теодолит, который устанавливают на мостовую опору, а приемные экраны (марки, фотоприемники) – на берегу, на другой опоре или на монтируемой конструкции. Прибор устанавливают таким образом, чтобы лазерный пучок проходил параллельно оси моста на расстоянии 30–50 см от плоскости конструкции, положение элементов которой необходимо измерить. Неподвижность положения лазерного пучка необходимо контролировать с помощью установленных на другом конце трассы экранов или фотоприемных устройств, подающих сигнал, если на них не попадает пучок вследствие смещения прибора.

Контрольные измерения обычно выполняют от оси лазерного пучка с помощью нивелирной рейки, замеряя перпендикуляры до интересующих точек и сравнивая их положение с проектными. Применение лазерных приборов при строительстве мостов обеспечивает постоянное наличие световых точек, линий (плоскостей), по отношению к которым в процессе всего строительства, подъема конструкций и монтажа можно определить геометрическое положение любого элемента и осей. Это обеспечивает не только более высокую надежность, точность соединений и высокое качество, но и ускоряет и упрощает геодезические и монтажные работы.

Измерения деформации моста при испытаниях конструкции под нагрузками можно выполнять, используя лазерный теодолит или нивелир, установленный на твердом основании на берегу, а на испытуемом элементе конструкции – рейку со шкалой. В процессе испытаний отсчеты по рейке можно брать визуально или с помощью фотоприемного устройства, обычно входящего в комплект прибора. В большинстве случаев при проведении подобных испытаний используют цифровые нивелиры (см. 3.3).

Лазерные геодезические приборы также применяются для съемки подкрановых путей.

Для обеспечения бесперебойной работы мостовых кранов в цехах промышленных предприятий периодически производят геодезическую съемку подкрановых путей, заключающуюся в определении планового и высотного положения рельсов.

К состоянию подкрановых путей предъявляются жесткие требования, поскольку перемещения мостовыми кранами больших грузов вызывают изменения в положении несущих колонн, а следовательно, и деформации подкрановых путей. Деформации вызываются, кроме того, неравномерными осадками фундаментов несущих колонн сооружения, температурными влияниями на конструкцию и др. В результате возможен перекос крана, преждевременный износ рельсов, балок, реборд ведущих колес крана и другие нарушения эксплуатационных норм. Эта операция выполняется обычными методами в довольно сложных условиях, так как подкрановые пути проходят на высоте 20–40 м от поверхности пола и не имеют ограждения, а ширина площадки, где закреплены рельсы, обычно имеет ширину менее 1 м.

При съемке подкранового пути расстояние между осями рельсов обычно измеряют стальной рулеткой. Высоту головки рельса над исходной точкой определяют с помощью нивелира, а прямолинейность пути – створным методом. Как правило, в цехах заводов из-за плохих условий освещенности и сильных конвекционных потоков воздуха можно произвести съемку пути на расстоянии 40–70 м с одной точки стояния теодолита или нивелира. Применение же лазеров позволяет с одной установки прибора проконтролировать положение рельса на участке 300–400 м. Это достигается благодаря высокой плотности энергии лазерного пучка, причем условия освещенности в цехе не имеют почти никакого значения. Пучок лазерного излучения (рис. 5.18), ориентированный по проектному положению оси рельса 3 и наблюдаемый

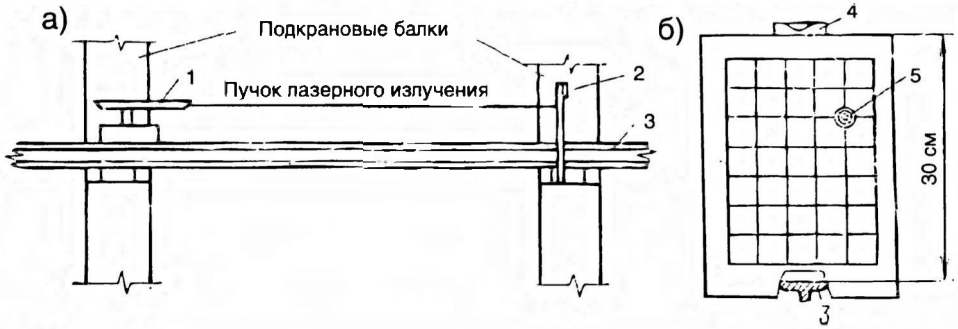


Рис. 5.18. Схема определения положения рельса в плане и по высоте
а – расположение лазерного прибора, рельса и экрана; б – экран; 1 – лазерный прибор; 2 – экран; 3 – рельс; 4 – уровень; 5 – проекция пучка лазерного излучения на экране

визуально, является той базисной линией, относительно которой с помощью специального экрана 2 можно измерить деформацию головки рельса в плане и по высоте.

Положение оси рельса относительно прямолинейного лазерного пучка определяют визуально по проекции пучка на экране. Экран последовательно устанавливают в требуемых точках и берут отсчеты по «центру тяжести» светового пятна, т.е. по максимуму освещенности.

При работе с лазерным прибором ошибка отсчета на экране, имеющем координатную сетку в виде квадратов со стороной 1 см, может быть оценена согласно эмпирической формуле (5.1).

При небольших расстояниях между лазером и экраном наблюдается четкая дифракционная картина. При увеличении расстояния за счет удлинения пути луча в атмосфере начинают сказываться случайные изменения параметров лазерного пучка, вызываемые флуктуациями показателя преломления воздуха, и поэтому дифракционная картина становится размытой.

При съемке подкранового пути допустимая ошибка определения положения оси рельса в плане характеризуется величиной 2–3 мм.

На рис. 5.19 приведены графики, полученные при съемке подкранового пути длиной 270 м лазером и теодолитом [111]. Измерения в прямом и обратном направлениях по каждой нити рельса выполнялись дважды с применением лазерного прибора и дважды с применением теодолита. При съемке лазерным прибором потребовалось сделать только одну станцию, а при съемке теодолитом – четыре. Результаты обеих съемок контролировались значениями расстояний между осями рельсов, полученными из непосредственных измерений стальной рулеткой, принимаемых за истинные величины.

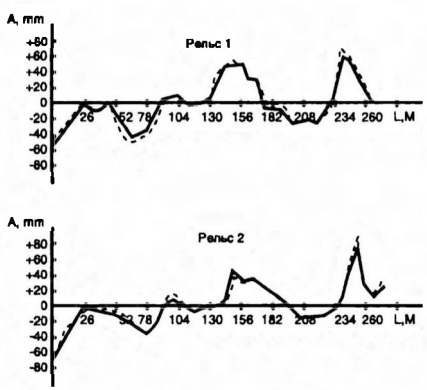


Рис. 5.19. График ошибок, получаемых при съемке планового положения рельсов подкранового пути на участке 270 м

Штриховой линией показано положение оси рельса по результатам съемки лазерным прибором, сплошной – по результатам съемки теодолитом

Ошибки определения оси рельсов 1 и 2 с помощью лазерного прибора и теодолита оказались одинаковыми (3 мм), но затрата времени на съемку с помощью лазерного прибора меньше, чем при съемке теодолитом.

Процесс съемки подкранового пути с помощью лазера довольно легко автоматизировать. В этом случае на кране непосредственно над снимаемым рельсом устанавливается фотоприемное устройство, которое позволяет автоматически определять

пространственное положение лазерного пучка в момент съемки. Другой вариант автоматизации возможен, если для записи результатов съемки использовать видеокамеру, установленную рядом с лазерным прибором, задающим референтную линию.

Довольно эффективным является использование лазерных приборов при выполнении разбивочных работ. При выполнении детальных разбивочных работ в строительстве относительно лазерного пучка геодезического прибора выносят в натуру точки планового и проектного положения конструкций, фиксируют положение разбивочной оси или горизонта. Проецируя пучок на поверхность земли или строительные конструкции, фиксируют плановое или высотное положение разбивочных элементов зданий (осей, отметок или уклонов).

При детальной разбивке оси лазерный прибор устанавливают на продолжении ее створа или грунтовый знак, закрепляющий положение оси в натуре, а на другой знак (закрепленную точку оси) устанавливают визирную марку. С помощью наводящих винтов добиваются точного совмещения лазерного пучка и линии створа. Особенно эффективно использование лазерных приборов при выполнении больших объемов разбивочных работ.

Например, при строительстве зданий повышенной этажности для разметки более 140 тыс. болтовых отверстий был применен лазерный прибор, который устанавливали на соответствующем этаже в углу здания. Болтовые отверстия были необходимы для крепления панелей несущих наружных стен здания, выполненных из алюминиевых сплавов, к установленным между колоннами рандбалкам (рис. 5.20).

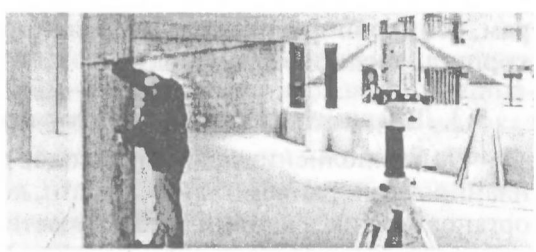


Рис. 5.20. Разметка болтовых отверстий внутри здания с помощью лазерного прибора

После установки прибора в рабочее положение с одной станции проводили разметку противоположных стен и примыкающих стен здания на половину их длины. Сфокусированный лазерный пучок попадал на приклеенную в центральной части колонны фотобумагу, покрытую активатором.

Для того чтобы на фотобумаге отобразилась точка, лазерным пучком облучали фотобумагу в течение 7 с, а затем на нее наносили фиксатор. Затем метку наносили бородком на колонну, а фотобумагу снимали. Процесс разметки отверстий с помощью лазерного прибора выполняется значительно быстрее, чем с помощью оптического теодолита, так как отпадает необходимость наблюдателю, стоящему у прибора, корректировать действия рабочего, делающего разметку.

В настоящее время лазерные приборы с визуальной индикацией лазерного пучка также применяются для задания направления горным выработкам, контроля передвижки ленточного конвейера, при разбивочных работах в процессе строительства подводных туннелей, при строительстве протяженных промышленных комплексов (прокатных станов, транспортных систем, коксовых батарей, вращающихся цементных печей и т. д.) [121].

Использование лазерных приборов значительно снижает трудоемкость геодезических работ при выверке осей вращающихся печей, масса которых достигает нескольких сотен тонн при длине 185 м и более. Допуски на установку таких печей весьма жесткие: максимально допустимое отклонение геометрической оси печи на всей длине не должно превышать 5 мм. При монтаже должен осуществляться последовательный геодезический контроль стыковки корпуса печи, центровки венцовой шестерни, рихтовки холодного и горячего концов печи. Для получения достоверных результатов положение указанных элементов проверяют каждые четверть оборота. При этом печь не вращают, а все измерения выполняют относительно пучка лазерного излучения, направленного строго по оси вращения печи. За время контроля прибор устанавливаю дважды. Один раз – для контроля опорных рам, роликоопор и привода печи, а второй раз – при контроле монтажа корпуса и венцовой шестерни.

5.3. Лазерные приборы для автоматизации геодезического контроля

При выполнении некоторых видов работ, связанных с вертикальной планировкой, рытьем траншей и т.п., контроль за положением рабочих органов машин и механизмов осуществляют с помощью теодолита или нивелира. Если такой контроль осуществлять сложно, то на местности с помощью вспомогательных средств (вешек, кольев, марок, шнуров) задают проектное направление (плоскость), относительно которого выполняют соответствующие работы. Недостаток обычных методов геодезического контроля заключается в том, что в процессе выполнения работ знаки, служащие для закрепления проектного положения, могут быть уничтожены, и поэтому приходится их восстанавливать, что влияет на сроки выполнения и точность. С увеличением производительности строительных машин традиционные средства и обычные методы геодезического контроля становятся тормозом на пути повышения производительности работ.

С появлением лазеров созданы реальные условия не только для повышения производительности работ, но и полной их автоматизации. Автоматизированное лазерное управление относится к машинам с гидравлическим или энергетическим приводом. В этом случае управление и гидравлика машин, приводящие в движение ее рабочие органы, должны срабатывать так, чтобы принятый входной сигнал, команда на

исполнение и обратная связь происходили последовательно, непрерывно и с заданной скоростью. Проектное направление при использовании лазеров может быть задано узконаправленным лазерным пучком, близким к идеальной линии, а задаваемое им опорное направление не уничтожается в процессе работы. В дорожном строительстве трасса состоит из плоских участков большей или меньшей протяженности, составляющих ломаную линию. Так как большинство лазерных приборов снабжено автоматическими компенсаторами, то положение лазерного пучка не изменяется. Отсчет положения рабочего органа машины относительно опорного направления можно осуществлять с помощью фотоприемников автоматически с высокой точностью и с любой дискретностью – практически непрерывно. Кроме того, применение лазеров сокращает потребность в обслуживающем персонале, что ведет к уменьшению влияния субъективных ошибок на результаты работ, устраняет частные контрольные измерения, мешающие работе.

Использование лазерных приборов для автоматизации контроля особенно эффективно при выполнении отдельных видов работ, где требуется выполнять большие объемы вертикальной планировки, как, например, при строительстве аэродромных взлетно-посадочных полос, спортивных сооружений, при ведении земляных работ большой протяженности (рисовые чеки).

В ряде случаев при управлении строительными машинами (например, дренажными машинами, землечерпальными снарядами, машинами для рихтовки железнодорожного пути и др.) необходима высокая точность контроля положения рабочего органа только в одной плоскости, в то время как в плоскости, перпендикулярной к ней, можно допустить значительную свободу движения.

Практически все лазерные системы, используемые для автоматизации геодезического контроля, состоят из лазерного датчика опорного направления, фотоприемника, блока электроники и исполнительного механизма.

При контроле и управлении строительными машинами в одной плоскости применяют лазерные излучатели, задающие не линию, а плоскость. В качестве излучателей могут быть использованы лазерные теодолиты и лазерные нивелиры, снабженные насадками в виде цилиндрических линз либо вращающихся зеркал (см. 3.3). При этом направление развертки пучка всегда должно быть перпендикулярно плоскости измерений. Например, для строительных машин, положение которых контролируется в плане, световая плоскость должна быть вертикальной. Основные параметры лазерной системы автоматического управления: надежность, точность и дальность действия, а также простота и удобство в эксплуатации.

Надежность лазерной системы управления зависит в основном от надежности лазера, которая характеризуется временем работы 10 000 ч.

и более. К лазерным системам, используемым для автоматизации контроля и управления, предъявляются точно такие же требования, как и к лазерным приборам с визуальной индикацией лазерного пучка: они должны работать в сложных метеорологических условиях, при резких перепадах температуры и высокой влажности.

Дальность действия лазерных систем зависит от мощности лазера, применяемой оптики, чувствительности фотоприемника, метеорологической дальности видимости, угловой скорости развертки лазерного пучка, требуемой точности. Для приближенной оценки дальности действия L лазерной системы геодезического контроля и управления можно использовать формулу:

$$L = \sqrt{(P_л \tau_а \tau_п \tau_{фп} d^2)/ \theta^2 P_ф},$$

где $P_л$ – мощность лазера, мВт; $\tau_а$, $\tau_п$, $\tau_{фп}$ – коэффициенты пропускания атмосферы, передатчика и фотоприемника; d – диаметр входного отверстия объектива приемника, м; $P_ф$ – минимальная мощность лазерного излучения, принимаемая фотоэлементом, мВт; θ – расходимость лазерного пучка на выходе из передатчика, рад.

Например, при $P_л = 2$ мВт; $P_ф = 0{,}01$ мВт; $\theta = 20''$; $d = 0{,}01$ м; $\tau_а = 0{,}7$; $\tau_п = 0{,}8$; $\tau_{фп} = 0{,}6$; дальность действия L ~0,8 км.

Рабочая дальность действия лазерных систем зависит от требуемой точности, так как при увеличении расстояния между излучателями и фотоприемником возрастают ошибки измерений, вызываемые влиянием внешних условий на положение лазерного пучка и его форму, увеличивается его поперечное сечение.

Во время работы расстояние между излучателем и управляемым объектом как правило не превышает 500 м, а во многих случаях, где требуется большая точность порядка 2–3 мм, его сокращают до 100 м. Обычно считают, что максимальное рабочее расстояние лежит в пределах прямой видимости. Ввиду небольшой мощности лазеров, используемых в геодезических приборах, требования по технике безопасности при работе с ними соответствуют приборам, излучение которых представляет опасность при облучении глаз прямым или зеркально отраженным излучением, т. е. к приборам II класса.

Точность управления с помощью лазера зависит от стабильности направления и точности регистрации положения лазерного пучка с помощью фотоэлектрического устройства, а также от скорости регистрации гидравлического привода. Стабильность направления лазерного пучка, в свою очередь, зависит от следующих факторов: ухода пучка из-за изменения температуры корпуса лазера; короткопериодических колебаний пучка, вызываемых пульсациями показателя преломления воздуха; изгибания пучка, вызываемого рефракцией; смещения пучка, вызываемого смещением штатива из-за деформаций и осадок грунта, а также влияния ветровых нагрузок.

Величина ухода пучка из-за изменения температуры корпуса лазера зависит от его конструкции и для каждого типа лазера имеет свое значение. Например, уход пучка для гелиево-неонового лазера из-за нагрева корпуса прибора может быть равен 30″ в течение 6 мин.

Газовые лазеры с холодным катодом обеспечивают более высокую стабильность направления пучка. Отклонение его от начального направления после включения лазера может достигать величины порядка 5–10″. Таким образом, при работе с приборами, в которых используются газовые лазеры, необходимо начинать измерения после их предварительного разогрева. Полупроводниковые лазеры, которые в основном и используются в качестве излучателей в геодезических приборах, имеют значительно лучшие температурные характеристики, и поэтому большинство лазерных геодезических приборов не требует времени на разогрев.

Влияние короткопериодических колебаний, вызываемых пульсациями показателя преломления атмосферы, можно полностью исключить или значительно уменьшить, если осреднять результаты измерений. Значительно большее влияние на результаты измерений оказывает вертикальная рефракция лазерного пучка.

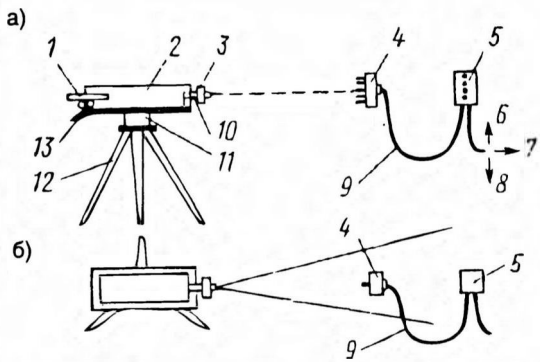


Рис. 5.21. Схема лазерного устройства для одномерного управления строительными машинами:
а – профиль; б – план
1 – уровень; 2 – лазерный нивелир (теодолит); 3 – цилиндрическая линза; 4 – приемная головка; 5 – блок управления; 6, 7, 8 – соответственно сигналы управления: вверх, заданное положение, вниз; 9 – соединительный кабель в бронированном шланге; 10 – коллиматор; 11 – трегер; 12 – штатив; 13 – элевационный винт

Точность регистрации положения лазерного пучка зависит от конкретного типа используемого фоторегистрирующего устройства, которое, как правило, состоит из набора фотоэлементов, расположенных перпендикулярно плоскости развертки пучка (рис. 5.21).

Приемное устройство монтируют на рабочем органе машины (отвал бульдозера, грейдера, ковш скрепера). Оно должно обеспечивать регистрацию лазерного пучка в зависимости от применяемого метода выполнения работ либо с одного направления (например, в случае настила покрытия), либо с любого направления (например, планировочные работы на большой территории, выполняемые несколькими машинами). В ряде случаев приходится с помощью одной и той же лазерной системы задавать направление хода работ и наклон ножа грейдера.

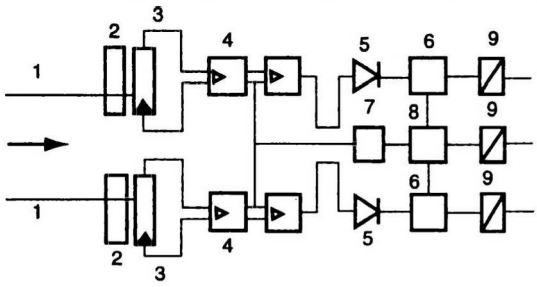


Рис. 5.22. Структурная схема фотоэлектрического воспринимающего устройства
1 – веерообразный пучок лазерного излучения; 2 – фильтр для подавления интерференционных помех; 3 – фотоэлемент; 4 – усилитель; 5 – выпрямитель; 6 – дифференциальная ступень; 7 – регулирующий усилитель; 8 – суммирующий блок; 9 – реле с одним рабочим органом

На рис. 5.22 показана структурная схема фотоэлектрического устройства, предназначенного для одномерного управления. Опорная вертикальная плоскость в сечении задается с помощью лазерного излучателя. Узкополосные фильтры 2, установленные перед фотоэлементами 3, подавляют световые помехи. Электрические блоки 4–9 усиливают и формируют сигнал, а также подают управляющие напряжения на рабочие органы машины, снабженные магнитными клапанами и гидравлическим приводом.

Наиболее простым фотоэлектрическим устройством, регистрирующим положение лазерного пучка, является фотоприемник, закрепленный в каретке, которая перемещается вручную вдоль рейки или телескопической штанги с делениями (рис. 5.23, а).

При выполнении работ, в зависимости от практических задач, рейку устанавливают вертикально или горизонтально. Отсчеты положения светового пятна, создаваемого лазером, берут с помощью нониуса по рейке по диаметрально противоположным краям пучка (для исключения влияния его ширины).

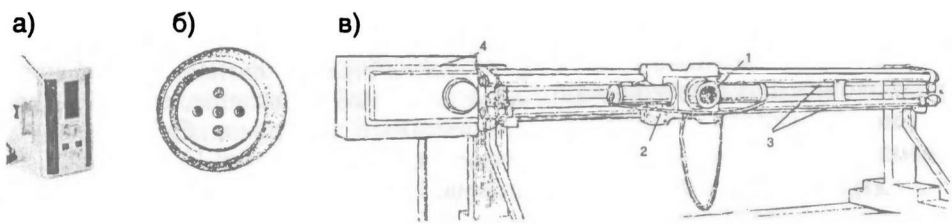


Рис. 5.23. а) Лазерный фотоприемник, устанавливаемый на телескопической штанге или на нивелирной рейке;
б) Фотоприемное устройство (квадрант детектор, состоящее из четырех фотоэлементов);
в) Следящее фотоприемное устройство
1 – объектив; 2 – корпус, в котором установлены два фотоприемника и направляющие штанг 3; 4 – сервопривод

За окончательное значение принимают среднее из двух отсчетов. Для удобства выполнения работ момент взятия отсчета фиксируется звуковым или световым сигналом.

Точность работы такого устройства характеризуется величиной порядка 2—4 мм на 100 м и зависит как от конструктивных особенностей фотоприемника и передатчика, так и от внешних условий. Значительно большая точность регистрации положения лазерного пучка может быть достигнута при использовании двух или четырех фотоприемников (рис. 5.23, б), которые регистрируют положение «центра тяжести» светового пятна. При этом повышение точности измерений достигается путем разделения с помощью призмы одного пучка на два или четыре и затем сравнения их интенсивностей фотоэлектрическими методами. При попадании лазерного пучка в центр промежутка между фотоэлементами на выходе устройства сигнал не формируется. Смещение оси лазерного пучка из зоны чувствительности вызывает разбалансировку электрической схемы, в результате чего вырабатывается сигнал соответствующей полярности. Рассмотренные регистрирующие фотоэлектрические устройства можно назвать полярными. Они позволяют в значительной степени исключить влияние колебаний лазерного пучка, вызываемых пульсациями показателя преломления атмосферы. Это достигается тем, что автоматически выполняется осреднение измерений положения «центра тяжести» за интервал времени порядка 5 с и более. В этом случае влияние короткопериодических колебаний пучка на результаты измерений на расстоянии до 100 м практически исключается (отклонение от оси пучка составляет 0,1—0,3″).

Более широким диапазоном измерений, но меньшей точностью обладает линейная матрица фотоэлементов. Точность фиксации положения лазерного пучка с помощью такого устройства зависит от расстояния между фотоэлементами, размера фотоэлементов, диаметра пучка и характеризуется величиной от единиц миллиметров до единиц сантиметров. Плоскостная матрица из фотоэлементов позволяет регистрировать положение пучка в двух ортогональных направлениях с такой же точностью, как и линейная матрица. Диапазон измерений с помощью таких устройств составляет единицы, а иногда и десятки сантиметров. Фотоэлектрические регистрирующие системы с большим диапазоном измерений до 1—2 м, работающие на этом принципе, довольно сложны и обычно используются в системах автоматизированного контроля при управлении землеройными машинами и механизмами.

При геодезическом контроле положения движущихся объектов может быть также использована вращающаяся линейная матрица фотоэлементов. При вращении линейной матрицы фотоэлементов лазерный пучок засвечивает соответствующий фотоэлемент. В этот момент фиксируется угол поворота линейной матрицы фотоэлементов относительно исходного направления (оси координат), а также номер освещенно-

го фотоэлемента, что соответствует полярным координатам лазерного пучка. К недостаткам такого фотоприемника относятся громоздкость вращающейся части и сравнительно большая инерционность. Наибольшая точность измерений положения светового пучка (единицы микрон и более) обеспечивается с помощью ПЗС-матрицы, на основе которой разрабатываются видеосистемы, позволяющие выполнять измерения по двум координатам (X, У) (см. 1.5).

Для увеличения диапазона измерений применяют следящие устройства, состоящие из двух или четырех фотоэлементов. На рис. 5.23, в показано приемное устройство следящей системы, состоящее из объектива 1, корпуса 2, в котором установлены два фотоприемника, направляющих штанг 3, и сервопривода 4.

Во время работы лазерный пучок попадает в объектив и расщепляется на два пучка, каждый из которых засвечивает соответствующий фотоприемник. После усиления и обработки сигналов с выхода фотоприемников в блоке электроники вырабатываются управляющие напряжения, которые подаются на сервопривод (асинхронный электродвигатель).

Чувствительная головка следящей системы смещается вдоль направляющих штанг до тех пор, пока сигналы на выходе фотоприемников не будут одинаковы. Такое устройство позволяет получить высокую точность измерений (1—2 мм на 100 м), но увеличивается время измерений, и возможны сбои в работе из-за инерционности системы.

Фотоприемное устройство, позволяющее измерять положение лазерного пучка по двум взаимноперпендикулярным направлениям, было, например, разработано еще в 70-х годах в СССР для управления путерихтовочной машиной (ЛАРС-1) [111]. Передатчик ЛАРС-1 создает две взаимноперпендикулярные опорные лазерные плоскости. Для формирования опорных плоскостей используются светоделительная призма и две цилиндрические линзы, расположенные под углом 90° друг к другу.

Приемное устройство состоит из фотоприемника и релейного блока. Фотоприемник обеспечивает прием излучения, анализ положения приемника относительно пучка и выдачу соответствующих корректирующих сигналов рассогласования. Релейный блок преобразует сигналы рассогласования с фотоприемника в управляющие сигналы, подаваемые на гидропривод и контрольные устройства.

Во время работы лазерный передатчик устанавливался на тележке, перемещающейся по железнодорожному полотну. Лазерному пучку задавалось проектное направление, которое отслеживалось с помощью фотоприемного устройства, установленного на путерихтовочной машине.

При движении путерихтовочной машины по железнодорожному полотну фотоприемник перемещается относительно пучка. Так как

рельсы не являются прямой линией, параллельной пучку, то в результате перемещения на выходе приемника вырабатывается корректирующий сигнал, который подается на исполнительный механизм, возвращающий приемник в первоначальное относительно пучка положение.

Перемещение фотоприемника относительно машины используют для подачи команд на силовые установки машины, которые перемещают рельсы вместе со шпалами в ту или иную сторону до тех пор, пока корректирующий сигнал с выхода фотоприемника не станет равным нулю. Как показали испытания, ЛАРС-1 обеспечивает точность рихтовки ±2,0 мм на расстоянии 100 м.

Подобные устройства для геодезического контроля рихтовки пути и подбивки железнодорожного полотна в настоящее время выпускает ряд зарубежных фирм.

Эти устройства обеспечивают автоматическое управление положением рабочих органов машины, которые приводятся в то или иное положение гидравлической системой, с точностью от 1 до 10 мм на каждые 100 м. Подбивка полотна происходит до необходимой высоты. Когда лазерный пучок достигает положения «0», автоматика останавливает работу подбойных молотков и дает команду на их подъем. После этого подбивочная машина передвигается дальше, приближаясь к источнику излучения. Длина одного прямолинейного участка рихтовки рельсов с помощью подобного оборудования составляет 150–300 м. При автоматизированном управлении на криволинейных участках возможны два случая.

В одном случае предварительно рассчитывают отклонения от прямой линии в данной точке трассы и эти значения в последующем контролируют. Но это применимо только для кривых большого радиуса и небольшой протяженности.

В другом случае система программируемого управления по отклонениям кривой от заданного пучком направления обеспечивает формирование кривой.

Помимо рихтовки и подбивки полотна, лазерные устройства могут быть использованы для его контроля и обследования полотна, а также для измерения отклонений по высоте и в плане.

Подобные лазерные системы также применяют для геодезического контроля при передвижке ленточных конвейеров большой протяженности, которые широко используют для транспортировки породы при производстве вскрышных работ [111]. Обычно применяют непрерывную передвижку ленточного конвейера, при которой нет необходимости разборки конвейера на секции, а следовательно, и монтажа. Быстрее и проще осуществляется рихтовка конвейерного става. Для осуществления непрерывной передвижки каркасы ленточных конвейеров устанавливают на шпалах, поверх которых прокладывают одну или две нитки рельсов.

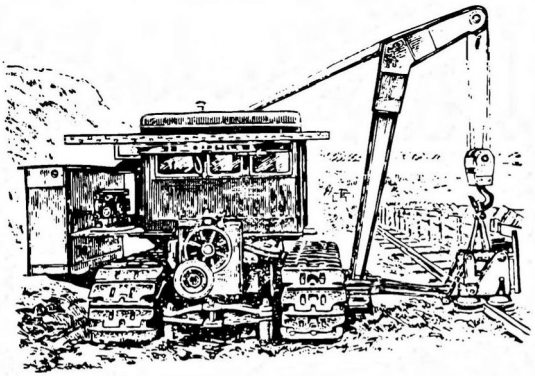


Рис. 5.24. Передвижка ленточного конвейера

При непрерывном способе передвижки обычно используют трактор, снабженный навесным оборудованием в виде обоймы с четырьмя горизонтальными роликами (рис. 5.24). Обойма, управляемая при помощи ручного штурвала, опускается на рельс и зажимает его своими роликами. Затем трактор с установленными на нем гидромеханизмом или лебедкой поднимает обойму. Вместе с рельсом, захваченным обоймой, поднимается и та сторона става, по которой проложен рельс. Приподняв обойму на высоту 15–20 см, трактор начинает двигаться вдоль конвейера параллельно его оси. При первом проходе производится только отрыв шпал от грунта, став конвейера не сдвигается. После отрыва става начинается передвижка. Секции става приподнимаются над почвой и оттягиваются в поперечном направлении на себя на сравнительно небольшой шаг передвижки (обычно 0,3–1,5 м). В процессе передвижки рельс изгибается одновременно как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях в виде волны, что часто приводит к деформациям (или разрушению) рельсошпальной решетки, секций и роликоопор конвейера. С каждым циклом передвижки искривления става конвейера становятся все больше и больше, что может привести к его деформациям и даже к поломке.

Чтобы устранить изгибы става после его передвижки, проводится рихтовка всего конвейера, что вызывает дополнительные затраты средств и времени. Однако и она не устраняет всех нарушений, возникающих в конвейере. Если при каждом цикле передвижки трактор будет двигаться строго параллельно оси конвейера по заданному направлению, то большей части нарушений можно избежать.

Для автоматизации ориентирования передвижчика может быть использована лазерная система, состоящая из излучателя и приемного устройства, выполненного в виде следящей системы (см. рис. 5.23, в). Испытания такого устройства были проведены при передвижке ленточного конвейера на Михайловском карьере Курской магнитной аномалии. Во время работы лазерный прибор устанавливался в начальной точке трассы и ориентировался таким образом, чтобы лазерный пучок проходил параллельно оси става конвейера (рис. 5.24 и рис. 5.25). Для лучшего захвата приемника лазерный пучок развертывался в вертикальной плоскости с помощью цилиндрической линзы, т. е. ему придавалась форма веера. Приемное устройство было размещено на задней части

кабины передвижчика, блок питания и блок цифровой индикации – в самой кабине. Водитель управлял передвижчиком, пользуясь показаниями индикатора, которые фиксировали отклонения трактора влево или вправо от проектного направления с точностью до 1 см. Одновременно положение передвижчика контролировалось теодолитом, с помощью которого брались отсчеты по горизонтально установленной рейке. Как показали испытания, отклонения передвижчика от проектного направления не превышали ±5 см на участке длиной 200 м.

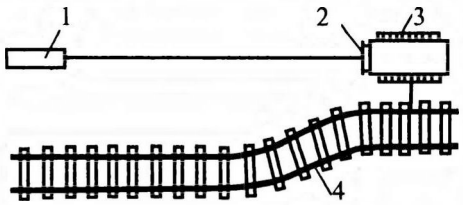


Рис. 5.25. Схема ориентирования передвижчика ленточного конвейера с помощью лазерного прибора

1 – лазерный прибор; 2 – фотоприемное следящее устройство; 3 – передвижчик; 4 – ленточный конвейер

Значительные трудности возникают при использовании традиционных методов геодезического контроля во время работ, связанных со строительством подводных туннелей, разработкой подводных траншей и т. п., что обусловлено сложностью закрепления направлений и опорных точек над водной поверхностью. Начиная с 70-х годов прошлого века, лазерные приборы используются для ориентирования земснарядов при разработке подводных траншей. Традиционно ориентирование земснаряда осуществлялось визуально по створным знакам, расположенным по берегам водоема в соответствии с проектным направлением укладки трубопровода.

Точность ориентирования земснаряда по створным знакам при разработке подводных траншей зависит от расстояния, метеорологических условий и параметров створа.

Применение лазерных приборов при работе над водной поверхностью предпочтительно, так как с их помощью можно задавать направления, а в местах пересечения лучей – опорные точки, которые хорошо видны ночью, а днем могут быть зафиксированы с помощью приемных устройств.

Так, например, в устье р. Кама были выполнены работы, в задачу которых входило определение точности ориентирования по лазерному пучку земснаряда, с помощью которого разрабатывалась подводная траншея для газового трубопровода [7]. Ошибки в ориентировании земснаряда традиционным методом – по створным знакам, установленным на берегу, – на расстоянии 1 км составляют около 2 м, а на расстоянии 3 км – 10 м, что приводит к дополнительным разработкам подводного грунта.

Это не только увеличивает сроки разработки траншеи и повышает затраты, но и затрудняет укладку трубопровода.

Для повышения точности контроля положения земснаряда в створе разрабатываемой подводной траншеи в СССР была разработана лазерная система ориентирования земснаряда. В качестве излучателя в этой системе использовался лазерный прибор с оптико-механическим сканирующим узлом, осуществляющим развертку пучка лазерного излучения в вертикальной плоскости.

Чтобы развернуть лазерный пучок в вертикальной плоскости, использовался восьмигранный зеркальный барабан, установленный по ходу лазерного пучка перед телескопической системой. Угол развертки пучка лазерного излучения после телескопа составлял 50′, а угловая расходимость пучка в горизонтальной плоскости – примерно 0,4′.

Во время работы лазерный прибор устанавливался на берегу в створе разрабатываемой подводной траншеи; приемное устройство, состоящее из четырех идентичных фотоприемников 3, 5, 9, 10 (рис. 5.26), установленных на земснаряде, располагалось на нем же.

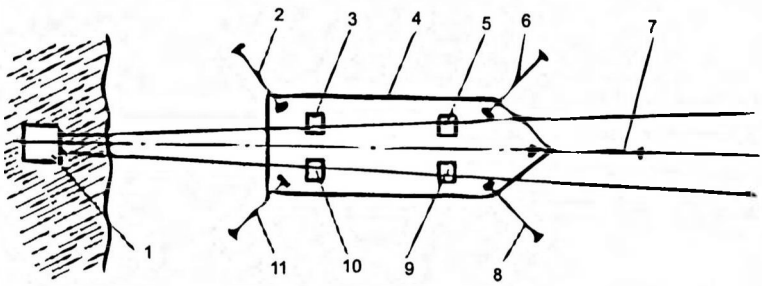


Рис. 5.26. Схема ориентирования земснаряда с помощью лазерного прибора
1 – лазерный визир; 2, 6, 7, 8, 11 – папильонажные лебедки; 3, 5, 9, 10 – фотоприемники; 4 – земснаряд

При ориентировании земснаряда по пучку лазерного излучения на блок электроники поступают сигналы от фотоприемников, на которые попадает пучок лазерного излучения. В соответствии с поступаемой информацией земснаряд возвращают в створ с помощью папильонажных лебедок.

Оценка точности осуществлялась на основании сравнения с результатами фототеодолитной съемки задаваемого створа. Базис фототеодолитной съемки разбивался на берегу около уреза воды. Чтобы получить всю трассу движения судна, выполняющего проходку подводной траншеи, на одной стереопаре, фотографирование проводилось ночью, причем во время движения судна по лазерному створу судовой прожектор периодически включался и выключался с интервалом 5 с. В результате съемки на каждой пластинке получалось изображение трассы судна в виде пунктирной линии. После фотограмметрической обработки

результатов фототеодолитной съемки оказалось, что на всем участке пути длиной около 4 км средняя квадратическая ошибка отклонения катера от оси створа составила ±10 см. Точность удержания земснаряда относительно пучка лазерного излучения составляет в безветренную погоду ±12 см, а при слабом ветре – ±20 см. Дальность действия системы — не менее 6 км.

Таким образом, применение лазерной системы ориентирования резко повышает качество разрабатываемой подводной траншеи, уменьшает объем земляных работ и позволяет обеспечивать круглосуточную работу земснаряда. Современные лазерные геодезические приборы, используемые для этих целей, работают аналогичным образом и имеют такую же дальность действия.

Как уже отмечалось выше, высокоэффективным является использование лазерных геодезических приборов для автоматического управления землеройными машинами и механизмами. Лазерные приборы наиболее эффективно зарекомендовали себя при выполнении следующих основных видов мелиоративных работ: строительстве дренажа, планировке земель под горизонтальную и наклонные плоскости, прокладке каналов и траншей под трубопроводы.

Первые отечественные лазерные системы управления землеройными и мелиоративными машинами использовали при планировке рисовых чеков, затем стали внедрять при укладке дренажа в зонах осушения и орошения, на планировке земель под хлопчатник и другие сельскохозяйственные культуры. Как известно, технология выращивания сельскохозяйственных культур на орошаемых землях, способы и техника полива выдвигают определенные требования к качеству поверхности (рельефу) оросительных и рисовых оросительных систем. Преобразование существующего рельефа с целью удовлетворения этих требований достигается строительной планировкой, которая обеспечивает:

- повышение коэффициента полезного использования орошаемой площади;
- более эффективное использование поливной воды;
- своевременное отведение избыточных поверхностных вод;
- возможность более полной механизации возделывания сельскохозяйственных культур при повышении производительности труда, в частности на поливе;
- возможность предупреждения и борьбы с засолением почвы;
- предупреждение или резкое уменьшение процессов водной эрозии почвы;
- возможность улучшения водно-воздушного режима почвы.

На распланированных землях обеспечивается равномерность сева и внесения удобрений, наблюдается более равномерное прорастание семян и одновременное созревание культур, что способствует повыше-

нию их урожайности, а также облегчается работа сельскохозяйственных машин на повышенных скоростях.

Точность строительства элементов мелиоративных систем (коллекторы, дрены, планируемая поверхность поля, каналы, трубопроводы, дороги и др.) – важнейший фактор, от которого зависят качество выполняемых работ и эффективность использования мелиоративных сооружений.

Наиболее высокие требования предъявляют к точности строительства дренажа. В зоне осушения местные отклонения отметок фактического дна траншеи от проектного допускают в пределах 1,5–2 см для дрен и 3 см для коллекторов в зависимости от диаметра труб, а угловое отклонение от продольного уклона – не более 0,05 % (тангенс угла наклона 0,0005). Обратные уклоны участков дренажной линии не допускаются, и длина безуклонных участков не должна превышать 5 м. Точность планового расположения дренажной сети, характеризуемую отклонениями дрен и коллекторов от их продольной оси, принимают не более ±1 м. К строительству дренажа на орошаемых землях предъявляют аналогичные требования. Соблюдение заданной точности строительства дренажа обеспечивает его работоспособность и расчетные режимы эксплуатации, и наоборот, нарушение этих требований ведет к быстрому заилению, закупориванию полости дрен, выходу их из строя, что влечет за собой нарушение оптимальных режимов работы дренажной сети, норм осушения или промывок, снижение урожайности, перерасход оросительной воды на промывке орошаемых земель.

Надежность работы мелиоративных систем зависит и от многих других факторов: качества используемых дренажных труб и защитно-фильтрующих материалов, размера зазоров и смещений керамических труб относительно друг друга, равномерности распределения плодородного слоя после проведения планировочных работ, качества откосов и облицовки каналов. Однако фактор точности строительства является решающим.

Точность планировки на орошаемых землях регламентируется в пределах ±5 см. При планировке поливных участков с целью экономии поливной воды и получения более высоких урожаев рекомендуется повысить точность вертикальной планировки до ±3 см.

Отклонения отметок дна осушительных и оросительных каналов от проекта принимают не более 3–5 см. Как уже отмечалось, превышение допустимых отклонений снижает эксплуатационные показатели и срок службы всей мелиоративной сети в целом, увеличивает стоимость ремонта и затраты ручного труда. Возрастание объемов переборов сечения канала снижает, в свою очередь, производительность каналокопателей.

Указанные требования предъявляют также к точности выполнения работ при ремонте, реконструкции элементов мелиоративных систем и эксплуатационной планировке орошаемых земель.

Обычно высотный геодезический контроль осуществляют геометрическим нивелированием, причем несколько раз: до начала строительства, периодически во время строительства и после окончания – как исполнительное нивелирование.

Существующие в настоящее время методы контроля планировочных работ основаны на том, что качество планировки проверяют нивелированием по контрольным точкам. Причем чем выше требования к качеству планировки, тем большее количество точек располагают на контролируемой поверхности. После нивелирования и обработки полученных данных составляют схему, на которой показывают, какие точки и насколько лежат выше или ниже проектной плоскости. При этом методе контроля строительные механизмы необходимо либо останавливать, либо перебрасывать на другой участок на время выполнения геодезических работ. При обнаружении отклонений от проектных отметок производится перепланировка соответствующих участков и вновь выполняется геодезический контроль. Такая система контроля трудоемка и не позволяет влиять постоянно и активно на работу землеройной техники, не предотвращает возможность появления брака в работе и последующих переделок. Машинист землеройной машины (скрепера, грейдера, бульдозера) при выполнении работы вынужден ориентироваться на различные временные геодезические знаки (колья, вехи и т. п.), которые в процессе работы могут быть уничтожены и требуют неоднократного восстановления. Для контроля качества работы машинисту необходимо постоянно отрываться от управления машиной, что существенно снижает производительность труда. При проведении планировочных земляных работ машинист «на глазок» определяет вертикальное перемещение рабочего органа, что не обеспечивает точную оценку профиля местности и ведет к проведению повторных планировок одного и того же участка с промежуточным геодезическим контролем. При таком методе работ точность выполнения заданного профиля зависит от субъективных качеств и квалификации машиниста, что не позволяет полностью использовать технические возможности землеройной техники. В результате стоимость работ и сроки увеличиваются. Вертикальная планировка в условиях плохой освещенности не может выполняться из-за трудности обеспечения в этих условиях необходимого качества земляных работ.

Системы управления мелиоративными машинами относятся к классу следящих систем, где функцию обратной связи выполняет чувствительный элемент – датчик, который устанавливают на рабочем органе машины. Датчик определяет текущие перемещения рабочего органа, вызванные возмущающими воздействиями, и вырабатывает сигнал рассогласования (между заданным значением и фактическим положением рабочего органа), который после усиления и преобразования подается на исполнительный механизм, перемещающий рабочий орган и датчик до момента исчезновения сигнала рассогласования.

Существующие системы управления мелиоративными машинами по принципу действия можно разделить на три группы: автономные (бескопирные), опорные (копирные) и опорно-автономные (комбинированные).

Автономные системы не имеют связи с внешними устройствами, расположенными вне машины. Системы этой группы можно, в свою очередь, разделить на гидростатические, гравитационные, программные.

В гидростатических системах в качестве датчика используют сообщающиеся сосуды и различного рода уровни. Например, уровни, заполненные ртутью, применяют в системе управления бестраншейного дреноукладчика Мелиомат (ФРГ). В гравитационных системах в качестве датчика используют маятник или гировертикаль. Они фиксируют угловые отклонения рабочего органа относительно заданного положения (вертикали). Маятниковые датчики систем типа Профиль, Автоплан, Стабилоплан применяют для автоматической стабилизации углового положения отвала автогрейдера, бульдозера или ковша скрепера при планировке земель и строительстве дорог.

В программных системах, не относящихся к следящим, управление осуществляется согласно заданной программе в зависимости от выполняемой работы.

Для выполнения вертикальной планировки впервые в СССР в начале 1970-х годов была разработана система автоматического контроля рабочего органа землеройной машины-СКП-1 (система контроля планировки).

Это устройство состоит из трех функционально связанных между собой блоков: лазерного сканирующего нивелира, устанавливаемого в точке с известной отметкой; фотоприемного устройства, закрепленного вертикально на землеройной машине, и блока управления, устанавливаемого в кабине машины. Принцип действия СКП-1 показан на рис. 5.27.

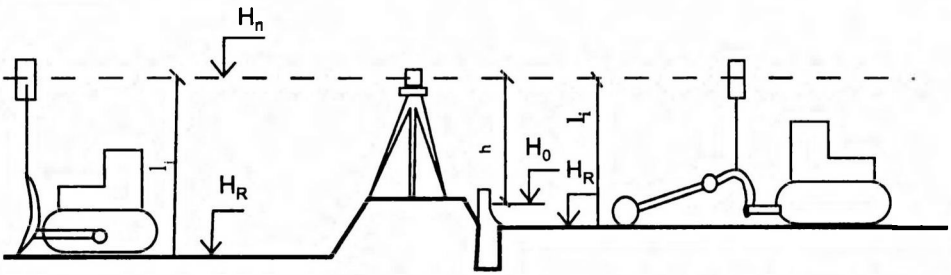


Рис. 5.27. Определение отметок поверхности земли относительно опорной лазерной плоскости

$H_п$ – отметка опорной световой плоскости; H_0 – отметка репера; h – превышение лазерного пучка над репером; $H_{пр} = H_R$ – проектная отметка разрабатываемой поверхности; l_i – высота установки приемника

Лазерный сканирующий нивелир формирует опорную световую плоскость, относительно которой определяют отметки точек поверхности. Фотоприемное устройство регистрирует положение рабочего органа машины (ножа бульдозера) относительно этой плоскости. Блок управления производит обработку данных, полученных с фотоприемного устройства, и отображает информацию о высотном положении рабочего органа машины.

Отметка $H_п$ опорной световой плоскости, создаваемой передатчиком, определяется после измерения высоты h лазерного пучка над репером, отметка которого H_0 известна.

$H_п = H_0 + h$.

Высота установки фотоприемника l_i зависит от проектной отметки $H_{пр}$ разрабатываемого участка.

$H_{пр} = H_п - l_i$.

Преимуществом нивелирования с помощью «лазерной плоскости» является быстрота работы по неограниченному числу реек или фотоприемных устройств как днем, так и ночью. При этом возможно одновременно контролировать работу нескольких машин, а при необходимости параллельно проводить и другие геодезические работы по обеспечению проектного положения строительных конструкций по высоте.

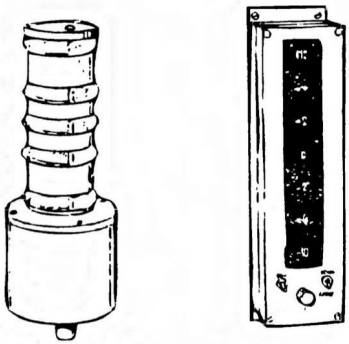


Рис. 5.28. Фотоприемник и индикатор положения

СКП-1 предназначена для контроля планировки горизонтальных участков на площади радиусом 500 м. Приемное устройство, состоящее из фотоприемника с пятью фотоэлементами, решающего блока и панели управления, позволяет определять положение опорной лазерной плоскости относительно элементов фотоприемника, а следовательно, и положение режущей кромки ножа планировочной машины относительно этой плоскости.

С одной станции передатчик может обслуживать несколько участков с различными проектными отметками.

Фотоприемник (рис. 5.28) имеет оригинальную конструкцию, состоящую из пяти световодных дисков-тороидов (рис. 5.29), позволяющую принимать сигнал в пределах 360° и фокусировать его на

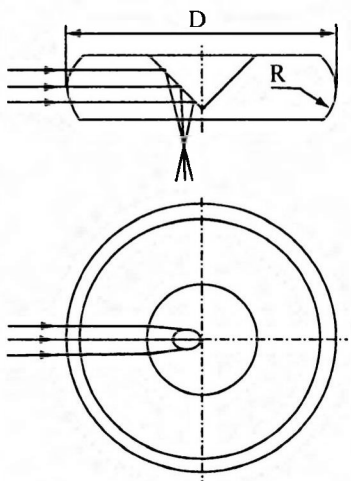


Рис. 5.29. Ход лучей в световом диске (тороиде)

чувствительной поверхности фотоприемника [111]. По этой причине фотоприемник, установленный на машине, имеет круговой обзор, что обеспечивает бесперебойное выполнение планировочных работ на больших площадях даже в том случае, когда положение землеройной машины и датчика излучения (лазерного нивелира) во время работы меняется произвольным образом. Как уже отмечалось, фотоприемное устройство состоит из набора дисков-тороидов, в которые вмонтированы светочувствительные элементы (фотодиоды), и электронного блока, в котором скомпанованы автономные усилители и процессоры.

Основное достоинство такого приемника – возможность кругового обзора, а также простота его конструкции и изготовления. В принципе для определения положения опорной световой плоскости достаточно трех светочувствительных элементов, расположенных посередине фотоприемника.

Фотоприемник лазерной системы СКП-1 имеет пять фотоэлементов, из которых нижний и верхний служат для определения направления перемещения фотоприемника относительно опорной плоскости при движении планировочной машины по земной поверхности со значительными перепадами высот. Логическая схема приемного устройства позволяет определять направления его смещения даже в том случае, когда это смещение превосходит вертикальные размеры фотоприемника. Во время работы в зависимости от того, какой или какие элементы фотоприемника засвечиваются лазерным пучком, на панели, расположенной перед оператором планировочной машины (бульдозер, скрепер, грейдер и др.), включается один из семи индикаторов. По этому индикатору оператор может установить, в каком положении находится рабочий орган машины: на проектной отметке, выше или ниже ее.

При одновременной засветке трех средних элементов фотоприемника (второго, третьего и четвертого) на панели включается один центральный световой индикатор, сигнализирующий о том, что механизм находится на проектной отметке. Когда же фотоприемник смещается относительно опорной плоскости вверх и засвечиваются третий и четвертый элементы, на панели ниже центрального индикатора включается индикатор, показывающий, что рабочий орган машины находится выше проектной плоскости. Если засвечивается первый или пятый элемент, то включается соответственно самый верхний или самый нижний световой индикатор панели, показывающий, что рабочий орган находится значительно ниже или значительно выше проектной отметки.

На лицевой панели, кроме световых индикаторов, имеются выключатель питания приемного устройства, предохранитель и переключатель режима работы «грубо-точно». В положении переключателя «грубо» работают лишь верхний, средний и нижний индикаторы панели. Этот режим используется на стадии предварительной планировки, когда пе-

ремещают основные объемы грунта. При точной окончательной планировке переключатель устанавливается в положение «точно».

Приемное устройство выполнено так, что в некотором диапазоне оно не реагирует на небольшие изменения отметок, т. е. имеется «мертвая зона». Величина этой зоны определяется конструктивным решением фотоприемника — размерами объективов фотоэлементов, расстоянием между элементами, а также закономерностью изменения диаметра пучка с изменением расстояния между передатчиком и фотоприемником. В пределах дальности действия системы (500 м) «мертвая зона» не превышает 25 мм.

Фотоприемник крепится на ноже машины на металлической штанге, позволяющей устанавливать фотоприемник на необходимую высоту. Он имеет пять фоточувствительных элементов со специальными объективами кругового обзора. Высота установки фотоприемника l_i, измеряемая от центрального элемента до поверхности земли, вычисляется по формуле:

$$l_i = H_п - H_{пр}.$$

В процессе планировочных работ выполняют следующие операции. Для удобства определения отметки опорной поверхности вблизи места установки передатчика закрепляют временный репер (см. рис. 5.27) и определяют его отметку H_o. Перед началом планировочных работ лазерный нивелир устанавливают в выбранном месте и приводят в рабочее положение. При работе на насыпном грунте для обеспечения устойчивости передатчика штатив следует устанавливать на колья, забитые в грунт.

Далее определяют отметку опорной (световой) плоскости $H_п$. Для этого на временном репере устанавливают нивелирную рейку, по которой берут отсчет. Затем по формуле

$$H_п = H_o + h$$

вычисляют отметку опорной лазерной плоскости. Правильность определения горизонта прибора определяют по четырем контрольным точкам (временным реперам), эти точки располагают так, чтобы направления на них от станции были близки к 90°.

После этого закрепляют фотоприемник на рабочем органе машины на необходимой высоте l_i. В некоторых случаях после разбивки участка в плане перед началом планировочных работ проводят нивелирование поверхности по квадратам от временного репера и заново вычисляют проектную отметку с балансом земляных работ, что позволяет избежать ошибок, возникающих при съемке в период изысканий, проектировании и при перенесении проекта в натуру. При планировке участка вначале производится срезка и перемещение основных объемов грунта в места, где необходима подсыпка, т. е. выполняется предварительная планировка. Получив поверхность, отметки которой отличаются от проектных не более чем на ±10 см, приступают к окончательной точной

планировке. На стадии предварительной планировки машинист руководствуется показаниями среднего и крайнего светового индикатора. Во время окончательной планировки он пользуется показаниями всех индикаторов и заканчивает работу, когда при движении машины по участку на панели горит один центральный световой индикатор.

При другой организации работ только часть планировочных машин оборудуется фотоприемными устройствами. На местности обозначают точки нулевых работ, по которым фотоприемники машин устанавливают на необходимую высоту. Для этого поднимают или опускают штангу, фиксируют положения, при которых включается нулевой индикатор панели, и закрепляют фотоприемник в среднем положении. Это делается для устранения погрешности, возникающей из-за наличия мертвой зоны. Машины, оборудованные приемными устройствами, выравнивают маячные полосы через 10 или 20 м по всей длине площадки. Операторы машин, не оборудованных приемными устройствами, планируют площадку, ориентируясь на маячные полосы. Операторы машин, оборудованных фотоприемниками, контролируют выполненную планировку и исправляют замеченные отклонения. К настоящему времени технология геодезического обеспечения точности планировочных работ значительно усовершенствована, так как используется автоматическое регулирование рабочего органа планировочной машины. Современные лазерные системы имеют приемное устройство, смонтированное на рабочем органе машины и соединенное с ее гидравлическим приводом, что позволяет автоматически регулировать положение рабочего органа грейдера, скрепера, траншеекопателя или бульдозера. При этом рабочая скорость машины не снижается, а если планировку нельзя выполнить за один проход машины (например, на сильно пересеченной местности), то приемное устройство зарегистрирует отклонение от проектной отметки. Такие автоматизированные лазерные системы контроля вертикальной планировки (САУЛ) выпускались в СССР в 80-х годах [111].

Точная автоматическая регулировка положения рабочего органа машины уменьшает время простоя техники, исключает ошибки и переделки. В качестве примера на рис. 5.30 показан план участка до начала работы лазерной автоматизированной системы контроля вертикальной планировки (а) и по окончании работы системы (б).

В настоящее время выпуск САУЛ в России прекращен, и поэтому в основном используются аналогичные системы, выпускаемые зарубежными фирмами (см. табл. 5.3). Так например, фирма Trimble (США) выпускает лазерную систему геодезического контроля вертикальной планировки Trimble GCS21 (рис. 5.31), предназначенную для автоматизации геодезического контроля при вертикальной планировке с помощью грейдера или бульдозера, т.е. функционально предназначенная для решения тех же задач, что и САУЛ. Это оборудование может быть использовано для контроля и управления во время работы с автогрей-

дерами, бульдозерами, экскаваторами и асфальтоукладчиками. В основу работы системы Trimble GCS21 положено использование опорной лазерной плоскости, создаваемой лазерным нивелиром.

Основное отличие от САУЛ – малые габариты и масса излучателя, малая энергоемкость, а также достаточно большой диапазон работы фотоприемника по высоте, составляющий 1 м или 2 м в зависимости от выбранной комплектации прибора. Технология выполнения работ такая же, как и при работе с отечественными лазерными системами контроля вертикальной планировки СКП-1 и САУЛ. Лазерный нивелир устанавливается на штатив в любом месте рабочей площадки и создает проектную горизонтальную или наклонную лазерную плоскость. На рабочий орган бульдозера или грейдера монтируется приемник лазерного излучения, установленный на телескопической штанге. С помощью приемника определяется высотное положение рабочего органа

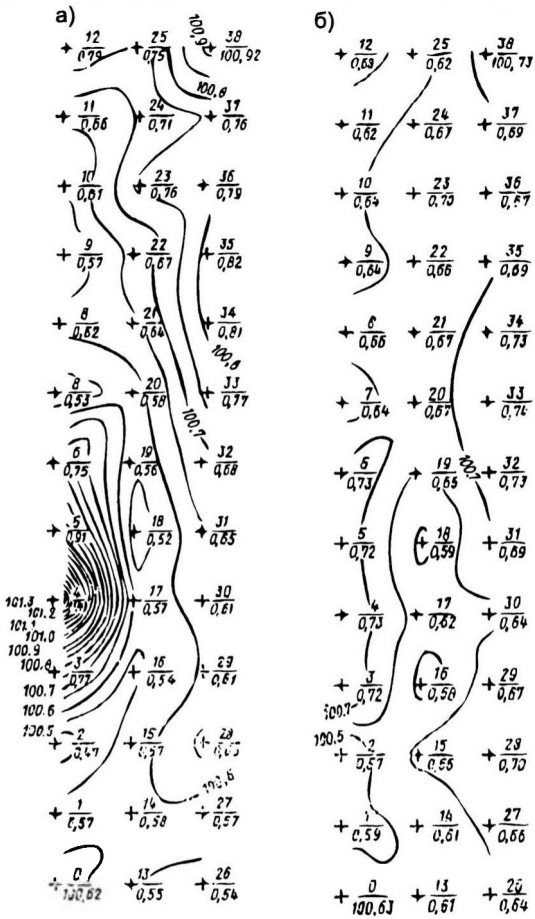


Рис. 5.30. План участка до начала работы лазерной автоматизированной системы контроля вертикальной планировки (а) и по окончании работы системы (б)

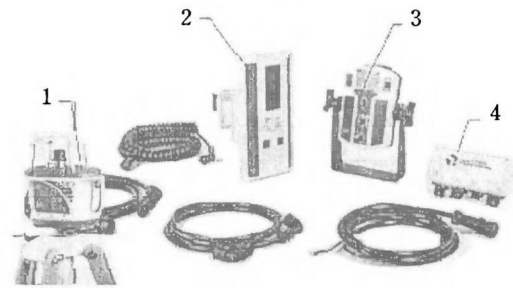


Рис. 5.31. Комплектация лазерной системы геодезического контроля вертикальной планировки

1 – лазерный построитель плоскости (лазерный нивелир); 2 – приемник лазерного излучения LR21; 3 – блок управления; 4 – распределительная коробка

землеройной машины относительно лазерной плоскости. Изменение положения приемника относительно нее позволяет точно определить величину смещения отвала относительно проектной поверхности земляного полотна. В качестве лазерного приемника используются модель Trimble LR21 или Trimble SR21 (табл. 5.7). С обеими моделями приемников система может работать как индикаторная, показывая на дисплее положение ковша машины, или как автоматизированная, управляя гидравлической системой машины и автоматически регулируя положения отвала. Например, лазерный приемник Trimble LR21 является универсальным, так как он может использоваться как автономно, так и в качестве компонента полностью автоматической системы управления бульдозерами и грейдерами GCS21 (табл. 5.7). Для установки на нож грейдера или бульдозера приемник закрепляется на ручной или электрической телескопической мачте. Точность фиксации лазерной плоскости составляет 1 мм, обеспечивая надежность и правильность выполняемых работ.

Таблица 5.7

Технические характеристики лазерной системы Trimble GCS21 автоматизации геодезического контроля для вертикальной планировки

Параметры лазерного построителя плоскости		
Марка прибора	Trimble-SP 1242	Trimble-SP GL722
Технические характеристики		
Вес:	2,9 кг	8,5 кг
Тип лазера	видимый, 635 нм	
Мощность лазера/класс	5 мВт/3 класс	2 мВт/2 класс
Электрические		
Питание	4 NiCd	6 батарей тип D
Время работы без смены батареи	40 часов	100 часов
Условия эксплуатации		
Температура	от –20 °С до +50 °С	от –20 °С до +50 °С
Нивелировка прибора		
Тип нивелировки	автоматическая	автоматическая
Диапазон самонивелировки	до 10%	до 10%
Тип компенсатора	AccuGuard	–
Диапазон работы компенсатора	±11′	–
Измерение превышения (точность)		
миллиметров на 30 м	±1,6 мм	±1,6 мм
миллиметров на 1 км двойного хода	±1,7 мм	±1,7 мм
Радиус работы (с приемником)	400 м	450 м
Дополнительные условия		
Задание уклона	цифровой ввод	цифровой ввод двухосевое (GL720/722)

Дистанционное управление	нет	есть, до 220 метров для GL722

Параметры фотоприемника LR21

Размер	30,5x15,2x6,0 см
Масса	1,6 кг
Питание	от сети машины, 9-30 вольт пост. тока; аккумуляторы (BP21) 9,6 В
Диапазон рабочих температур	от –29 °С до +71 °С
Угол приема лазерного излучения	360°
Длина чувствительного элемента	26,7 см
Дискретность	0,01 мм
Точность	1,5 мм
Угол видимости индикаторов	40°

Параметры блока управления SCB 21

Размер	20,3x12,7x10,2 см
Масса	1,4 кг
Питание	от сети машины, 9-30 вольт пост. тока
Диапазон рабочих температур	от –29 °С до +71 °С
Обмен данными	порт RS-232

Параметры приемника SR21-1/ SR21-2

Длина	1,28 м/2.27 м
Масса	18,6 кг/23.5 кг
Питание	10-30 В/10-30 В
Диапазон рабочих температур	от –29 °С до +71 °С
Угол приема лазерного излучения	360°
Дискретность	0,01 мм
Точность	1,5 мм

Для оптимизации работ в зависимости от заданного допуска по точности машинист может установить три диапазона чувствительности и выбрать различные режимы отображения информации на индикаторе приемника. При помощи телескопической мачты оператор машины может установить приемник так, чтобы опорная лазерная плоскость находилась посередине чувствительного элемента. Приемник LR21 оснащен яркой светодиодной индикацией положения лазерной плоскости. Если лазерная плоскость находится на заданном уровне, то светится зеленый светодиод, если требуется скорректировать положение ножа, то светится красный светодиод. Благодаря автоматической настройке светодиодов на условия освещенности (дневную или ночную), оператор машины всегда может видеть их показания. Для минимизации времени простоя, в случае выхода лазерной плоскости за диапазон работы приемника отображается направление, куда надо переместить приемник, чтобы найти лазерную плоскость. Приемник SR21 выпускается в двух модификациях – с диапазоном работы 1 или 2 метра (рис. 5.32).

По всей длине приемника закреплены фотодиоды, обеспечивающие прием излучения от лазерного нивелира в диапазоне 360°. Так

как SR21 не содержит каких-либо механических частей, он является более надежным по сравнению с другими приемниками, которые крепятся на телескопической мачте. Как и другие компоненты системы GCS21, он легко подключается к ней благодаря универсальному интерфейсу CAN, а управление работой приемника производится при помощи панели SCB21, которая предназначена для вывода информации о текущем положении отвала и для управления работой системы GCS21. Блок управления SCB21 устанавливается в кабине машины. На экране панели отображается вся необходимая информация о текущем положении отвала и работе устройств системы. Блок может подключаться к гидравлической системе машины через специальную распределительную коробку SRB21, которая обеспечивает автоматическое управление гидравлическими системами машин практически всех известных производителей техники: Caterpillar, John Deere, Komatsu, Mitsubishi, Fiat Alis и др.



Рис. 5.32. Фотоприемное устройство SR21 лазерной системы автоматизированного геодезического контроля Trimble GCS21, установленное на рабочем органе (ноже) бульдозера

При этом достигается высокая точность установки рабочего органа машины, соответствующая точности фиксации лазерной плоскости, т. е. порядка 1 мм. Блок управления может работать в трех режимах: «Survey» – измерения, «Indicate» – индикации и «Control» – управление. В режиме «Survey» отслеживается и записывается положение лазерной плоскости при перемещении машины по участку работ, выполняется своего рода нивелирование поверхности. Интерфейс «Controller Area Network» (CAN), разработанный на основе стандарта Plug-and-Play, обеспечивает простое и быстрое подключение всевозможных компонентов системы GCS21. Электронная схема приемника позволяет отслеживать ошибки в положении лазерной плоскости, возникающие в случае неисправности нивелира, например, когда вращающийся луч описывает конус или гиперболоид. Если лазерный луч был потерян, то на приемнике включится предупреждающий индикатор. Если на участке работают несколько лазерных нивелиров, то используемая в приемнике специальная технология позволяет выбрать лазерную плоскость, соответствующую определенному нивелиру. Данные могут быть загружены в компьютер или другой накопитель через RS232 порт. В таком режиме при использовании приемника LR21 желательно, чтобы он устанавливался на электрическую

телескопическую мачту. В режиме «Indicate» приемник показывает позицию лезвия машины относительно проектной поверхности. В режиме «Control» осуществляется автоматическое управление лезвием машины. Модульное исполнение системы и специальный контроллер «Controller Area Network» (CAN) позволяют осуществлять подбор комплектации системы GCS21 в зависимости от решаемых задач и при необходимости обновить систему вновь разработанными в Trimble узлами и элементами системы в случае ее дальнейшей модификации. Система Trimble GCS21 поставляется в различных конфигурациях, от простых комплектов до полностью автоматизированных систем управления.

В качестве лазерного построителя плоскости при этом могут быть использованы лазерные нивелиры с дальностью действия в сотни метров. Фирма Trimble выпускает лазерные нивелиры (табл. 5.7), которые могут работать либо в видимом, либо инфракрасном диапазоне спектра. Обычно для этих целей используют лазерный нивелир Trimble-SP 1242 (рис. 5.33) либо Trimble-SP GL722 (рис. 5.34).

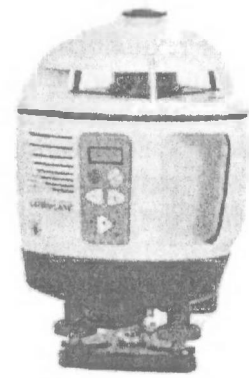


Рис. 5.33. Лазерный нивелир Trimble-SP 1242

Эти автоматические лазерные нивелиры имеют устройство дистанционного управления всеми функциями прибора. Кроме того, для повышения точности и удобства они могут работать в нескольких специальных режимах, обеспечивающих автоматическое задание уклонов и ориентацию осей прибора. Приборы имеют герметичный и прочный корпус, который рассчитан на использование в самых неблагоприятных полевых условиях.

Применение лазерных систем геодезического контроля при выполнении земляных работ позволяет повысить производительность на 30–55 %, а точность — на 25–75 %. Лазерные системы автоматического контроля вертикальной планировки в основном являются одномерными, так как осуществляют контроль только по высоте. При выносе проекта в натуру и воспроизведении сложного рельефа поверхности используются системы геодезического контроля и управления 3D. Системы автоматического контроля 3D могут

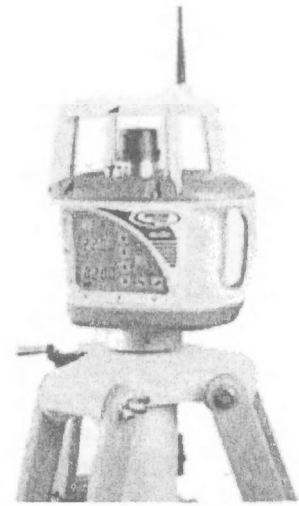


Рис. 5.34. Лазерный нивелир Trimble-SP GL722

быть созданы на основе использования спутниковой аппаратуры, работающей в режиме RTK, и на основе роботизированных тахеометров, например, типа ATS (Advanced Tracking Sensor) – электронный тахеометр S6 фирмы Trimble с системой самонаведения и слежения, который используется для проведения точных работ [99]. S6 выпускается в трех модификациях: Servo, Autolock и Robotic. Роботизированный электронный тахеометр Trimble S6 (рис. 5.35) может вращаться с очень высокой скоростью (115 в секунду), так как в нем используется электромагнитный сервопривод, работающий на принципе электромагнитного подвеса. Кроме того, в электронном тахеометре Trimble S6 используется новая технология SurePoint™ – система автоматической корректировки наведения на призму. Благодаря этому компенсируются ошибки, обусловленные небольшими колебаниями (вибрациями) прибора или штатива, вызываемые ветром или случайными толчками инструмента.

Электронный тахеометр Trimble S6 (рис. 5.35, а) может производить точное автоматическое наведение на обычные призменные отражатели (рис. 5.35, в) на расстояниях до 500 метров, имеет внутренний радиомодем с частотой 2,4 ГГц для связи с контроллером, т. е. компоненты роботизированного комплекта имеют бескабельное соединение, что существенно упрощает работу. Батарея большой емкости обеспечивает 6 часов непрерывной работы в режиме Robotic. Кроме того, прибор позволяет с большой скоростью и точностью выполнять измерения без отражателя на расстояния до 300 метров. Контроллер Trimble® CU (рис. 5.35, б)

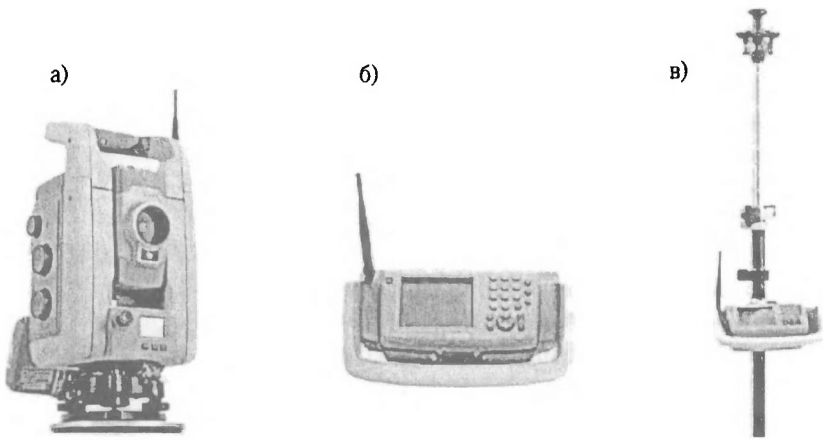


Рис. 5.35. Комплект роботизированного электронного тахеометра S6 Robotic фирмы Trimble

а – электронный тахеометр; б – контроллер; в – веха с отражателем и контроллером

с полноцветным сенсорным дисплеем специально разработан для работы с электронными тахеометрами и GPS, обеспечивая совместную работу разного геодезического оборудования и поэтому имеет большую встроенную память — 256 Мб. В контроллере используется полевое программное обеспечение Trimble Survey Controller, которое позволяет проводить практически все виды топографо-геодезических работ, начиная от развития обоснования и заканчивая разбивочными работами в гражданском и дорожном строительстве, в том числе и вынос в натуру цифровых моделей поверхностей при работе с дорожными машинами. Контроллер TCU имеет возможность установки различного полевого программного обеспечения, например, Survey Pro, SCS900.

При работе таким электронным тахеометром результаты измерений текущего положения уголкового отражателя, закрепленного на рабочем органе машины, передаются в компьютер, установленный в кабине машины, который сравнивает эти данные с проектными. Основное достоинство системы автоматического контроля с использованием роботизированного электронного тахеометра — высокая точность измерений ~5 мм и наличие «поискового интеллекта», который позволяет за очень короткий промежуток времени автоматически найти отражатель и быстро навестись вновь на него в случае его потери (например, луч перекрыт проходящими машинами между землеройной машиной и электронным тахеометром).

Наиболее широко в строительстве для планировки поверхности со сложным рельефом используются системы автоматического контроля 3D — BladePro 3D (рис. 5.36). Эти системы, выпускаемые фирмой Trimble, могут работать как в ручном, так и в автоматическом режиме. Система Trimble BladePro 3D предназначена для установки на автогрейдеры, асфальтоукладчики или дорожные фрезы. В отличие от лазерных систем, которые в основном предназначены для работы на прямолинейных участках и площадных объектах, или от ультразвуковых систем, для которых необходимо устанавливать копирную струну, система Trimble BladePro 3D позволяет формировать поверхности практически любой формы и без какой-либо разбивки.

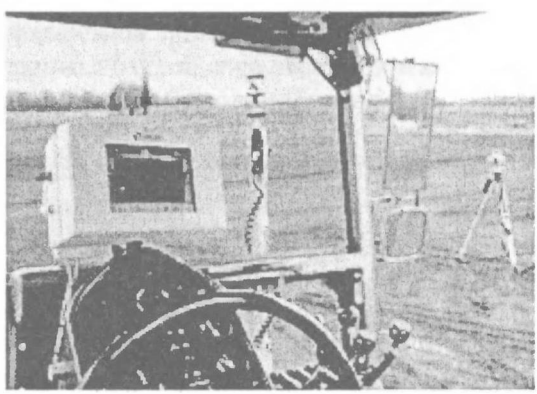


Рис. 5.36. Система Blade Pro 3D, установленная на автогрейдер

Система является универсальной, т. е. она может работать и в обычном 2D режиме, например, с использованием лазерного приемника и лазерного построителя плоскости (лазерного нивелира) или с ультразвуковым датчиком. В зависимости от комплектации система может включать различные датчики наклона, которые позволяют формировать поверхность с определенным поперечным уклоном. Ультразвуковые датчики высоты позволяют выдерживать определенную высоту рабочего органа относительно проектной поверхности. Ниже, в табл. 5.8 приведены технические характеристики указанных датчиков.

При работе с системой BladePro 3D в бортовой компьютер загружаются проектные данные в цифровом виде по участку работ. Используя трехмерную модель местности, которая загружается в бортовой компьютер до начала работы, оператор с помощью системы BladePro 3D может выполнить на местности весь комплекс земляных работ, соответствующий проекту, а именно: формировать вертикальные кривые, переходные кривые, виражи и все другие элементы проекта. Причем все эти работы производятся без использования проекта на бумаге и без какого-либо выноса в натуру, т. е. установки колышков, натягивания копирной струны и т. п. Во время работы роботизированный тахеометр устанавливается в удобном месте и привязывается по 2-3 опорным точкам к местной строительной системе координат. Затем тахеометр автоматически находит активный отражатель, установленный на отвале машины, и постоянно отслеживает его перемещение с максимальной угловой скоростью.

Частота определения координат позиции отвала может быть установлена до 6 раз в секунду. Координаты передаются в бортовой компьютер по радиомодему. Бортовой компьютер вычисляет текущее положение и уклон лезвия, используя данные от тахеометра, датчика наклона и поворота отвала. Эти данные сравниваются с проектным положением, т. е. тем положением лезвия отвала, которое должно было бы быть в данной позиции.

В результате вычисляются величины рассогласования, характеризующие, на сколько надо поднять или опустить левый или правый гидроцилиндр отвала. Изменение положения цилиндров происходит автоматически или, при необходимости, его производят вручную, ориентируясь по информации на экране бортового компьютера. Таким образом, BladePro 3D позволяет вести автогрейдер только по одной проходке, а также перемещаться по полотну практически в любом направлении, формируя точную копию запроектированной поверхности дороги.

Таблица 5.8

Технические характеристики датчиков строительных машин

Датчики поперечного/продольного наклона	
Точность	0,2 см/м
Дискретность	0,01%
Диапазон работы	±19,9%
Размер	133 x 47 x 76 мм
Вес	2,0 кг
Температурный диапазон работы	–28 °С – +60 °С
Ультразвуковой датчик высоты	
Точность измерения расстояния	±1,5 мм/±4,5 мм (зависит от установок пользователя и от режима работы)
Дискретность	±1,0 мм
Диапазон работы	от 305 до 1220 мм
Размер	216 x 108 x 95 мм
Температурный диапазон работ	–20 °С – +58 °С

При этом не требуется делать разбивку на трассе: расставлять пикетажные колышки с отметками или натягивать струну для работы с ультразвуком, контролировать при помощи каких-либо геодезических инструментов полотно после проходов автогрейдера — система дает информацию, где надо добавить грунта, где срезать.

Используя ручной или автоматический режим управления отвалом, оператор может обеспечить точность до 10 мм. (Например, при использовании системы BladePro 3D на основе роботизированного тахеометра Trimble S6 (аналог Trimble 5600 Robotic) точность формирования земляного полотна дороги может быть обеспечена в пределах 5–10 мм.) В итоге экономится не только время на проведение работ, но и материал, в том числе и дорогостоящая асфальтобетонная смесь верхних слоев.

Другой универсальной 3D-системой автоматизированного управления строительными машинами и механизмами является система Trimble SiteVision. Система Trimble SiteVision позволяет формировать полноценную трехмерную поверхность, например, земляного полотна дороги, карьера, площадки для аэродрома и других объектов, с точностью до 3 см. При этом не требуется проведения каких-либо предварительных разбивочных работ. В основу работы системы SiteVision положена спутниковая система определения координат — GPS. При использовании системы Trimble SiteVision план участка воспроизводится на экране бортового компьютера в кабине машины, что дает возможность оператору точно определять свое местоположение и объем земляных ра-

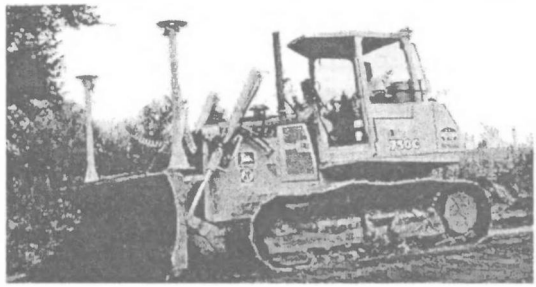


Рис. 5.37. Бульдозер с двумя спутниковыми приемниками.
Антенны крепятся на телескопических мачтах на ноже бульдозера

бот. Каждая установленная на машине система состоит из бортового компьютера, GPS-приемника, световых панелей, GPS-антенн с мачтами и радиомодема.

На отвал грейдера или бульдозера (на штанге) устанавливаются одна или две спутниковые антенны (рис. 5.37). Используемые спутниковые приемники работают в режиме RTK. RTK режим обеспечивает точные результаты прямо в движении. При этом требуются минимум два GPS-приемника: один из них используется в качестве базовой станции и устанавливается на точке с известными координатами, а второй приемник устанавливается на контролируемой машине – бульдозере, автогрейдере, скрепере или экскаваторе. Базовая GPS-станция обычно устанавливается стационарно, в удобном месте, например, на кровле здания, и состоит из GPS-приемника, антенны и радиомодема. Базовая станция системы SiteVision передает по радиомодему свои координаты и другую информацию со спутников на приемник, установленный на машине. Одна «база» может обслуживать неограниченное число машин с системой SiteVision в радиусе около 20 км. Если дальность радиосвязи недостаточна, то для увеличения зоны покрытия могут использоваться дополнительные ретрансляторы.

Во время работы приемник GPS определяет текущие координаты XYZ антенны, используя полученные данные базовой станции и собственные данные. Бортовой компьютер (рис. 5.38) определяет точную позицию отвала и сравнивает эти данные с предварительно загруженной в память цифровой моделью поверхности, затем вычисляются проектная высота и поперечный уклон для текущей позиции рабочего органа (ножа или ковша) машины, т. е. на сколько нужно его поднять или опустить. На основании этих данных система автоматически перемещает рабочий орган на нужную высоту и задает ему требуемый уклон, используя установленный на машине электрогидроклапан. Полученные результаты отображаются на экране компьютера в виде положения машины на плане местности, в разрезе (поперечный профиль), в виде текстовой информации, а также на

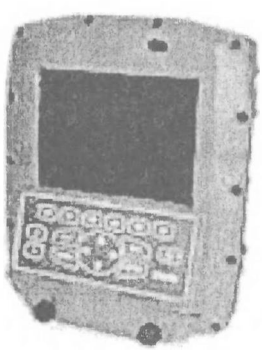


Рис. 5.38. Бортовой компьютер системы Trimle SiteVision

специальных индикаторах. Оператор всегда точно знает, где находятся машина и отвал относительно проекта. Эта информация используется во время работы для ручного управления. (При автоматическом режиме работы высотное положение рабочего органа задается без участия оператора при помощи электрогидроклапана.)

Для автоматизации управления строительными машинами и механизмами используются также комбинированные системы, основанные на совместном использовании спутниковой и лазерной аппаратуры. Так, например, фирма Topcon создала комбинированную систему TOPCON GPS+Laser-Zone. Эта система основана на одновременном использовании спутникового геодезического оборудования и лазерного сканирующего нивелира, включающего в себя три компонента: лазерный нивелир PZL-1, мобильный датчик PZS-1 для установки на обычную вешку и датчик PZS-MC для установки на строительную машину. Датчик PZS-MC имеет повышенную защиту от воздействия пыли, влаги и вибраций. Благодаря такой комбинации приборов в пространстве формируется рабочая зона радиусом 300 метров и высотой 10 метров (рис. 5.39). Внутри этой «лазерной зоны», датчик PZS-1, установленный на вехе, и датчик PZS-MC, установленный на рабочем органе строительной машины, используя программное обеспечение, мгновенно определяют свое точное высотное положение относительно лазерного излучателя PZL-1. Как утверждает фирма-разработчик Topcon, любая строительная машина, использующая технологию mmGPS, способна выполнять контроль положения рабочего органа в реальном масштабе времени с сантиметровой точностью в плане и миллиметровой точностью по высоте. Один лазерный прибор PZL позволяет вести одновременные измерения неограниченному числу датчиков PZS на удалении до 300 метров.

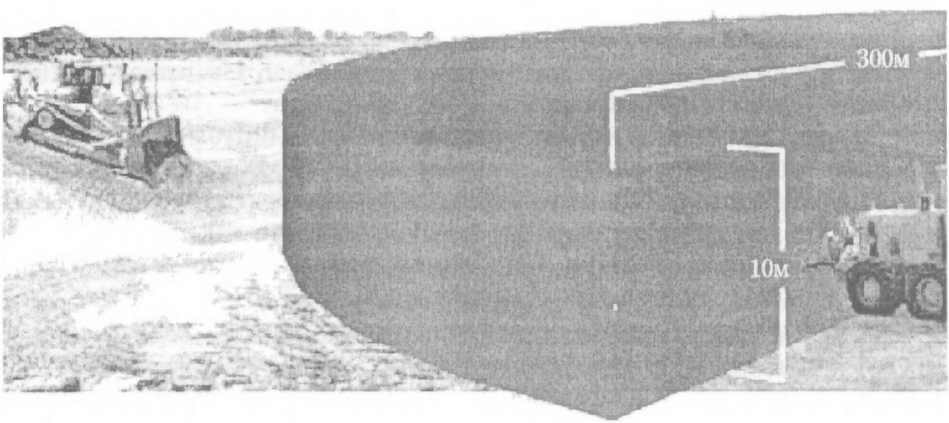


Рис. 5.39. Формирование рабочей зоны при использовании новой комбинированной системы TOPCON GPS+Laser-Zone, созданной фирмой Topcon (Япония)

При использовании технологии «Laser-Zone» вместе со спутниковым оборудованием TOPCON для съемки в реальном времени (RTK) можно выйти на миллиметровый уровень точности определения высотных отметок, что особенно важно при производстве высокоточных земляных или дорожных работ.

Специалисты США на основе анализа работы 1,4 тыс. лазерных систем автоматизации управления строительными и дорожными машинами на планировочных и земляных работах определили, что экономия средств по сравнению с затратами на выполнение работ машинами, неоснащенными указанными системами, составляет: по расходам на аренду строительных машин – 49 %; по эксплуатационным расходам (обслуживание, оплата персоналу, расходы на горючее) – 68 %. Расходы на подготовку участка площадью 100 м² (с учетом амортизации строительных машин) снижаются на 56 % .Эффективность использования лазерных систем автоматического контроля положения рабочего органа землеройной машины складывается из сокращения трудозатрат, роста производительности труда геодезистов на 50–70 % и улучшения качества работ.

В 5.2 рассматривалась возможность использования лазерных приборов для визуального контроля положения проходческого щита при строительстве туннелей (метрополитен, водоснабжение, канализация, промышленные коллекторы и т. д.). Впервые в СССР опытный механизированный щит работал в 1949 году на строительстве Кольцевой линии в Москве и построил несколько сотен метров тоннеля на участке «Киевская»–«Парк Культуры». Современные средства навигации – гироскопы и лазерные теодолиты – позволяют щиту точно выдерживать проектные значения трассы как в плане, так и в профиле. Ручной труд сохранился только при необходимости замены изношенных резцов. Мировой рекорд скорости проходки – 1250 метров тоннеля в месяц – поставлен серийным щитом КТ-1-5,6. Обычные скорости проходки буровым щитом составляют порядка 3 м/ч. Направление проходки контролируют, по крайней мере, через каждые 30 м, т. е. при указанной скорости – через 10 ч. работы.

Для автоматизации управления проходческим щитом используются лазерные цифровые теодолиты например, LDT50, разработанный фирмой Sokkia (Япония). Этим прибором можно измерять горизонтальные и вертикальные углы с точностью до 5″ и задавать как параллельный лазерный пучок, так и сфокусированный, используя соответствующую клавишу на панеле прибора.

В качестве излучателя в лазерном цифровом теодолите LDT50 используется долговечный лазерный диод, который имеет две ступени мощности выходного излучения: 1 Вт при работе на коротких расстояниях и 2 Вт – при работе на более длинных расстояниях. Это обеспечивает надежность автоматического управления проходческим щитом на расстояниях более 400 м. Лазерный теодолит позволяет оценивать

уклон как в процентах, так и в промилях. Учитывая ограниченность пространства в туннеле для установки оборудования, теодолит снабжен оптическим центриром, который позволяет выполнять центрирование на расстоянии 20 см.

Обычно для определения положения щита относительно пучка лазерного излучения используются экраны с фотоприемниками. Комплект оборудования включает лазерный цифровой теодолит с приспособлениями, позволяющими устанавливать его в рабочее положение на штатив, либо закрепляя на стене тоннеля (рис. 5.14). Лазерный пучок проецируют на приемное устройство, которое заранее укреплено на проходческом щите таким образом, что пучок проходит через две диафрагмы, одна из которых расположена на стене, а другая – на ближайшем к лазерному излучателю конце щита и положение которых определено. Центр приемного устройства, находящегося на машине, перед включением наводят на пучок, направление которого определяется диафрагмами. Если машина идет в заданном направлении, то пучок, проходя через диафрагмы, попадает точно в центр экрана, фотоприемное устройство которого соответствующим образом соединено с гидравлической системой проходческого щита.

Таким способом например, в Нью-Мехико был построен туннель длиной 3,2 км с суммарной ошибкой по горизонтали 16 мм. С одной опорной точки управляли строительством участка протяженностью 600 м. При строительстве туннеля для третьего дорожного кольца в Москве для контроля направления проходки также использовался лазерный теодолит с комплектом фотоприемников, устанавливаемых на проходческом щите, что позволило обеспечить в сложных условиях качество проходки и высокую скорость.

Дальнейшее развитие автоматизации контроля положения горнопроходческого щита также может быть связано с использованием видеосистемы [27], регистрирующей пространственное положение щита и элементы внешнего ориентирования (тангаж, крен, рысканье).

5.4. Современные геодезические приборы для измерения деформаций сооружений и установки в створ технологического оборудования

Изучение деформаций сооружений, вызываемых осадками и горизонтальными смещениями, обычно осуществляют геодезическими методами. Степень деформации характеризуется величиной и скоростью процесса. Иногда характер деформаций влияет на нормальный режим функционирования сооружения. В этом случае при проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений, особо чувствительных к деформациям, необходим учет деформаций, которые по своей величине могут быть несущественны для устойчивости строительных конструкций, но важны для технологического процесса. Примером этого

могут служить ускорители заряженных частиц, для которых важны не отдельные величины деформаций несущих конструкций, а их функциональное возмущающее влияние на работу ускорителя. Поэтому резко возрастают требования к стабильности грунтов, лежащих в основании фундаментов подобных сооружений.

Особое внимание уделяется изучению деформаций сооружений высотного типа, которые по конструктивным признакам подразделяются на высотные сооружения ступенчатого, коробчатого и башенного типа. К первым относятся высотные здания МГУ, на Лермонтовской площади, на Смоленской площади и т. д., построенные в Москве в пятидесятых годах. Вторые — это современные высотные здания, например, здание СЭВ, гостиница «Националь» и много высотных жилых домов. В числе третьих — телевизионные башни, дымовые трубы, градирни ТЭЦ, радиорелейные мачты и т. д. Для всех этих высотных сооружений характерно сосредоточение огромной нагрузки на основание и фундаменты, составляющей иногда несколько десятков тысяч тонн и вызывающей осадку сооружения. Неравномерность осадки приводит к нарушению вертикальности (крену), прогибам отдельных элементов сооружения и трещинам. Эти деформации, присущие всем типам высотных сооружений, возрастают с ростом нагрузки в строительный период и постепенно, по мере уплотнения грунтов, стабилизируются в период эксплуатации.

Кроме того, сооружения башенного и ступенчатого типа испытывают так называемые динамические деформации (изгибы и колебательные движения), обусловленные воздействием температурных факторов и переменной ветровой нагрузки.

Для этих крупных инженерных сооружений наблюдения за деформациями являются обязательными в течение всего эксплуатационного периода. К таким сооружениям также относятся плотины, здания ГЭС, водоотводящие комплексы, шлюзы, причалы для судов, судоподъемники и др. Наиболее крупными из них являются плотины гидроэлектростанций, которые подвержены деформациям под действием собственной массы сооружения, давления воды и льда, удара волн, температурных влияний и других факторов. На основании расчетов не может быть точно оценено их влияние на устойчивость сооружения, и поэтому должны выполняться периодические натурные измерения осадок и горизонтальных смещений, которые определяются относительно опорных пунктов, расположенных вне зоны возможных деформаций.

Осадки сооружений (смещения в вертикальной плоскости), как правило, определяют с помощью повторного высокоточного нивелирования. Для наблюдений за сдвигами (горизонтальными смещениями) обычно применяют створный метод, а динамические деформации и крен верхней части сооружений башенного типа могут быть определены различными способами, наиболее распространенными из которых

являются способ координат, способ угловых трехстворных наблюдений и вертикального проектирования. С развитием науки и техники все большее распространение находят методы и средства автоматизации наблюдений за деформациями сооружений [15, 21, 23, 25, 26, 108].

Створные измерения

Под створными понимают геодезические измерения, выполняемые с целью определения незначительных отклонений промежуточных точек от прямой, проходящей через два крайних (исходных) пункта, называемых опорными. Створные измерения применяют при изучении деформаций сооружений, а также для установки технологического оборудования в проектное положение. При этом относительно опорных точек в натуре разбивают и закрепляют монтажные оси, которые могут совпадать с рабочими осями устанавливаемого технологического оборудования или быть параллельными им.

Монтажная ось представляет собой прямолинейный отрезок или систему жестко связанных по азимуту прямолинейных отрезков, закрепленных в натуре опорными точками. При значительной длине монтажной оси путем створных наблюдений определяют ряд промежуточных точек, находящихся в одном створе с опорными. Точность осуществления монтажной оси зависит от назначения устанавливаемого технологического оборудования.

В некоторых случаях точность установки технологического оборудования на участке протяженностью 2–3 км составляет десятые доли миллиметра (линейные ускорители элементарных частиц), следовательно, разбивка монтажных осей в натуре должна осуществляться в два-три раза точнее. Уникальные по точности створные измерения выполняют при создании ускорителей элементарных частиц, направляющих путей большого протяжения, специальных передающих антенн, автоматических поточных производственных линий и т. п. В дальнейшем, в период эксплуатации подобных сооружений, должен осуществляться геодезический контроль за положением технологического оборудования.

Наиболее распространенные традиционные способы створных измерений – оптический и струнно-оптический. Однако в отдельных случаях они не обеспечивают требуемую точность и не позволяют автоматизировать процессы измерений и контроля, что часто бывает необходимо по условиям радиационной обстановки на объекте и требованиям техники безопасности. Эти недостатки могут быть устранены путем использования дифракционных средств измерений.

Дифракционный способ створных измерений основан на опыте Юнга (см. гл. I). На рис. 5.40-5.41 показаны принципиальная схема устройства и приборы для створных наблюдений.

Устройство для дифракционного створения состоит из лазера 1 и марки 2 (рис. 5.41), установленной в начальной точке створа и име-

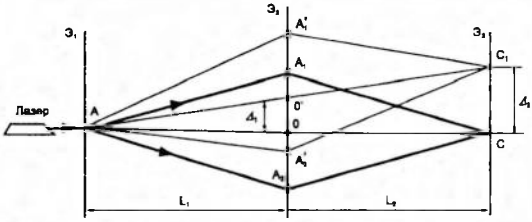


Рис. 5.40. Схема дифракционного способа створных измерений

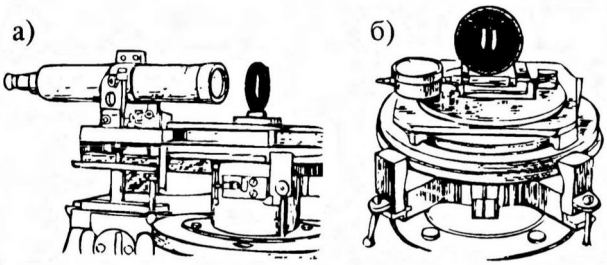


Рис. 5.41.
а – лазер и однощелевая марка; б – двухщелевая марка

ющей одиночную щель А (рис. 5.41, а), двухщелевой марки (рис. 5.41, б.) со щелями A_1 и A_2 (рис. 5.40) и полупрозрачного экрана $Э_3$ с сеткой нитей, установленного в конечной точке створа. Для наблюдения интерференционной картины экран $Э_3$ снабжен окуляром с увеличением (2–3)х.

Интерференционная картина (рис. 5.42) состоит из чередующихся ярких и темных полос, формирующихся в плоскости экрана $Э_3$ (см. рис. 5.40) в области перекрытия лазерных пучков. Линия АС, соединяющая центр одиночной щели А с центром сетки нитей С, является створом.

На промежуточной точке, нестворность которой нужно определить, устанавливают двухщелевую марку. Если ось симметрии обеих щелей A_1 и A_2 (точка О) находится на линии АС, то в окуляре наблюдается совпадение сетки нитей с яркой центральной полосой интерференционной картины, образованной в результате дифракции света от двойной щели. При перемещении двухщелевой марки перпендикулярно створу на величину Δ_1 (центр марки О сместится в точку О′) изменяется разность хода световых лучей A'_2C_1 и A'_1C_1, вследствие чего смещаются на величину Δ_2 полосы интерференционной картины, наблюдаемые в окуляр. Например, если разность хода лучей равна длине волны источника света, то в точке С наблюдается вместо максимума минимум освещенности.

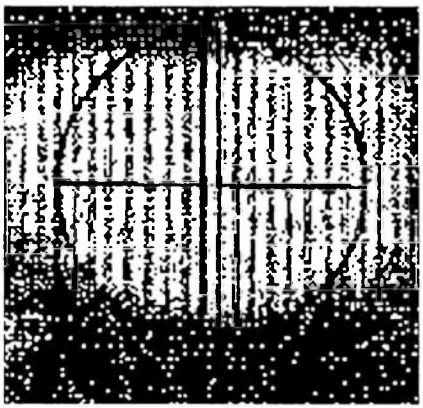


Рис. 5.42. Интерференционная картина, наблюдаемая в плоскости экрана

Зависимость между величиной смещения Δ_1 двухщелевой марки относительно створа и величиной смещения Δ_2 центра интерференционной картины выражается формулой:

$$\Delta_1 = [L_1/(L_1 + L_2)]\Delta_2,$$

где L_1 – расстояние от начала створа до двухщелевой марки, см; L_2 – расстояние от двухщелевой марки до сетки нитей, см.

Для определения смещения (нестворности) Δ_1 промежуточной точки измеряют величины L_1, L_2 и величину смещения Δ_2, перемещая сетку нитей до совмещения ее с центром интерференционной картины. Дифракционный способ створения с использованием лазера в качестве излучателя позволяет определять нестворность промежуточной точки на линии длиной до 400 м со среднеквадратической ошибкой около 0,1 мм [156].

Для определения нестворности точек в двух взаимно перпендикулярных плоскостях применяют зонные пластины (линзы Френеля), состоящие из чередующихся прозрачных и непрозрачных колец (или линий), а также точечные диафрагмы. В окуляре приемника света наблюдается интерференционная картина, состоящая из чередующихся ярких и темных колец. Для удобства наблюдения приемное устройство может иметь сетку нитей в виде концентрических окружностей.

В СССР разработан лазерный интерференционный створофиксатор ЛИСТ-1 с визуальной регистрацией, в котором применяют зонные пластины [156]. В комплекс ЛИСТ-1 входит лазерный створоуказатель, состоящий из газового лазера, который установлен на подставке, снабженной накладным уровнем и центрирующим устройством. При выполнении работ с помощью горизонтирующего устройства лазер устанавливают таким образом, чтобы ось лазерного пучка была точно направлена вдоль линии створа.

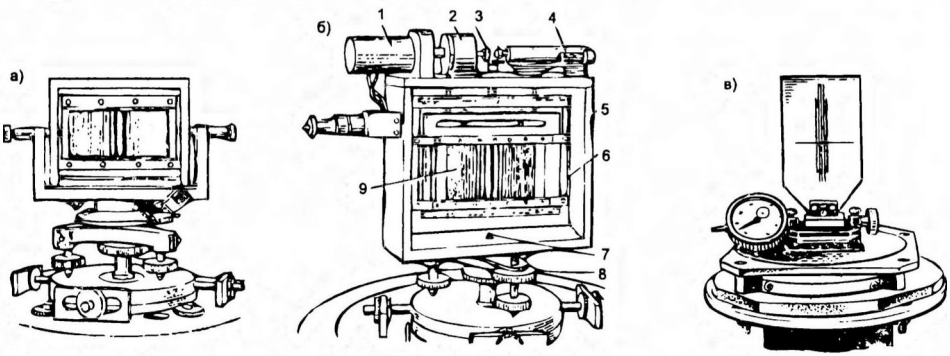


Рис. 5.43.
а – зонная марка; б – зонная марка с электроприводом; в – экран
1 – электродвигатель; 2– редуктор; 3 – конические шестерни; 4 – цилиндрический уровень; 5 – внешняя рамка; 6 – оправа; 7 – полуоси; 8 – подставка с подъемными винтами и центрировочным устройством; 9 – зонная пластинка; в – экран-марка

Зонные марки (рис. 5.43, а, б) служат для формирования интерференционной картины. Основной частью зонной марки является зонная пластина, которая закреплена в специальной раме, снабженной юстировочными винтами. С помощью юстировочных винтов ось симметрии зонной пластины может совмещаться с вертикальной осью вращения марки. Рамка с зонной пластиной установлена на подставке, которая имеет цилиндрический уровень и лимб, используемый для установки зонной пластины под расчетным углом к заданному створу.

Для дистанционных измерений используют зонную марку (рис. 5.43, б), у которой разворот зонной пластины относительно линии створа на заданный угол осуществляют с помощью электродвигателя 1, управление работой которого производится с пульта управления. Определение положения центра интерференционной картины осуществляется с помощью полупрозрачного экрана-марки (рис. 5.43, в).

Экран с сеткой нитей установлен на подставке с центрировочным вкладышем и может перемещаться с помощью микрометренного винта. Величина перемещения экрана определяется по индикатору часового типа с точностью до 0,01 мм.

К достоинствам использования лазеров в дифракционных створофиксаторах с визуальной индикацией относится возможность выполнения измерений при длине створа в несколько сот метров с точностью до десятых долей мм. К недостаткам – быстрое утомление глаз, что вызвано значительной интенсивностью лазерного излучения, создающего интерференционную картину высокой степени яркости.

Поэтому параллельно с созданием лазерных створофиксаторов с визуальной индикацией были разработаны несколько модификаций створофиксаторов с фотоэлектрической индикацией [156], которые позволяют осуществлять дистанционный съем информации.

Устройства такого типа обычно применяются при строительстве уникальных сооружений, например, при создании опорного створа ускорителя. Они обеспечивают высокую точность и скорость измерений. Например, при створе длиной 864 м средняя квадратическая ошибка определения нестворности среднего пункта составила 0,18 мм, или в угловой мере – 0,08″. Точность измерения можно еще более повысить, если исключить влияние внешних условий. Аналогичное устройство используют в США для контроля положения 273 блоков магнитов Стенфордского ускорителя. Устройство (рис.

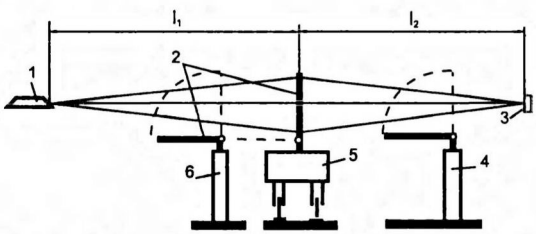


Рис. 5.44. Схема лазерного интерференционного створофиксатора
1 – лазер; 2 – зонные пластины; 3 – фотодетектор; 4 – конечная точка створа; 5 – проверяемый магнитный блок; 6 – начальная точка створа

5.44) состоит из источника света — гелий-неонового лазера 1, зонных пластин 2 и фотодетектора 3.

Створ, относительно которого определяются смещения оборудования ускорителя в плане и по высоте, проходит через центры зонных пластин, укрепленных на железобетонных столбах в начальной 6 и конечной 4 точках.

Для ослабления влияния внешних условий лазерный пучок проходит в трубе, в которой создан вакуум порядка 1 Па. Контроль за положением блоков магнитов осуществляется автоматически на участке протяженностью 3 км. На каждом блоке 5, положение которого контролируется, шарнирно прикреплена зонная пластина, имеющая возможность устанавливаться вертикально, перекрывая лазерный пучок, или автоматически выводиться из него.

Зонные пластины изготовлены из листов меди и покрыты никелем. Пластины имеют систему прямоугольных отверстий, расположенных таким образом, чтобы при их освещении лучом лазера в центре создаваемого ими изображения источника света освещенность возрастала, т.е. в плоскости изображения, совпадающего с плоскостью фотодетектора, происходило сложение световых колебаний.

Чтобы изображение источника света находилось в плоскости детектора, фокусное расстояние f каждой зонной пластины должно удовлетворять условию:

$$1/f = 1/L_1 + 1/L_2,$$

где L_1 и L_2 — расстояния от зонной пластины до лазера и до фотодетектора. Для удобства измерений смещений исследуемых точек в горизонтальном и вертикальном направлениях расположение щелей выбрано так, чтобы освещенность изображения возрастала по двум взаимно перпендикулярным направлениям и в плоскости фотодетектора наблюдался яркий крест, образованный двумя светящимися линиями.

Для осуществления геодезического контроля блоков магнитов в световой поток, создаваемый лазером, вводят поочередно дистанционно зонные пластины до тех пор, пока не получат информацию о положении всех 273 магнитов. При смещении исследуемой точки смещается изображение источника света (яркий крест). Величина смещения измеряется с помощью фотоприемника. Для повышения точности измерений изображение креста сканируется узкой щелью в горизонтальном и вертикальном направлениях. Координаты x и y центра изображения светящегося креста определяют по максимуму светового потока, попадающего на фотоэлемент через движущуюся щель.

Зная координаты x и y центров изображений от зонных пластин, установленных на конечных точках створа, и измерив координаты центра изображений от зонной пластины, установленной на промежуточной точке створа, определяют нестворность промежуточных точек как в плане, так и по высоте. Чувствительность фотодетектора позволяет фиксировать

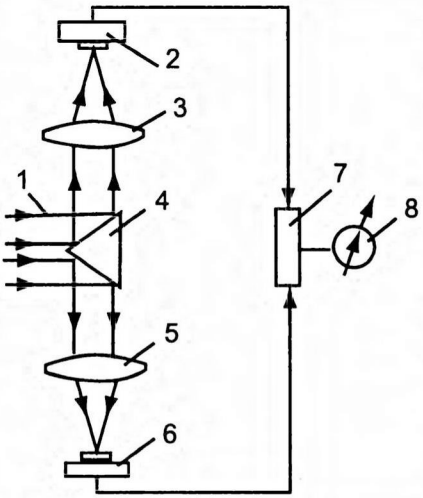


Рис. 5.45. Оптическая схема датчика дифференциального типа
1 – световой пучок; 2 и 6 – фотоприемники; 3 и 5 – конденсоры; 4 – призма; 7 – блок электроники; 8 – регистрирующий прибор

сдвиги размером 0,025 мм на любой из 273 поверяемых точек ускорителя. В случае нестворности поверяемого магнита на недопустимую величину установка его в проектное положение осуществляется дистанционно с помощью прецизионных гидравлических домкратов. Подобная автоматизация измерений позволила исключить необходимость присутствия обслуживающего персонала, занимающегося проверкой положения оборудования, в помещении ускорителя.

Необходимо отметить, что при створных измерениях опорная линия может быть задана коллимированным световым пучком, а для регистрации положения энергетической оси пучка использованы фотоэлектрические датчики дифференциального типа. Оптическая схема такого датчика показана на рис. 5.45. Световой пучок, задающий опорную линию, попадает на светоделительную призму (оптический нож) 4 и разделяется на два пучка, каждый из которых проходит конденсоры 3 и 5 и попадает на фотодиоды 2 и 6. Сигналы с выхода фотодиодов после усиления и обработки в электронном блоке 7 поступают на регистрирующий прибор, по показаниям которого определяют величину смещения точки относительно створа, задаваемого световым пучком.

Дифференциальный фотоэлектрический датчик позволяет выполнять измерения относительно энергетической оси светового пучка, генерируемого лазером или другим источником излучения, с точностью 12 мкм в диапазоне ±5 мм. Рассмотренные методы измерений деформаций с помощью лазеров применимы в основном на объектах, имеющих линейную форму.

Иногда строят сооружения, очертания которых могут значительно отступать от линейных, например, кольцевые ускорители, радиотелескопы, арочные плотины и т. д. В работе [57] для измерения деформации сооружений, имеющих нелинейную конфигурацию, было предложено использовать лазерную систему на основе лучевода, позволяющую измерять как высотные, так и поперечные смещения точек. Эта система (рис. 5.46) состоит из лазера 1, линзового лучевода 2 и фотоэлементов 3. Линзовый лучевод представляет собой периодическую последовательность линз, расположенных на определенном расстоянии друг от друга. Линзы лучевода жестко скреплены с исследуемыми точками 5 объекта.

Лазерный пучок последовательно фокусируется линзами лучевода и отклоняется в нужном направлении. Угол отклонения ε луча зависит от величины смещения h оси пучка относительно центра линзы и фокусного расстояния f линзы: $\varepsilon = h/f$.

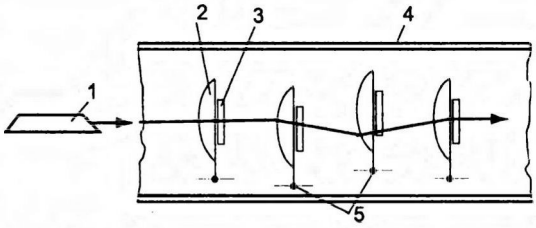


Рис. 5.46. Схема линзового лучевода
1 – лазер; 2 – линзовый лучевод; 3 – фотоприемник; 4 – труба; 5 – исследуемые точки

При смещении какой-либо линзы пучок, направляемый ею на последующую линзу, также смещается. Величины таких смещений фиксируются фотоприемниками, скрепленными с линзами, либо видеокамерами. При анализе положения точек необходимо дифференцировать их смещения и смещения лазерного пучка, вызванные смещением предыдущих линз или лазера.

Приборы для измерения осадок и сдвигов сооружений

Деформация сооружения по высоте чаще всего проявляется в виде неравномерной осадки разных его частей. Для измерения осадок сооружений используются следующие методы: 1) геометрическое нивелирование, 2) гидростатическое нивелирование, 3) тригонометрическое нивелирование, 4) микронивелирование. Наиболее распространенным методом изучения осадок является геометрическое нивелирование, так как оно обеспечивает высокую точность и достаточную оперативность измерений. При этом способе используется несложное и недорогое оборудование, и в целом он характеризуется сравнительно небольшими экономическими затратами. Как правило, для выполнения работ используется нивелир Н-05 и инварные рейки. Часто для этих целей используют самоустанавливающиеся нивелиры либо цифровые нивелиры, предназначенные для выполнения нивелирования I и II кл. Для наблюдений осадок методом геометрического нивелирования в испытуемом сооружении закладывают осадочные марки, располагая их в местах ожидаемых деформаций внизу сооружения: возле осадочных и температурных швов, по углам отдельных секций, на кольцах статоров генераторов и т.п. Количество циклов наблюдений за осадками в строительный период определяется по признаку роста нагрузки на основание.

Обычно первый цикл нивелирования производят после возведения фундамента или после нагрузки, составляющей 25 % полного веса сооружения. Последующие циклы нивелирования производят в зависимости от нагрузки. Далее нивелирование производится ежегодно, пока осадки не стабилизируются до величины 1–2 мм в год. Средняя квадратическая определения отметок точек из геометрического нивелирования обычно составляет 1 мм. Если нивелировать короткими лучами, метод геометрического нивелирования позволяет определить взаимное поло-

жение по высоте двух точек, расположенных на расстоянии 10—15 м, со средней квадратической ошибкой 0,02—0,05 мм. Взаимное положение точек, удаленных на несколько сот метров, определяется со средней квадратической ошибкой порядка 0,1—0,2 мм. При этом особенно жесткие требования выдвигаются к соблюдению равенства плеч, чтобы обеспечить четкое изображение задней и передней рейки при одном и том же неизменном положении фокусирующей линзы. По абсолютной величине неравенство плеч не должно быть более 10 см.

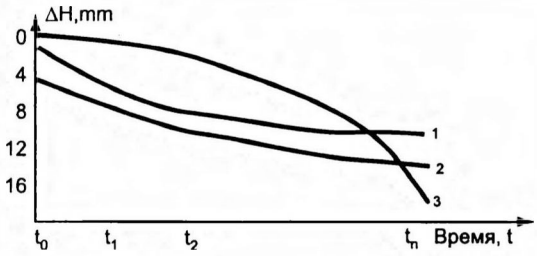


Рис. 5.47. График осадок марок

Обработка результатов нивелирования заключается в уравнивании нивелирных ходов и сравнении отметок одноименных марок с течением времени. По результатам нивелирования составляется график осадок марок (рис. 5.47), на котором по горизонтали откладывается время наблюдений t, по вертикали — отметка H марки или осадка ΔH от условного нуля.

Кривые 1 и 2 имеют плавный затухающий ход, что характеризует стабилизацию (затухание) осадок. Увеличивающийся со временем наклон кривой осадки (кривая 3) указывает на прогрессирующую деформацию данного сооружения.

Заключение о допустимости имеющих место деформаций получают сравнением фактических деформаций с проектными.

С помощью обычных геодезических приборов для геометрического нивелирования можно определять положение точки только в дискретные моменты времени. Преимущество лазерных приборов — возможности полной автоматизации процесса измерений с непрерывной регистрацией результатов.

Для этой цели используют комплект аппаратуры, в который входит лазерный нивелир с самоустанавливающейся линией визирования (лазерным пучком, задающим линию или плоскость), нивелирные рейки с фотоэлементами, включенными в полярную схему. Фотоприемное устройство отслеживает положение лазерного пучка. При неравномерном освещении фотоэлементов вырабатывается управляющее напряжение, которое подается на электродвигатель. Электродвигатель перемещает фотоэлементы вдоль рейки до тех пор, пока управляющее напряжение не станет равным нулю, что соответствует одинаковой освещенности фотоэлементов. Результаты измерений регистрирует запоминающее устройство. Таким образом, запоминающее устройство непрерывно записывает вертикальные перемещения контролируемой точки. Как показали исследования, стабильность

горизонтального положения лазерного пучка составляет 0,3–0,5″ при наклоне прибора до 15′.

Для этих же целей используются цифровые нивелиры, которые также позволяют автоматизировать процесс наблюдений за деформациями. Однако геометрическое нивелирование трудно реализовать при отсутствии прямой видимости между станцией и наблюдаемой точкой, а также в условиях, где пространство ограничено. В значительной степени от указанных недостатков свободен метод гидростатического нивелирования. К тому же метод гидростатического нивелирования обеспечивает иногда и более высокую точность измерений, чем геометрическое нивелирование, и позволяет в то же время создать автоматизированные стационарные гидростатические системы с дистанционным съемом информации. Разработанные стационарные гидростатические системы с дистанционным съемом информации имеют длину в несколько сотен метров, часто располагаются на ломаном профиле и обеспечивают определение превышений со средней квадратической ошибкой порядка 0,05–0,1 мм. В связи с этим для непрерывного наблюдения за осадками фундаментов, вертикальными смещениями подкрановых путей и подобных сооружений значительной протяженности целесообразно использовать стационарную гидростатическую систему, которая, в отличие от переносных шланговых нивелиров, может состоять не только из двух, но из большего количества водомерных сосудов (см. 3.4). Так например, для изучения деформаций Красноярской плотины была использована стационарная электроконтактная гидростатическая система, которая была оборудована вдоль плотины в потерне, имеющей ломаный профиль по высоте, и в семи поперечных потернах. В продольной потерне общей длиной 795 м, разделенной на 10 участков, были установлены самостоятельные гидростатические системы, связь между которыми осуществлялась через пары перекрывающихся марок, осадки которых считаются одинаковыми. Гидростатические системы, расположенные в поперечных потернах, связывались с гидростатическими системами крайних участков продольной потерны и привязывались к фундаментальным реперам высотной основы высокоточным геометрическим нивелированием. Точность передачи высоты по всей гидростатической системе характеризуется средней квадратической ошибкой 0,1 мм.



Рис. 5.48. Видеодоатчик и сосуд гидростатической системы

В последнее время создана видеоизмерительная гидростатическая система с дистанционным съемом информации [20–26], пред-

назначенная для измерения взаимных положений заданных горизонтов (рис. 5.48).

Работа системы, как и большинства гидростатических систем, основана на принципе сообщающихся сосудов, уровень жидкости в которых измеряется с помощью видеоуровнемеров, которые представляют собой видеодатчик на основе ПЗС-матрицы. ПЗС-матрица формирует видеосигнал, содержащий изображения визирных целей, отраженных от измеряемого уровня жидкости. Компьютерная обработка видеосигналов видеодатчиков, установленных на сосудах видеоизмерительной гидростатической системы, осуществляется по специальной программе.

Видеоизмерительная гидростатическая система (ВГС) предназначена для измерения взаимных высотных положений заданных горизонтов и имеет следующие основные технические характеристики:

Диапазон измерений	100 мм
Средняя квадратическая погрешность измерения уровня жидкости в сосуде ВГС, не более,	0,01 мм

Тригонометрическое нивелирование позволяет определять осадки сооружения в точках, расположенных на существенно разных высотах в труднодоступных местах, и уступает по точности измерений геометрическому и гидростатическому. Тригонометрическое нивелирование используют при наблюдениях за зданиями и башнями, плотинами, при производстве нивелирования через препятствия.

При измерении вертикального угла с точностью 0,4–1″ и длиной визирного луча до 100 м можно определять отметки точек с ошибкой 0,5–1 мм. К тому же на коротких расстояниях существенно уменьшается влияние вертикальной рефракции. Для ослабления влияния рефракции целесообразно вести наблюдения в пасмурную погоду либо в такое время дня, когда температурная стратификация атмосферы близка к безразличной.

Микронивелирование используется при выполнении наблюдений за высотным положением близкорасположенных точек (порядка 1–1,5 м) металлических конструкций либо направляющих, а также при монтаже технологического оборудования. При достаточной простоте процесса измерений обеспечивается высокая точность измерений порядка 0,01 мм, т. е. высокая надежность получаемых результатов.

Для микронивелирования используются приборы отечественного и зарубежного производства с ценой деления цилиндрического уровня 5–10″. В отдельных видах конструкций используются электронные уровни с ценой деления от 4 до 20″ на 20 мм.

Стереофотограмметрическая съемка позволяет определять сразу 3 координаты исследуемых точек. Для коротких расстояний она обеспечивает точность несколько мм, но весьма трудоемка, так как значительный объем времени затрачивается на проявление и обработку стереопар с помощью дополнительного оборудования. Возможности

такой съемки значительно расширились с появлением лазерных сканеров, которые практически заменили фототеодолитную съемку, используемую для этих целей.

В последние годы для исследования деформаций все большее распространение получает спутниковая аппаратура.

Например, в работе [87] сообщается об использовании спутникового оборудования для определения деформаций плотин Новосибирской и Саяно-Шушенской ГЭС. Отмечается, что в этом случае опорные пункты могут быть расположены на значительном расстоянии (до нескольких километров) от деформационных знаков за пределами зоны возможных деформаций без существенного изменения точности результатов. При этом точность определения приращения координат между исходными и определяемыми пунктами характеризуется величиной порядка 10^{-7}, о качестве измерений можно судить не только по внутренней сходимости определенных дальностей, но и по невязкам в координатах определяемых пунктов.

Аналогичные работы были выполнены на р. Койна в Индии, где проводились спутниковые наблюдения за деформациями дамбы в течение нескольких лет [180]. При этом изучались движения земной коры, которые вызывают изменения в относительном местоположении пунктов, расположенных на самой дамбе или около. Из-за местных движений земной коры возникают значительные переменные усилия и напряжения, развитые в структуре. Это может вызвать не только деформации плотины, но и ее разрушение. На величину деформаций также оказывают влияние такие факторы, как тип материалов строительства, сила ветра, изменения температур, усадка почв и колебания из-за движения транспорта. Для изучения деформаций была создана сеть GPS-станций, включающая 34 пункта в районе дамбы Койна. Наблюдаемые точки были расположены как на осевой линии дамбы (шесть точек), так и вдоль линии разлома (восемь точек), четыре опорных пункта и два ориентирных – вне зоны деформаций, а остальные пункты были связаны с дамбой. Наблюдения на выбранных пунктах выполнялись двухчастотными геодезическими GPS-приемниками на протяжении нескольких лет, начиная с 2000 г. Каждый сеанс наблюдений продолжался 6–8 часов с интервалом в 15 сек. и маской возвышения 15 градусов. Данные накапливались с декабря 2000 года, в предмуссонный период (фаза отлива) и в период постмуссоный, когда наблюдалась максимальная нагрузка воды (фаза прилива). Изменения в координатах GPS-пунктов характеризовали общую глобальную деформацию, состоящую из двух компонентов: деформации тектонической Индийской плиты и локальных деформаций. Так как дамба Койна находится на одной и той же тектонической плите, что и пункт международной станции IGS в Индийском Институте Науки (IIS) в г. Бангалор, то для исключения деформаций Индийской плиты использовались координаты этого пункта, расположенного



Рис. 5.49. График локальных деформаций дамбы, полученный в результате обработки данных GPS-наблюдений за период с декабря 2000 г. по апрель 2004 г. [180]

в Индийском океане. Затем для получения параметров деформаций дамбы из параметров полученной глобальной деформации (изменений в координатах GPS-пунктов) исключались деформации Индийской плиты. На рис. 5.49 приведен график локальных деформаций дамбы, полученный в результате обработки данных GPS-наблюдений за период с декабря 2000 г. по апрель 2004 г.

Как видно из графика, в периоды 1, 2, 4, 5 и 7 появляются отрицательные деформации, что соответствует периоду, когда наблюдался большой уровень воды. При уменьшении давления воды на дамбу происходит смещение дамбы в сторону отлива. Это наблюдалось в 3 и 6 периоды, когда внезапное уменьшение давления воды в течение фазы спада снижает нагрузку на структуру, таким образом, вызывая искривление основания дамбы, в результате чего все тело дамбы наклоняется или вращается, вызывая смещение вершины дамбы в сторону отлива. В Койне более ранние исследования показали, что отклонение дамбы постепенно увеличивается при уровне воды в 625 метров и быстро увеличивается при большем уровне воды.. Это явно указывает на то, что большая часть деформации дамбы происходит из-за переменного уровня воды что высокий уровень нагрузки и продолжительность задержания воды с высоким уровнем могут иметь следствием утечку воды; к линии разлома, ослабляя ее напряженность и прогрессивно понижая напряжения, которые могут вызвать землетрясение. Деформация дамбы во многом зависит именно от уровня воды, что, возможно, является основным фактором землетрясений в данном регионе.

Определение крена сооружений и динамических деформаций

Для определения крена сооружений в основном применяются приборы вертикального проектирования как оптические, так и лазерные. Оптические приборы не обеспечивают дистанционный съем информации, поэтому при долговременных наблюдениях за осадками сооружений целесообразно использовать лазерные приборы вертикального проектирования.

Задача, связанная с изучением горизонтальных деформаций, возникает, например, при наблюдении за смещением плотины в процессе заполнения водохранилища и эксплуатации ГЭС.

Традиционные методы контроля смещения плотины довольно трудоемки и не позволяют автоматизировать процесс измерений, а также не обеспечивают оперативность получения информации в текущий момент времени. Поэтому для автоматического контроля таких сооружений в некоторых случаях используются лазерные автоматические системы. В СССР была создана такая система, которая использовалась для контроля смещений арочной плотины Чиркейской ГЭС [111].

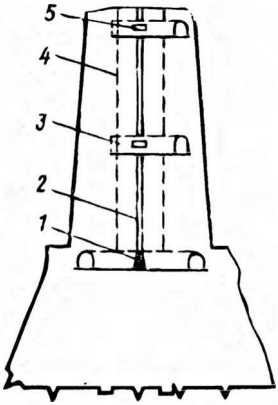


Рис. 5.50. Схема размещения излучателя и фотоприемников в теле арочной плотины Чиркейской ГЭС
1 – лазерный зенит-прибор; 2 – лазерный луч; 3, 5 – фотоприемники; 4 – труба в теле плотины

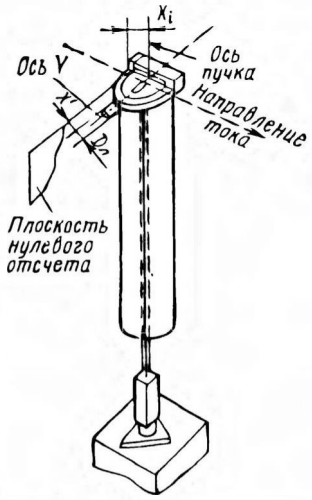


Рис. 5.51. Определение координат центра пучка

Лазерная автоматическая система (ЛАС) состоит из излучателя, в качестве которого используют лазерный центрир (ЛЗЦ), снабженный жидкостным компенсатором (см. 5.1). Он обеспечивает отвесное положение лазерного пучка, который является опорным. Пучок проходит через все тело плотины по специальной трубе (рис. 5.50). На десяти горизонтах в плотине установлены кассеты со специальными фотоприемниками, позволяющими измерять смещения плотины относительно пучка. Информация с фотоприемников поступает в блок управления обработки и записи информации. Измерение смещения плотины осуществляется относительно линии нулевого отсчета в направлении потока (рис. 5.51):

$$X_i = X_i' + D_п/2,$$

где X_i – координаты центра пучка, мм; X_i' – величина перемещения фотоэлемента от точки нулевого отсчета до момента засветки фотоэлемента лазерным пучком, мм; $D_п$ – поперечное сечение пучка, измеренное от начала до конца засветки фотоэлемента, мм. Для того чтобы определить величину смещения плотины в момент заполнения водохранилища, измеряют величину X_{0i} до заполнения водохранилища, тогда величина смещения плотины в данном сечении:

$\Delta X_i = X_i' - X_{0i}$.

Линейное смещение фотоэлемента осуществляется с помощью электродвигателя и винтовой пары, приводящей в движение каретку с фотоэлементом. Шаг винтовой пары составляет 8 мм; цена деления квантующего импульса – 0,1 мм. Линейное смещение каретки преобразуется в соответствующее число импульсов. При движении каретки импульсы поступают в процессор, работой которого управляют с помощью фотоэлемента.

Процессор выполняет операцию:

$X = A + B/2$,

где X, A и B – число импульсов, соответствующих координате X_i, смещению каретки от точки нулевого отсчета до границы пучка и поперечному сечению пучка.

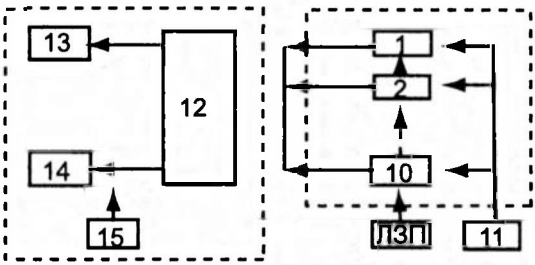


Рис. 5.52. Структурная схема ЛАС:
1-10 – фотоприемные устройства; 11 – блок питания; 12 – блок обработки информации и управления; 13 – цифровой индикатор; 14 – цифропечатающее устройство; 15 – блок питания

На рис. 5.52 показана структурная схема ЛАС. К выходу процессора подключены цифровой индикатор и цифропечатающее устройство. Цифровой индикатор служит для визуального контроля результатов измерений, цифропечатающее устройство – для непрерывной фиксации результатов измерений, а также номера опрашиваемого фотоприемного устройства.

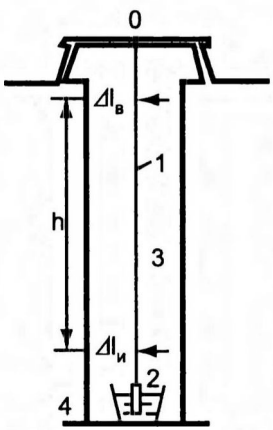


Рис. 5.53. Прямой отвес
1 – проволока; 2 – груз; 3 – шахта; 4 – основание

Включение ЛАС осуществляется с пульта управления. Программное устройство системы обеспечивает работу в непрерывном, циклическом и выборочном режимах. Время готовности системы к работе составляет 5 мин., время одного цикла измерений по всей высоте сооружения – 10 мин. Повторение каждого цикла измерений может осуществляться в пределах 0,5–4 ч. При непрерывном режиме работы производится последовательный опрос фотоприемных устройств с первого по десятый, и затем снова с первого и т.д. При выборочном режиме работы ЛАС можно измерять смещения на любом горизонте в произвольной последовательности.

Для одновременного определения сдвига и крена крупных сооружений находят применение прямые и обратные отвесы (рис. 5. 53 и рис. 5.54), положение которых определяют с помощью видеокоординатомера (рис. 5.55).

Прямой отвес (рис. 5.53) представляет собою проволоку 1 с грузом 2 на конце, подвешиваемую в шахте или скважине 3. Проволока под действием груза натягивается и располагается отвесно. Чтобы гасить колебания отвеса, груз 2 опускают в сосуд с жидкостью.

Обратный отвес (рис. 5.54) также представляет собой проволоку 1, но закрепленную якорем 0 в нижней части наблюдаемого сооружения. К верхнему концу проволоки с помощью мягкой вставки 6, прикреплен оголовок, включающий кольцевой поплавок 2, плавающий в кольцевой ванне 3, наполненной жидкостью, и штифт 4, соосный с проволокой. Под действием подъемной силы поплавка (порядка 50–60 кг) проволока натягивается, занимая отвесное положение, и служит той базовой линией, относительно которой производятся все измерения. Над оголовком расположен координатный столик, скрепленный с исследуемым сооружением. Определение координат штифта 4 относительно координатного столика осуществляется с помощью видеокоординатографа. Изменение его положения свидетельствует о деформации верхней части сооружения (при условии, что точка 0 неподвижная). Для определения крена измеряют расстояния $\Delta l_в$ вверху, $\Delta l_и$ внизу между нитью отвеса и поверяемым сооружением. Изменение разности $(\Delta l_в - \Delta l_и)$ с течением времени свидетельствует о продолжающемся крене сооружения. Величина крена ε может быть определена из соотношения:

$$\varepsilon = (\Delta l_в - \Delta l_и)/h,$$

где h – расстояние по вертикали между контролируемыми верхней и нижней точками.

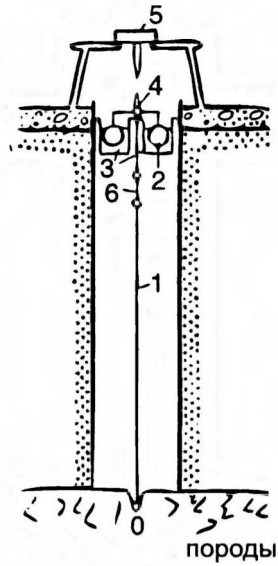


Рис. 5.54. Обратный отвес
0 – якорь отвеса; 1 – проволока; 2 – поплавок; 3 – ванная; 4 – штифт; 5 – устройство для натяжения отвеса; 6 – мягкая вставка

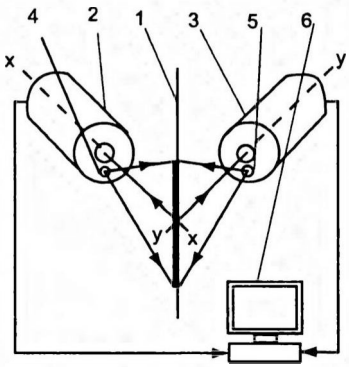


Рис. 5.55. Видеокоординатомер
1 – струна отвеса; 2, 3 – видеодатчики; 4, 5 – светодиоды для подсветки струны отвеса; 6 – компьютер; X, У – координатные оси

Для определения сдвига основания 4 нужно определить координаты точки 0 подвеса проволоки, а также координаты в нижней и верхних точках, как показано на рис. 5.54.

Тогда изменение координат точки 0 со временем и изменение разности ($\Delta l_в - \Delta l_и$) дают информацию для вычисления сдвига основания. Прямые отвесы могут иметь длину не более 40—50 м, т. к. из-за дрожания проволоки в воздушном потоке и раскачивания отвеса, даже если он помещен, как это показано на рис. 5.54, в сосуд с жидкостью, возможны значительные ошибки.

Точность, даваемая прямым отвесом, находится в пределах 2—7 мм и зависит также от типа координатомера, технические характеристики которого приведены в табл. 5.9.

Сдвиг и крен сооружения могут быть определены значительно точнее с помощью обратного отвеса системы М.С. Муравьева (рис. 5.55). Обратный отвес состоит из проволоки 1, якорь которой О закреплен в недеформируемых коренных породах в основании сооружения.

Таблица 5.9

Технические характеристики координатомеров

Технические характеристики	Оптический координатомер	Видеокоординатомер		
		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Диапазон измерений	80	–	–	–
– по шкале, мм – без шкалы, мм	4	±20	±23	±20
Минимальное расстояние до струны, мм	170	140	1000	140
Цена деления шкалы, мм	1	–	–	–
Цена деления верньера, мм	0,1	–	–	–
Время измерений, мин.	10	2 (100 измерений)	2 (100 измерений)	1 (100 измерений)
СКП по одной координате измерения, мм	0,1–0,2	0,04	0,02	0,02
Глубина резкости	0,6	±20	160	±20

Деформации сооружения могут также измеряться путем измерения координат проволоки на любом горизонте, где имеется доступ к струне. Наибольшая точность при измерении струны отвеса достигается при использовании видеокоординатомеров [14, 28], которые позволяют не только повысить точность и скорость, но и автоматизировать процесс измерений (см. табл. 5.9).

Как уже отмечалось, наиболее значительные динамические деформации наблюдаются у сооружений башенного типа, характерным представителем которых является Останкинская телебашня. Изучение динамических деформаций Останкинской телебашни началось с момента ее пуска в эксплуатацию. Башня, имеющая высоту 533 м, представляет собой железобетонный ствол 1, на который установлена стальная антенна 2 (рис. 5.56). Антенна имеет телескопический контур и состоит из отдельных цилиндрических труб переменного диаметра. Ствол состоит из нижнего опорного конуса А, имеющего 10 опор, конусообразной средней части Б и цилиндрической верхней части В. Масса башни – 55 тыс. т.

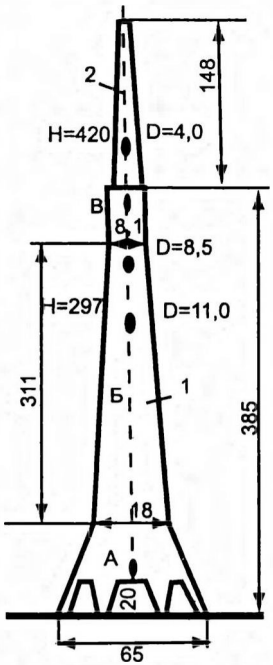


Рис. 5.56. Схема Останкинской телебашни

Вследствие ветровой нагрузки башня отклоняется от вертикали по кривой, близкой к квадратной параболе. Так как направление и сила ветра хаотически меняются, то башня колеблется с некоторой амплитудой и частотой, зависящей от высоты определяемой точки и скорости ветра. Кроме того, из-за нагрева солнцем и рассеянной солнечной радиации происходит температурная деформация ствола башни, что ведет к ее изгибу в сторону, противоположную нагреву.

При оценке динамических деформаций необходимо определить амплитуду колебаний относительно вертикали для точек, находящихся на различной высоте. На первом этапе исследований деформаций башни наблюдения на марки выполнялись одновременно двумя высокоточными теодолитами, установленными на точках, находящихся на двух взаимно перпендикулярных осях на расстоянии 300 м и 600 м от башни [108]. Марки для наблюдений были установлены на телебашне на высотах 20, 237, 385, 420 и 520 метров. Средняя квадратическая ошибка определения координат марки составляла 15 мм. Как показали исследования, максимальное отклонение телебашни от вертикали на высоте 530 м, вызываемое ветровыми нагрузками и тепловыми деформациями, составляет 2,5 м. Так как этот процесс наблюдений достаточно сложен и трудоемок, позднее была разработана оптоэлектронная система, позволяющая автоматизировать процесс измерений [108].

В настоящее время для этой цели используются видеосистемы, основанные на видеоизмерениях, которые обрабатываются с помощью компьютеров, причем структура и алгоритм обработки могут гибко меняться в зависимости от решаемой задачи и требуемых параметров измерений.

Для геодинамического мониторинга сооружений также может быть использована автоматизированная система с использованием видеодатчиков. [14, 15, 21, 23, 25, 26]. Это устройство содержит видеощелемеры, лазерные датчики смещений и видеоизмерительную гидростатическую систему. На работу устройства в целом не влияет количество датчиков, которое практически не ограничено и определяется только характером решаемых задач. Задание параметров измерений, сбор, обработка, архивирование и документирование полученных данных осуществляются с помощью центрального компьютера с использованием прикладного программного обеспечения.

5.5. Подземные и подводные съемки с помощью современных приборов

Трубокабелеискатели (трассоискатели)

К инженерным подземным коммуникациям (ИПК) относятся: кабели электро- и телефонных линий, трубопроводы для транспортировки воды, горючих жидкостей, газа, воздуха и т.п. Съемка ИПК производится в плане и по высоте. Съемке подлежат все наземные сооружения – колодцы, камеры, подстанции, водокачки и другие подземные прокладки. Наиболее точно съемка ИПК ведется в открытых траншеях.

Особенность строительства ИПК – неравномерность продвига этого вида работ, обусловленная сложностью их организации, возможностью выполнения по частям в неудобное для топографических съемок время, например, зимой, в темное время суток и т. д. Вследствие этого исполнительная топографическая съемка непосредственно уложенных труб или кабелей не всегда возможна и выполняется часто после засыпки траншей. Обычные методы съемки предусматривают в этих случаях рытье шурфов на характерных точках ИПК с последующими инструментальными промерами подземного объекта. Такие работы весьма трудоемки, особенно в условиях заводских территорий или города, когда они часто сопряжены со вскрытием дорожного покрытия. В настоящее время при съемках и инвентаризации ИПК применяются индукционные методы выноса на поверхность и определения глубины заложения объекта приборами, получившими общее название трубокабелеискателей (ТКИ) или трассоискателей, без вскрытия траншей. Вынесенная на поверхность и отмеченная на ней ИПК в дальнейшем снимается топогеодезическими методами. Вокруг проводника с электрическим током образуется магнитное поле. Силовые линии его представляют собой концентрические окружности, лежащие в плоскости, нормальной к проводнику. Центры окружностей находятся на линии тока. Если электрический ток создает магнитное поле, то имеет место обратная сторона явления – магнитное поле создает электрический ток.

Один из очень важных законов — закон электромагнитной индукции, открытый в 1831 г. Фарадеем, — состоит в том, что при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего контур замкнутого

проводника, в последнем возникает электрический ток, существующий в течение всего процесса изменения магнитного потока.

Электродвижущую силу (ЭДС), возникающую в незамкнутом проводнике при пересечении им силовых линий магнитного поля, именуют электродвижущей силой индукции. Поэтому закон электромагнитной индукции можно сформулировать следующим образом: при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего контур проводника, в нем возникает электродвижущая сила индукции.

Электрический ток, вызванный ЭДС индукции, называют индукционным. По закону Ленца, он имеет такое направление, при котором его магнитное поле препятствует изменению магнитного поля, которое вызвало этот ток. ЭДС индукции определяется по формуле:

$$E = d\Phi/dt,$$

где Ф – магнитный поток. Отношение $d\Phi/dt$ называется скорстью изменения магнитного потока. В системе СИ ЭДС индукции выражается в вольтах, поток индукции – в веберах, время – в секундах. ЭДС индукции в незамкнутом проводнике определяется числом силовых линий, пересекаемых проводником в единицу времени. Явление электромагнитной индукции широко используется в приборах поиска (трубокабелеискателях). Если по достаточно длинному проводнику пропустить переменный ток, то вокруг него образуется переменное электромагнитное поле, силовые линии которого имеют в первом приближении вид концентрических окружностей. В антенне, внесенной в электромагнитное поле, наводится ЭДС, пропорциональная эффективности антенны и интенсивности поля.

В том случае, когда в одной траншее заложен не один трубопровод или кабель, а два и более, то генератор переменного тока рекомендуется подключать поочередно к каждому инженерному сооружению в отдельности. Это даст положительные результаты в том случае, когда подземные инженерные сооружения между собой не соединены, а такие случаи на практике редки. Если инженерные сооружения между собой соединены, то будет происходить сложение электромагнитных полей, образующихся вокруг смежных инженерных сооружений. Суммарная ЭДС и контуры графического изображения в виде силовых линий будут отличаться от ЭДС и силовых линий, которые были вызваны в отдельности каждым подземным трубопроводом или кабелем. Это явление (наложение силовых линий от смежных трубопроводов) часто не учитывается при поиске каждого трубопровода в отдельности и, естественно, порождает существенные погрешности. Точность определения оси одиночно уложенного трубопровода или кабеля в плане трубокабелеискателем составляет ±5–10 см, а глубины заложения – около 10 %.

В настоящее время чаще всего применяют активные – контактные – методы съемки ИПК: энергия вводится в проводник от специального генератора, и создается искусственное электромагнитное поле. Роль проводника играет металлический трубопровод, кабель или его

защитная свинцовая оболочка. В керамических трубопроводах, а также в металлических, но не имеющих между собой электрического контакта, проводником может служить жидкость, если она заполняет их без разрыва и является электропроводной. Часто электропроводность воды усиливают искусственно, подсыпая в нее соль. В некоторых трубопроводах, изготовленных из изоляционных материалов, в процессе строительства заранее протягивается провод именно на случай поиска ИПК индукционными методами.

Контактные методы съемки ИПК дают наибольшую точность определения координат объекта. Применение пассивных (бесконтактных) методов может иметь место в двух случаях: обнаружение кабелей, находящихся под напряжением, за счет создания силового электромагнитного поля проходящим током, и обнаружение электропроводящих предметов за счет поля, наводимого блуждающими токами. В последнем случае метод менее эффективен из-за слабости сигналов и в связи с этим более низкой точности определения координат предмета, при этом дальность действия прибора ограничена несколькими метрами.

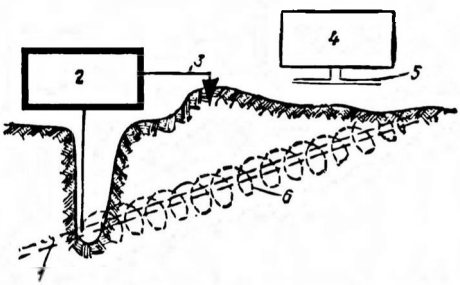


Рис. 5.57. Схема контактного трубокабелеискателя

1 – инженерные подземные коммуникации; 2 – генератор звуковой частоты; 3 – заземлитель; 4 – приемник; 5 – антенна; 6 – схематическое изображение электромагнитного поля

Пассивные методы применяются для отыскания засыпанных землей или снегом колодцев, отыскания металлических перекрытий в старых зданиях при их инвентаризации и т.п. Схема контактного трассоискателя показана на рис. 5.57. Генератор звуковой частоты 2 подключается своими точками к ИПК1 и заземлителю 3, забиваемому в землю на расстоянии 5–20 м от оси ИПК. Приемник 4 с направленной антенной (рамочной, кольцевой, стержневой) переносится по направлению оси ИПК.

Электродвижущая сила в антенне зависит от взаимного расположения электромагнитных волн и плоскости рамки антенны. Если антенну расположить горизонтально (рис. 5.58, а), то наведенная в ней ЭДС будет зависеть от взаимного расположения антенны и ИПК. В положении 1, когда плоскость рамки антенны расположена горизонтально, симметрично относительно вертикальной плоскости, проходящей через ИПК, антенну пересекает наименьшее количество силовых линий поля, и ЭДС будет минимальной. В положениях 2 и 3 ЭДС будет большей. На рис. 5.58, а ЭДС отождествлена с кривой силы звука или визуального сигнала, отображаемого на экране прибора. Это свойство антенны используется для выноса (проектирования на поверхность земли) оси ИПК.

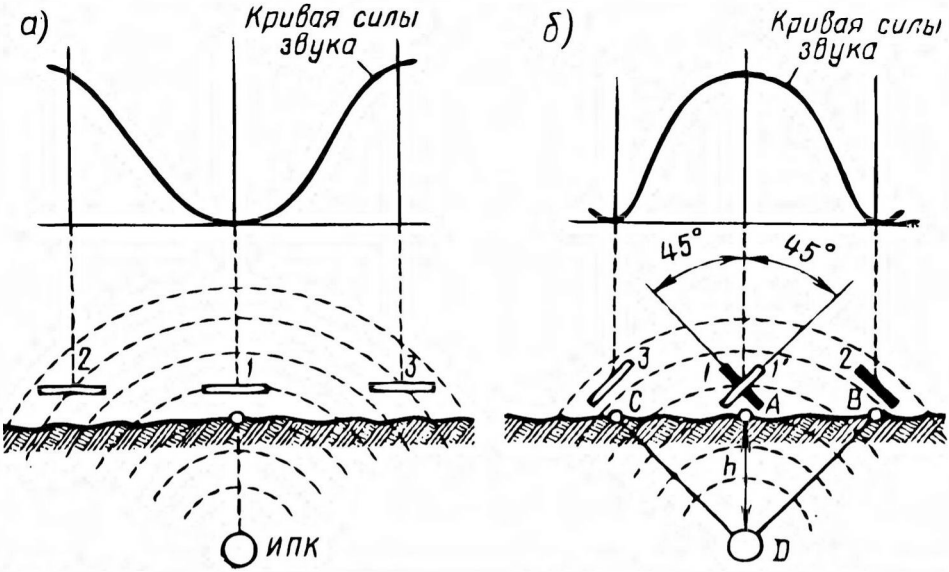


Рис. 5.58. Определение планового положения (а) и глубины заложения (б) инженерных подземных коммуникаций

Оператор, держа антенну горизонтально и покачивая ее из стороны в сторону, слушает звуковой тон и наблюдает на экране величину сигнала. При минимуме интенсивности звука, что соответствует положению 1 антенны, проецирует на землю середину рамки антенны, отмечая это колышком на земле или мелом (при работе над асфальтом). Далее оператор движется в направлении оси ИПК, придерживаясь все время минимального звукового сигнала, и отмечает все точки поворотов ИПК, ответвлений, закруглений и т.п. Для определения глубины h (рис. 5.58, б) заложения ИПК оператор наклоняет рамку антенны на угол 45° по отношению к горизонту (положение 1) и, начиная от колышка, забитого над осью ИПК (точка А), передвигает антенну перпендикулярно к оси до получения минимума звукового сигнала, что будет иметь место, когда силовые линии поля скользят по плоскости антенны (положение 2).

Фиксируют точку В минимума звука. Повернув антенну на 90°, находят таким же образом точку С с другой стороны оси ИПК. Измеряют рулеткой расстояние СВ. Так как силовые линии имеют, как правило, вид концентрических окружностей, то полученный треугольник CDB является равнобедренным, прямоугольным в точке D. Высота треугольника h = 0,5СВ. При наличии в одной траншее нескольких ИПК для раздельной их съемки генератор трассоискателя поочередно подключают к каждой из ИПК в отдельности. Точность определения местоположения ИПК зависит от помех, возникающих от посторонних источников тока, а также от тока генератора трассоискателя. Особенно сильны помехи на участках с большим количеством пересекающихся

кабелей и трубопроводов, а также при работе на увлажненных грунтах. Помехи ослабляются при подключении генератора к ИПК в двух и более точках.

Если в траншее уложено несколько трубопроводов, то при сильном сигнале генератора наблюдается искажение сигнала за счет наводок ЭДС от подключенного трубопровода на неподключенные. Кроме того, когда инженерные сооружения между собой соединены, то будет происходить сложение электромагнитных полей, образующихся вокруг смежных инженерных сооружений. Суммарная ЭДС и контуры графического изображения в виде силовых линий будут отличаться от ЭДС и силовых линий, которые были вызваны в отдельности каждым подземным трубопроводом или кабелем. Сигналы искажаются в местах разветвления ИПК из-за интерференции электромагнитных волн в местах ответвлений трубопроводов, если они имеют существенно разные диаметры и т.п. Это явление (наложение силовых линий от смежных трубопроводов) часто не учитывается при поиске каждого трубопровода в отдельности и, естественно, порождает существенные погрешности. Для более точного определения глубины заложения ИПК антенну следует держать возможно ближе к поверхности земли. Точность определений можно повысить путем изменения мощности генератора, особенно если рядом с определяемой линией расположены смежные трубопроводы или кабели. В общем случае для трассоискателя небольшой мощности (до 30–35 Вт) точность определения объекта составляет в плане ±(5–10) см, а глубины заложения – около 10 % и могут быть оценены по эмпирической формуле:

$$m_h \sim m_s \sim 0{,}5\,(0{,}1h + d),$$

где m_h и m_s – средние квадратические ошибки измерений по высоте и в плане; h – глубина заложения ИПК; d – диаметр ИПК. Например, при h = 2 м и d – 30 см имеем $m_s = m_h = 0{,}5\,(0{,}1 \times 200 + 30) = \pm 25$ см.

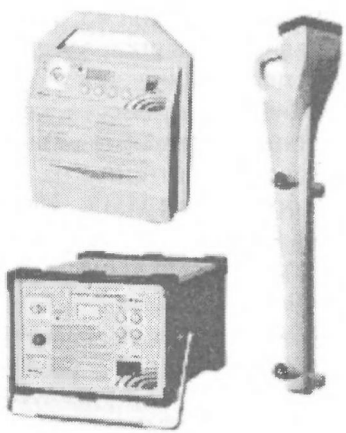


Рис. 5.59. Трассоискатель «Абрис»

Современные трассоискатели (рис. 5.59), например, «Абрис» производства ЗАО «Сфинкс» (Россия), используют три частотных диапазона измерительных токов, а так же «активный» или «пассивный» режимы работы, что позволяет отличать энергетические кабели от других коммуникаций. Это оборудование предназначено в основном для точного определения местоположения и глубины залегания подземных коммуникаций (силовых и сигнальных кабелей, трубопроводов и пр.). При работе в пассивном режиме кабели и металлические трубопроводы обнаруживаются без применения ге-

нератора. Этот режим работы применяется для зондирования почвы с целью предотвращения случайных повреждений коммуникаций при земляных работах. В то же время использование всех трех частотных диапазонов повышает точность измерений при локации трасс, а также позволяет проводить диагностику состояния инженерных коммуникаций, предотвращать их повреждения при ведении земляных работ.

Комплект трассоискателя включает в себя приемник, рамку индуктивной связи, кабель для гальванического подключения, штырь заземления, адаптер 220 В и сумку для транспортировки. Приемник обеспечивает измерение силы тока, цифровое измерение глубины залегания трассы, определение оси трассы методами минимума и максимума и отклонения от нее. Локация трассы в пассивном режиме производится на частотах 50 Гц, 100 Гц и в диапазоне 12–17 кГц (радио), в активном режиме – на частотах 1450 и 9820 Гц.

Во время работы может быть использован генератор мощностью до 24 Вт, что обеспечивает стабильную работу приемника на максимальном удалении, либо генератор мощностью до 12 Вт, который обеспечивает хорошую мобильность.

Оба генератора имеют автоматическое согласование с нагрузкой и допускают все существующие типы подключения к кабелю. В комплект поставки входят: генератор ТГ-24.2 (24 Вт) или ТГ-12.2 (12 Вт), питание комплектов осуществляется от аккумуляторных батарей.

Модель трассоискателя «Абрис» предназначена для точного определения местоположения и глубины залегания подземных коммуникаций (силовых и сигнальных кабелей, трубопроводов водоснабжения, канализации, газоснабжения и любых других протяженных металлических предметов), быстрого и надежного обследования территорий перед проведением земляных работ, определения повреждений при необходимости проведения аварийных работ.

Технические характеристики:

К трассоискателю поставляются 2 вида генераторов:	ТГ8-2, ТГ24-3
Выходная частота	9,82 кГц, 145 кГц
Дальность возможного поиска	не менее 2000 м с генератором ТГ8-2 и не менее 3000 м с генератором ТГ24-3
Глубина поиска	не менее 6 метров
Выходная мощность	3–8 Вт (ТГ8-2), 0,5–24 Вт (ТГ24-3)
Питание и от аккум. а\м.	автономное от аккум.-заряд от 220 Вольт
Время непрерывной работы	не менее 8 часов
Температура	–20–+50 °С
Комплект	генератор, приемник, зарядное устройство, кабель к а\м и сети
Документация	на русском языке
Гарантия	2 года

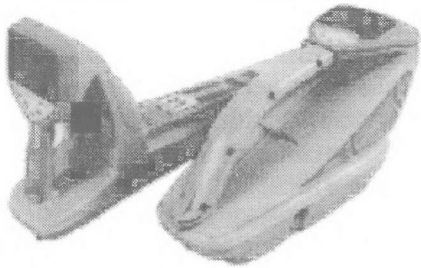


Рис. 5.60. Внешний вид трассоискателя RD 4000RX фирмы Radiodetection (Англия)

Одним из наиболее распространенных приборов, используемых для съемки подземных коммуникаций, является трассоискатель RD 4000RX (рис. 5.60), выпускаемый фирмой Radiodetection (Англия). Он предназначен для поиска любых подземных труб и кабелей и обладает широким набором различных функций, упрощающих поиск и повышающих точность. Прибор имеет дисплей с яркой подсветкой и высокоточным индикатором уровня сигнала.

Он может работать в «пассивном» и «активном» режиме на трех частотных диапазонах. Использование трех частотных диапазонов измерительных токов, а также «активного» или «пассивного» режимов работы позволяет отличать энергетические кабели от других коммуникаций. Точность определения глубины залегания: 5 % – до 3 м и 10 % – до 5 м. Габариты: 690 мм x 280 мм x 123 мм. Диапазон рабочих температур от –20 до +50 °С, масса 2,8 кг. Режимы работы прибора представлены в табл. 5.10.

Таблица 5.10

Режимы работы трассоискателя RD 4000RX

Режим	частота	Чувствительность на глубине 1 м	Хорошие условия локации	Плохие условия локации
Power	40 Hz – 700 Hz	7,5 mA	3 м	2 м
Radio	14 kHz – 26 kHz	20 mA	2 м	1 м
Активные частоты	8 kHz – 100 kHz	25 mA	5 м	2 м
Активные частоты	100 kHz – 200 kHz	50 mA	3 м	2 м
Current direction	до 1024 kHz	250mA	5 м	2 м
Lf	до 2048 kHz	250 mA	5 м	2 м
GPS (поиск маркеров)	100 kHz или 200 kHz	10 mA	3 м	2 м
Поиск повреждений изоляции	8 Hz и 8,192 kHz	2 mA 1 м 100 mA	3 м	2 м

Георадары

Для поиска подземных коммуникаций помимо трассоискателей используются также георадары, которые обладают более широкими возможностями [170, 171]. Георадар – прибор, предназначенный для решения широкого спектра задач при работе в районах с неблагоприятным климатом, где есть необходимость оперативного мониторинга среды, получения разрезов грунта, не требующих бурения или раскопок.

Метод георадиолокации (англ. «Ground Penetrating Radar» или GPR) – подповерхностного зондирования – основан на изучении распространения радиоволн в исследуемой среде. Работа георадиолокационного прибора – георадара – основана на излучении импульсов электромагнитных волн и регистрации сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различие по диэлектрической проницаемости (рис. 5.61). Во время работы георадара передающей антенной прибора излучаются сверхкороткие электромагнитные импульсы (длительностью в единицы и доли наносекунды), имеющие 1,0–1,5 периода квазигармонического сигнала и достаточно широкий спектр излучения. Изменение частоты зондирования, которая зависит от типа выбранной антенны, приводит к изменению глубины зондирования и разрешающей способности. Границами раздела по диэлектрической проницаемости в исследуемых средах, например, являются контакт между сухими и влагонасыщенными грунтами (уровень грунтовых вод), контакты между породами различного литологического состава, между породой и материалом искусственного сооружения, между мерзлыми и талыми грунтами и т. д. (рис. 5.62).

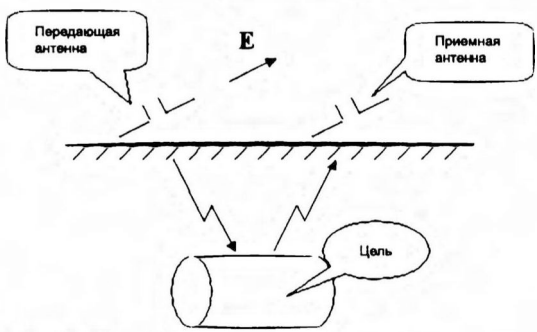


Рис. 5.61. Принцип работы георадара

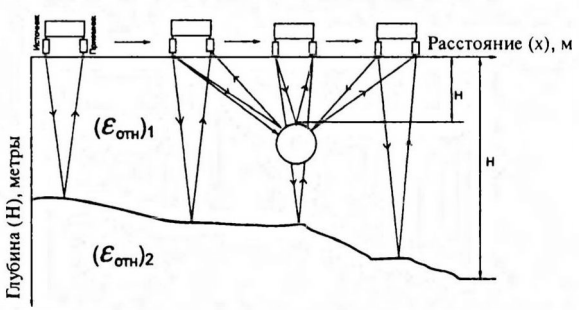


Рис. 5.62. Схема образования дифрагированной электромагнитной волны от трубы, залегающей на глубине H, и волны, отраженной от границы раздела сред с разными диэлектрическими проницаемостями (глубинный разрез)

Для формирования зондирующих импульсов используется набор сменных антенных модулей.

Генерация сигналов осуществляется ударным методом возбуждения путем перепада напряжения. При этом импульс отражается от находящихся в исследуемой среде предметов или неоднородностей среды, имеющих отличную от среды диэлектрическую проницаемость или проводимость, принимается приемной антенной, после усиления преобразуется в цифровой вид при помощи аналого-цифрового преобразователя и запоминается для последующей обработки. Задержка отраженных сигналов зависит от глубины залегания H объектов и скорости распространения волны v в среде, связанной с ее диэлектрической проницаемостью ε.

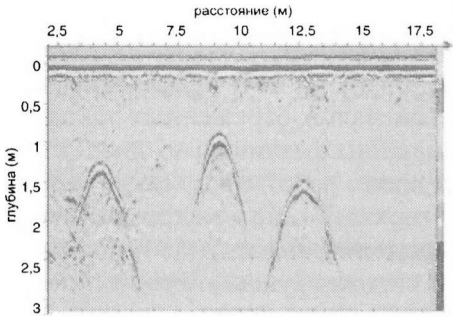


Рис. 5.63 [169] Обнаружение трех металлических труб, зарытых в землю на глубину 1 -1,5 метра.
Каждая труба дает траекторный сигнал в виде гиперболы, вершина которой соответствует ее местоположению. Частота зондирования – 900 МГц. Место зондирования – около г. Даугавпилс, Латвия

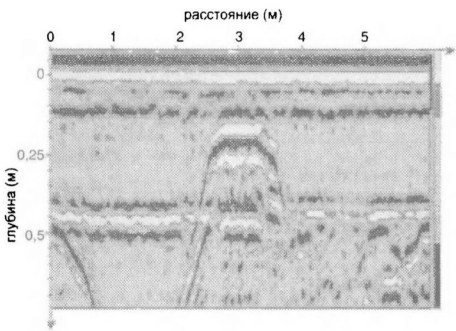


Рис. 5. 64. [169] Зондирование кирпичной стены.
В середине профиля четко виден сигнал от встроенного в стену металлического шкафа. Частота зондирования – 2 ГГц. Место зондирования – г. Рига, Латвия.

$$\tau = 2H/v,$$

где $v = c/\sqrt{\varepsilon}$.

Важными характеристиками георадарных исследований являются глубинность и разрешающая способность. Глубинностью считается максимальная глубина залегания лоцируемого объекта, отраженная волна от которого может быть зафиксирована прибором, а разрешающей способностью называют минимальное расстояние, на котором могут быть различимы два отражающих объекта или их детали. Глубинность оценивается величиной глубины обнаружения плоской границы с коэффициентом отражения 1. В результате георадиолокационного зондирования получается радарограмма – массив отраженных импульсов с различными амплитудами по каждому шагу зондирования, записанный в файл. Эти данные могут быть также представлены графически в виде разреза (георадиолокационного профиля), который называют радарограммой. Для получения

радарограммы производят запись отраженных сигналов, последовательно перемещая прибор по поверхности исследуемой среды в непрерывном или дискретном режиме. (рис. 5.63 – 5.65). Полученные данные могут быть записаны на жесткий диск компьютера для дальнейшего использования (обработка, распечатка на принтере, интерпретация и т. д.).

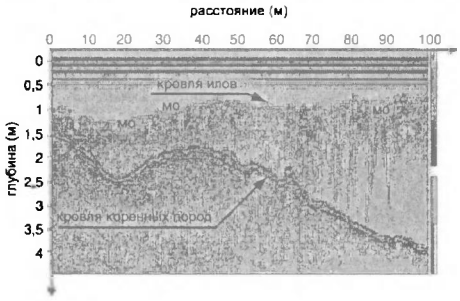


Рис. 5.65. [169] Профилирование озера со дна пластиковой лодки
Использовалась 500 МГц экранированная антенна. В иле видны металлические объекты (на рисунке обозначены МО)

С помощью георадара помимо поиска инженерных подземных коммуникаций могут быть выполнены геологическиие, гидрогеологические и инженерно-геологические задачи, включающие картирование поверхности коренных пород под рыхлыми осадками (песка, глины, мерзлых грунтов торфа и т.д.), определены уровни грунтовых вод и границы между слоями с различной степенью водонасыщения, толщина льда и снега, оценены мощности водного слоя и выполнено картирование поддонных отложений. При проведении инженерно-геодезических работ георадар обычно применяется для поиска и обследования локальных объектов, имеющих небольшую глубину залегания (0,2–15 метров), например, для поиска подземных полостей; обследования мостов и дорожного покрытия; картирования коммуникаций (трубопроводов и кабелей); обследования бетонных конструкций, засоленных почв, загрязненных почв и т. п. участков разреза с нарушенным естественным залеганием грунта – рекультивированных земель, засыпанных выемок, а также для профилирования дна водоемов и поддонных отложений, и других схожих задач.

Георадары также используются при проведении горных исследований, гляциологии, археологии, в судебной медицине, для картирования уровня грунтовых вод. В геологии – для построения геологических разрезов, определения положения уровня грунтовых вод, толщины льда, глубины и профиля дна рек и озер, границ распространения полезных ископаемых в карьерах, положения карстовых воронок и пустот. В транспортном строительстве – для определения толщины конструктивных слоев дорожной одежды и качества уплотнения дорожно-строительных материалов, изыскания карьеров дорожно-строительных материалов, оценки оснований под транспортные сооружения, определения глубины промерзания в грунтовых массивах и дорожных конструкциях, со-

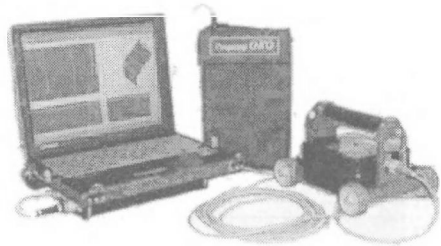


Рис. 5.66. Комплект георадара серии «ОКО», выпускаемый в РФ фирмой «ЛОГИС»

держания влаги в грунте земляного полотна и подстилающих грунтовых основаниях, эрозии грунтов на участках мостовых переходов. В промышленном и гражданском строительстве – для определения качества и состояния бетонных конструкций (мостов, зданий и т. д.), состояния дамб и плотин, выявления оползневых зон, месторасположения инженерных сетей (металлических и пластиковых труб, кабелей и других объектов коммунального хозяйства). В археологии – для нахождения археологических объектов и границы их распространения. При экологических исследованиях – для оценки загрязнения почв, обнаружения утечек из нефте- и водопроводов, мест захоронения экологически опасных отходов. Георадары используются также и силовыми структурами для обнаружения мин, контрабандных вложений и т. п.

При выполнении съемок эти приборы могут устанавливаться на наземном, воздушном или водном транспорте. Ведущим российским производителем георадаров является подмосковная фирма «ЛОГИС», которая разрабатывает и производит георадары серии «ОКО», работающие в диапазоне температур от –20 °С до +40 °С (рис. 5.66).

В комплект георадара входят компьютер типа Notebook, закрепленный на специальной платформе, набор антенн для различных частот зондирования, программное обеспечение и различные аксессуары. Notebook выполняет качественную обработку полевого материала. Применение сменных Flash-карт позволяет оперативно архивировать информацию большого объема. Использование датчика перемещений двух типов и пакета программного обеспечения GeoScan-32 обеспечивает получение площадных массивов данных с последующей обработкой и визуализацией этой информации в трехмерном виде. Набор антенн дает возможность зондирования в большом диапазоне частот (25-1700 МГц) в зависимости от решаемой задачи. При повышении частоты зондирования уменьшается глубина зондирования, но повышается разрешающая способность. Ниже приведена таблица зависимости разрешающей способности, мертвой зоны и глубины зондирования от от применяемой антенны георадара «ОКО» для зондируемого грунта с относительной диэлектрической проницаемостью равной 4 и удельным затуханием 1–2 дБ/метр. Данные, приведенные в табл. 5.11, приблизительны и в значительной степени зависят от параметров зондируемой среды.

Таблица 5. 11

Зависимость разрешающей способности, мертвой зоны и глубины зондирования от применяемой антенны георадара «ОКО»

Антенные блоки	Характеристика георадара		
	Центральная частота, МГц	Глубина зондирования, м	Разрешение (макс.), м
АБ-150	25–100	30	0,5–2,0
АБ-250	250	12	0,35
АБ-400	400	8	0,25
АБ-500	500	5	0,15
АБ-700	700	4	0,12
АБ-900	900	3	0,1
АБ-1200	1200	2,1	0,07
АБ-1700	1700	0,51	0,05 0,03

Георадар «ОКО-М1» может комплектоваться радиомодемом, что позволяет производить дистанционное управление прибором и осуществлять съем информации с антенных блоков в радиусе до 100 м. Это удобно при проведении площадных георадарных съемок. С георадаром можно работать при низких температурах, если оператора с Notebook разместить в кабине автомобиля.

Малый вес (до 3кг) и высокую мобильность имеет георадар «Лоза», который позволяет выполнять обследование в самых сложных грунтах (влажных глинах) и проводить предпроектные изыскания для создания комплексной модели рельефа с элементами геологии и гидрологии планируемой трассы. Этот прибор выпускается в различных модификациях (табл. 5.12) во ВНИИСМИ (г. Химки).

Использование георадара при изысканиях дорог позволяет снизить объемы земляных работ до 40 % за счет рационального прокладывания трассы. Технические решения, используемые в «Лозе», позволяют получать на экране радарограммы, практически лишенные паразитных колебаний («звона» аппаратуры), что дает возможность без компьютерной обработки решать многие задачи прямо на месте. Георадар может быть укомплектован недорогим дополнительным оборудованием, позволяющим проводить измерения в закрытых помещениях (подвалах, котлованах), а также в зоне воздействия объектов сильного радио- и электромагнитного излучения. Для георадара «Лоза» разработан батискаф для приемной и передающих антенн с помощью которого возмож-

но проводить зондирование со дна пресноводных водоемов и моря на глубинах до 10 метров.

Таблица 5.12

Модификации георадара «Лоза» и результаты его испытания

Тип георадара	Атенные блоки	Основные характеристики	Отличительные особенности
2	«Лоза-М» и «Лоза-1»	Бинарная регистрация времени. Временная шкала 256 нсек., 512 нсек. Трехуровневая оценка регистрируемого сигнала (пороги 0±16).	Профессиональный поисковый прибор.
2	«Лоза-В»	Режим работы «Лоза-М» плюс регистрация волновых форм и временная шкала 1024 нсек.	Профессиональный поисковый прибор с расширенными возможностями. Максимальная развертка – 1024 нсек. Регистрация в волновых формах.
3	«Лоза-Н»		
4	«Лоза-К»	Режимы работы «Лоза-М», «Лоза-У» и построение геологического разреза в реальном времени с отображением свойств слоев грунта оттенками цветовой гаммы на цветном ЖКИ.	Профессиональный поисковый прибор с возможностью первичной обработки сигналов (обнаружение границ отражающих слоев и их классификация).

Результаты испытаний геофизических параметров георадара

№	Характеристика однородной среды	Проводимость среды, см/м	Глубина зондирования, м	Разрешение по глубине, м
1	Сухой песок	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	1–50	0,1
2	Влажный песок	$6{,}9 \cdot 10^{-3}$	25	0,1
3	Глина	$2{,}1 \cdot 10^{-7}$	8	0,1

Реальные возможности георадаров «Лоза»:

- работа на сухих грунтах (песок, галька) на глубину 30 метров;
- работа в вечной мерзлоте на глубину до 20–30 метров;
- возможность определения истинной глубины с помощью построения годографа;
- работа в реальных грунтах Подмосковья и средней полосы России (влажные глины и суглинки) на глубину 8–10 метров.

Использование георадара позволяет снизить объемы земляных работ до 40 % за счет рационального прокладывания трассы.

Из зарубежных георадаров для полевых работ используется, например, «Зонд-12», выпускаемый фирмой «Radar Inc». (рис. 5.67). Георадар «Зонд-12е» – цифровой, портативный, переносимый одним оператором радар подповерхностного зондирования, предназначенный для решения широкого спектра задач, где есть необходимость неразрушающего и оперативного мониторинга среды. Во время зондирования оператор в реальном времени получает информацию на дисплее в виде т.н. радиолокационного профиля (радарограммы). Одновременно данные записываются на магнитный диск для дальнейшей работы (обработка, распечатка на принтере, интерпретация и т. д.).

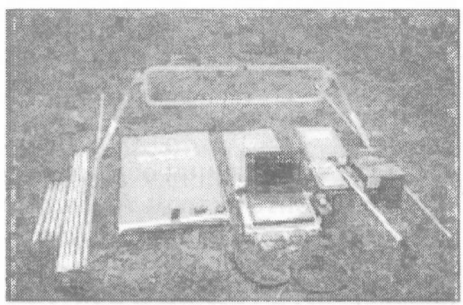


Рис. 5.67. Георадар «Зонд-12»

В георадаре «Зонд-12» применяются экранированные антенны, которые выполнены в пылебрызгозащищенном варианте и допускают кратковременное погружение в воду. Поверхностные антенны имеют подложку из фторопласта, чрезвычайно устойчивого к стиранию. Применение той или иной антенны определяется решаемой при зондировании задачей. Повышение частоты зондирования приводит к улучшению разрешающей способности, но при этом уменьшается глубина зондирования; и наоборот, снижением частоты можно добиться увеличения глубины зондирования, но за это придется заплатить ухудшением разрешающей способности. Кроме того, со снижением частоты увеличивается зона начальной нечувствительности (т. н. мертвая зона) георадара.

Достаточно компактным устройством является георадар «Easy Locator» фирмы Mala geoscience, который позволяет представить полную картину залегания различных подземных коммуникаций. С помощью «Easy Locator» возможно детектировать как металлические, так и неметаллические материалы, включая пластмассы, бетон, керамику, асфальт, композиты и другие материалы, а также точно определять положение кабелей, труб, кабельной канализации, каналов или глубину до подстилающей породы.

«Easy Locator» может быть использован в коммунальных службах, при проведении строительных работ в урбанизированных районах и на промышленных объектах. Его использование позволяет снизить риск и задержку выполнения различных проектов. В этом приборе используются две антенны с различной величиной отношения разрешение/глу-

бина, которые могут быть настроены на различные типы грунтов, для обеспечения максимальной эффективности локации.

«Easy Locator» имеет цветной дисплей и экран высокой яркости. В комплект прибора входят: блок управления с монитором, антенна для малой или средней глубины и тележка. Антенны компактны и взаимозаменяемы. «Мелкая» антенна служит для точного обнаружения относительно мелких целей в хороших почвах, а «средняя» антенна — для обнаружения более крупных объектов на большей глубине. Монитор может быть трех типов, а также полноразмерный цветной дисплей TFT с улучшенной видимостью даже при сильном солнечном свете с разрешением 640x480 пикселей. Монитор имеет удобный и простой интерфейс, прочную конструкцию, пылевлагонепроницаемое исполнение (IP 67) и может противостоять дождю, снегу и пыли. Базовая система может использоваться с тремя видами монитора и двумя типами антенн для «мелкой» или «средней» глубины зондирования. Рабочая температура — от –20 до +50° С. Тележка имеет возможность регулирования высоты.

Эхолоты

При выполнении обследований дна на водных акваториях, связанных со строительством трубопроводов, резервуаров и др. инженерных сооружений, необходимо выполнять крупномасштабную съемку дна либо проводить промеры профилей. Помимо этого, можно выделить большое число направлений, где могут быть использованы гидроакустические приборы:

- поиск различных предметов под водой;
- инженерный, научный и экологический мониторинг;
- обеспечение безопасности судоходства;
- геодезические изыскания, предваряющие строительство любых подводных объектов;
- рыболовство и разведение морепродуктов;
- туризм, дайвинг, подводная археология;
- картографическая деятельность.

Все многообразие направлений использлвания базируется на ограниченном числе гидроакустических методов:

- двухмерное сканирование поверхности дна;
- трехмерное сканирование поверхности дна;
- сканирование толщи дна;
- сканирование толщи воды.

Применение для этих целей аппартуры, работающей в световом и радиодиапазоне, сильно ограничено в силу физических законов распространения электро- и радиоволн в воде. Обычно зона визуального наблюдения для видеокамер и видеоустройств не превышает 10 метров. В то же время гидроакустические приборы могут работать на всех глубинах мирового океана и позволяют получать изображения подводного

пространства с разрешением в несколько сантиметров. На сегодняшний день существует огромное количество гидроакустических систем различных производителей, которые отличаются различной технологией и материалом изготовления приемо-передающих элементов. Качество и достоверность полученной с помощью гидроакустических приборов информации зависит как от технических параметров самого гидроакустического прибора, так и от условий распространения звуковых волн в воде. Скорость распространения звука в воде – величина непостоянная и изменяется в пределах от 1420 до 1550 м/с; это обусловлено изменением солености, температуры и гидростатического давления различных слоев воды. Расположение излучателя и приемной антенны по отношению к поверхности воды или морскому дну без учета направления излучения акустических сигналов может вызвать так называемые зоны «поверхностной или донной засветки» на мониторах гидроакустических приборов. Кроме того, на работу гидроакустических приборов оказывают влияние посторонние шумы от двигателя судна и фоновый морской шум.

При акустической съемке определение расстояния L до лоцируемого объекта производится по времени прохождения звука от излучателя до объекта:

$$L = \Delta t c/2,$$

где Δt – время прохождения зондирующего сигнала до цели и обратно. В жидкостях скорость распространения звуковой волны изменяется в значительных пределах — от 557 до 2000 м/с. В пресной воде она составляет ~1500 м/с, а в морской 1420–1540 м/с. Для пресной воды скорость может быть вычислена по формуле:

$$c = \sqrt{\frac{x}{\rho}},$$

где x – модуль объемной упругости воды; ρ – плотность воды. В морской воде скорость звука существенно зависит от концентрации солей. Ее можно вычислить по формуле:

$$c = c_0 + aq,$$

где c_0 – скорость звука в пресной воде; a – концентрационный градиент скорости, выражающий отношение $\Delta c/\Delta q$ и соответствующее приращению скорости на 1 % изменения концентраций солей q. Скорость распространения звуковых волн зависит также температуры и давления. При увеличении температуры воды 1 °С скорость увеличивается на 2,5 м/с, а увеличение давления на 1 атм. вызывает увеличение скорости на ~0,2 м/с.

В чистой воде затухание звука небольшое, но значительно увеличивается при наличии в ней пузырьков воздуха и взвешенных частиц. Воздушные пузырьки образуются за счет разложения органических ве-

ществ. Например, наличие воздушных пузырьков в количестве 0,01 % от объема воды в два раза снижает ее упругость и на 40 % – скорость распространения звука в ней, которая еще зависит и от размеров воздушных пузырьков, а наличие взвешенных частиц почти линейно увеличивает поглощение звуковых колебаний. При значительном количестве взвешенных частиц в воде практически невозможна звуколокация из-за значительного ослабления сигнала. Изменения поглощения и скорости распространения звука находятся в сложной зависимости от концентрации взвешенных частиц, их размеров и структуры.

Скорость распространения и затухание звуковых колебаний в донных отложениях влияют на точность звуколокации. Эти параметры во многом определяются составом пород, формирующим донные отложения. Теоретическую оценку искажений результатов измерений, вызванную этими параметрами, выполнить довольно сложно, и поэтому данные, полученные опытным путем, являются более надежными.

На мощность отраженного сигнала значительное влияние оказывает коэффициент отражения, так как на практике редко встречается отражение звука с малыми потерями. Например, от границы вода-воздух он равен 0,99993, а от границы раздела вода-ил – 0,2. Коэффициенты, выражающие зависимости между параметрами волн падающей и проходящей сквозь границу раздела сред, именуются соответственно коэффициентом прозрачности по интенсивности D_J и коэффициентом по давлению D_p.

$$D_J = 4W_2W_1/(W_2 + W_1)^2;\ D_p = 2W_2/(W_2 + W_1),$$

где W_2 и W_1 – акустическое сопротивление первой и второй среды, $W = \rho c$ (ρ – плотность среды, c – скорость звука).

При отражении от неровных, шероховатых поверхностей происходит диффузное рассеяние звука, т. е. звук рассеивается по разным направлениям, причем интенсивность и направленность рассеяния зависят от формы неровностей, их размеров по сравнению с длиной звуковой волны и от других факторов.

Дифракция звуковых волн – это способность огибать препятствия, встречающиеся на их пути. Если размер препятствий превышает длину звуковой волны, то за препятствиями появляется область звуковой тени. Интерференция звуковых волн – это их взаимодействие, при котором происходит явление сложения независимых волн. Интенсивность результирующего звука зависит от разности фаз складывающихся колебаний. От этого амплитуда колебания усиливается или ослабевает. При интерференции могут образоваться стоячие волны. Это возможно в том случае, когда в ограниченном отраженном пространстве укладывается целое число волн ($\lambda/2$, λ, $n\lambda/2$, где n – целое число). При отражении звука может возникать послезвучание или реверберация.

Время распространения звука в среде (воде, донных отложениях) можно определять фазовым, частотным, импульсным способами либо

их сочетаниями. Исследуя отражения звуковых волн от донных отложений, получают топографическую поверхность дна водоема и т. д.

При фазовом способе излучатель непрерывно посылает звуковой сигнал одной и той же частоты, который, отразившись от объекта локации, возвращается обратно. Разность фаз (модуляция) между излучаемым и принимаемым сигналами будет пропорциональна расстоянию до лоцируемой поверхности. Для решения неоднозначности модуляцию осуществляют на двух или трех частотах. По сдвигу фаз и частоте определяют сдвиг во времени и расстояние, соответствующие этому сдвигу. Точность определения расстояний этим способом составляет ±0,2 мм, но реализовать этот метод довольно сложно.

Сущность частотного способа состоит в том, что на излучатель посылают сигнал, модулированный по частоте, линейно изменяемой от некоторого начального значения до максимального, а потом вновь возвращаемой к первоначальному своему значению. Цикл повторяется. Сравнивая частоты на приеме и излучении, определяют время прохождения зондирующего сигнала. Погрешности в определении расстояний этим способом – около 2 %. Использовать его можно для локации поверхностей, не имеющих ступенчатых неровностей со скачкообразно меняющейся дальностью.

Импульсный способ основан на импульсной модуляции излучаемого сигнала, при которой расстояние определяется по времени прохождения импульса до цели и обратно. Погрешности в определении расстояний посредством этого способа составляют от 0,5 до 3,0 %. Этот способ измерения расстояний положен в основу наиболее распространенного гидроакустического прибора – эхолота.

В эхолотах обычно используется импульсный метод измерения расстояний либо частотный. На рис. 5.68 показана структурная схема эхолота. Сигналы, вырабатываемые генератором 1, поступают на вход излучателя (антенну) 2, который генерирует акустические сигналы и излучает их в воду.

Зондирующий сигнал, отразившись от объекта, принимается антенной 3, усиливается усилителем 4 и подается на блок слухового контроля 5 и индикатор или регистратор 6. В эхолотах могут быть использованы электромагнитные, электродинамические, пьезоэлектрические и магнитострикционные преобразователи, работающие на одной или

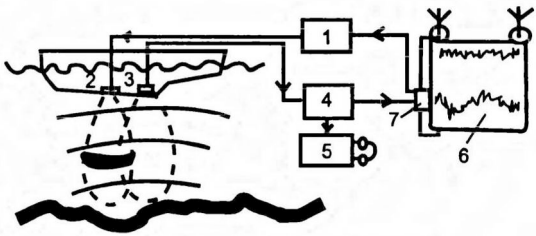


Рис. 5.68. Структурная схема эхолота
1 – генератор; 2 – передающая антенна; 3 – приемная антенна; 4 – усилитель; 5 – блок контроля; 6 – регистратор

нескольких резонансных частотах. При эхолокации применяют более высокие звуковые и ультразвуковые частоты, поэтому преобразование электрической энергии в акустическую и обратно производится с помощью электростатических, пьезоэлектрических и магнитострикционных преобразователей.

В процессе акустических измерений неизбежны погрешности, порождаемые искажением электрического поля. К ним в первую очередь относятся технические погрешности, связанные с неточностью измерения времени и скорости распространения акустических волн. В среднем инструментальная погрешность эхолота составляет 1—2,5 %. Судно или лодка должны обладать достаточной устойчивостью, чтобы вертикальные перемещения судна, вследствие качки, минимально влияли на точность измерения глубин. Из-за угловой расходимости звуковой сигнал облучает не одну точку лоцируемого объекта, а какую-то площадь. При этом возникает разность хода отраженных лучей от разных точек площадки, и поэтому измеренное расстояние не соответствует расстоянию по оси эхолота, что вызывает дополнительную погрешность. В целом суммарная погрешность, вызываемая разностью хода звуковых волн при отражении от объекта, составляет ~1 %.

Гидроакустические приборы можно разделить на несколько групп:

- эхолоты;
- гидролокаторы кругового и секторного обзора;
- гидролокаторы бокового обзора;
- профилографы морского дна;
- гидроакустические системы позиционирования.

Обычно при выполнении съемочных работ на территории водоемов используются эхолоты и гидролокаторы бокового обзора. Самыми распространенными и достаточно простыми гидроакустическими приборами, используемыми для съемки дна, являются одночастотные однолучевые эхолоты. Наряду с развитием однолучевых эхолотов в настоящее время разработан новый класс приборов — многолучевые эхолоты, которые позволяют получать значение глубин не только под килем судна, но и сбоку от него в полосе до 3—4 глубин. Эти эхолоты находят широкое применение при построения карт глубин для решения таких задач, как обеспечение безопасности плавания, выбора трасс прокладки кабелей связи, трубопроводов, при проведении изыскательских работ при строительстве портовых сооружений и т. д. В этих акустических системах с помощью специальной конструкции приемо-передающей антенны и дальнейшей обработки эхо-сигналов получается много (более сотни) узких лучей, расположенных веером по направлению вбок от линии движения носителя антенн (как правило, это само судно).

Для определения планового положения излучателя в момент съемки (т. е. для привязки точек съемки) часто используют спутниковую аппаратуру, которая может работать в режимах DGPS RTCM или RTK.

Для высокоточных измерений используют режим RTK, который позволяет также учитывать в реальном времени изменения уровня воды. Как уже отмечалось, в большинстве случаев для выполнения съемок используют одночастотный однолучевой эхолот, который портативен и быстро развертывается в рабочее положение. Более высокую производительность обеспечивают многолучевые и сканирующие эхолоты, которые более продуктивны и позволяют охватывать широкую полосу вдоль определяемого профиля. Сетка съемочных профилей создается для обеспечения полного покрытия снимаемого участка, так как морское дно не видно невооруженным глазом.

При съемке эхолотом измерение глубины осуществляется относительно уровня водной поверхности, отметка которой для внутренних водоемов меняется в зависимости от осадков. При работе в акватории моря, вследствие отливов и приливов, отметка уровня водной поверхности может изменяться на 10 м в течение 12 часов. Поэтому текущий уровень воды определяют относительно марки водомерного поста либо используют способ повторной съемки дна, то есть повторяют съемку через некоторое время, строят еще одну цифровую модель местности (ЦММ) и сравнивают ее с предыдущей ЦММ, построенной относительно того же исходного уровня. При работе спутниковой системы, установленной непосредственно на судне, в качестве основной системы навигации в режиме RTK автоматически учитываются изменения текущего уровня воды. При этом отпадает необходимость в установке берегового уровенного поста. Карты участка дна и другая информация, полученная при съемке, используется при работах по углублению дна, монтаже инженерных конструкций, строительстве трубопроводов, резервуаров и др. инженерных сооружений, исследованиях окружающей среды, мониторинга состояния подводных трубопроводов, для безопасной навигации и т.д. По результатам съемки заказчик может получить информацию в виде файла с трехмерными координатами (XYZ), карты глубин с нанесенными изобатами и в виде пространственнго 3D-изображения участка дна.

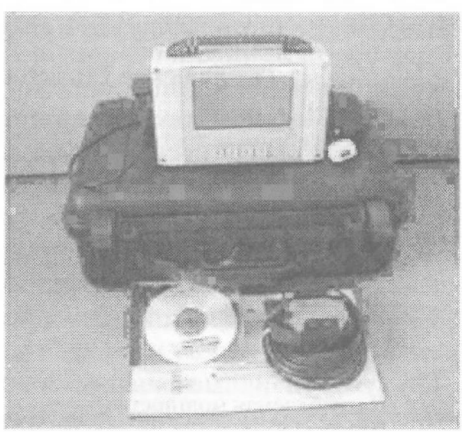


Рис. 5.69. Эхолот SonarLite, выпускаемый фирмой Ohmex Instruments (Англия)

Для этих работ обычно используют эхолоты SonarLite, которые производит фирма Ohmex Instruments (Англия) (рис. 5.69). Этот однолучевой эхолот предназначен для выполнения прибрежной съемки рек и водоемов

совместно с использованием тахеометров и GPS-приемников. Эхолот SonarLite разрабатывался для совместного использования с электронными тахеометрами и GPS оборудованием. Данные промеров интегрируются с топографическими данными. SonarLite имеет в комплекте внутренние аккумуляторные батареи, зарядное устройство, кабели передачи данных, внутреннее программное обеспечение для записи данных и программное обеспечение для последующей обработки данных съемки. Прибор может быть использован в качестве традиционного эхолота с выводом данных на встроенный серийный порт (RS232C) или как самостоятельная система с маркировкой данных по времени и сохранением результатов во внутренней памяти для последующей обработки. Эхолот обладает малыми потерями сигнала и обеспечивает получение высокоточного цифрового контура рельефа дна. Графический жидкокристаллический дисплей непрерывно отображает изменения данных совместно с текстовой информацией. Масштаб изображения на дисплее может быть увеличен или уменьшен простым нажатием клавиш на передней панели инструмента. В комплект эхолота входит водонепроницаемый транспортировочный кейс.

Этот прибор комбинирует в себе функции эхолота и накопителя. В дополнение к электронике брызгозащитный по стандарту IP65 кейс содержит аккумуляторные батареи, достаточные для работы в течение нескольких дней, и монохромный ЖК-дисплей. Излучатель объединяет в себе генератор звуковых импульсов, приемный усилитель и процессор цифровых сигналов (ПЦС). Он заключен в небольшой обтекаемый пластиковый корпус длиной менее 100 мм. При работе устройство потребляет около 0,35 Ватт от внутренних перезаряжаемых батарей или внешней 12 В батареи. Погрешность измерения глубины характеризуется средней квадратической ошибкой порядка 2 см. Данные измерений выводятся с интервалом раз в секунду.

Технические характеристики эхолота SonarLite

Частота	235 кГц
Угловая расходимость зондирующего сигнала	8–10°
Диапазон глубин	от 0,30 м до 75 м 0,025 м
Средняя квдратическая ошибка	2,5 см
Внутренняя память	512 Кб/20000 точек
Скорость вывода измерений	1 Гц
Дисплей	240x128 пикселей (110x70 мм) монохромный жидкокристаллический
Питание	12 В x 2 Ач
Потребляемая мощность	70 миллиампер – 120 ма
Продолжительность работы батарей	от 4 до 8 часов беспрерывной работы
Габариты	140 мм x 220 мм x 100 мм
Вес	2,5 кг

Эхолот SonarLite может импортировать данные о местоположении, собранные автоматическими и полуавтоматическими электронными тахеометрами, которые могут отслеживать призму, обычно закрепленную на лодке вертикально над излучателем. Эти данные содержат временные метки тахеометров, получаемые при регистрации. Временные метки используются совместно с временным интервалом SonarLite для объединения данных промеров глубин и местоположения. Так как отслеживается трехмерное положение призмы, то нет необходимости применять приливные или гидравлические градиентные поправки к данным. Система работает и с DGPS системами: эхолот может быть напрямую подключен к GPS-приемнику и сохранять данные в формате NMEA в своей памяти вместе с глубинами. В приливных областях система DGPS обычно используется совместно с ручными или с уровнемерными измерениями прилива, а значения высот по GPS игнорируются. К тому же из-за малой скорости лодок задержка дифференциальной поправки на больших расстояниях имеет малое влияние на допуски к общей точности определения координат.

Программное обеспечение Sonar2000 поставляется как составная часть комплекта SonarLite и предназначено для использования на ПК под ОС Windows 95/98, NT, 2000 или XP (только не для Win3.1x). Программное обеспечение позволяет импортировать широкий диапазон форматов файлов и выгружать данные из SonarLite. Файл может содержать следующие типы данных с временными метками:

- глубины – от низа излучателя до дна плюс заглубление излучателя;
- координаты – или координаты XYZ, или широта/долгота;
- временные метки – метки в данных, когда кнопка события была нажата;
- данные о приливе – высоту прилива по уровнемерным данным.

Каждый элемент данных хранится с упорядочиванием по времени с точностью до миллисекунды. Пропущенные данные линейно интерполируются по соседним элементам пропорционально времени. Программное обеспечение Sonar2000 позволяет пользователю графически редактировать и удалять данные точек любого типа, используя выделение мышью в любом из видов: план «Position» или профиль «Time Series» всего набора данных. Программа позволяет пользователю прямо преобразовывать данные из GPS в прямоугольные координаты, используя фиксированное UTM преобразование или определенное пользователем. Пользователь также может задать время и величины смещений любого из трех главных типов данных, позволяя компенсировать разность часов или смещений между эхолотом и, например, электронным тахеометром.

Обработанные данные хранятся совместно с любыми использованными поправками и смещениями как окончательные координаты,

глубины и уровень воды при съемке. Эти данные могут быть экспортированы в различные форматы, включая ASCII и DXF для импорта в другие программные продукты. Полная эхограмма может быть распечатана на том количестве страниц, которое требуется для используемого системного принтера под Windows. Также доступна клиентская версия ПО, которая позволяет просматривать сырые данные и выводить их на печать как необходимо, но неспособная редактировать или изменять их каким-либо образом.

Эхолот SonarLite прошел тест на совместимость с программными пакетами «Hypack» корпорации Coastal Oceanographics Inc., и ПО «Hydropro», поставляемым Trimble Navigation, а также тесты с DGPS системами, включая Leica, Trimble, Ashtech, Sercel, Garmin и Topcon [130, 131]. Программное обеспечение Sonar2000 может импортировать данные из электронных тахеометров Leica, Geotronics, Topcon и MDL. Уровнемерные данные могут быть напрямую введены из устройства TidaLite (то же семейство, что и SonarLite) или набраны в простом текстовом ASCII файле данных.

Гидролокаторы бокового обзора

Гидролокаторы бокового обзора (ГБО) предназначены для выполнения топографических и гидрографических съемок, для поиска объектов, находящихся на морском дне, и исследования рельефа дна для прокладки и обслуживания кабелей связи и трубопроводов. Такие съемки обычно выполняются во время строительных работ в портах и на причалах, при выносе в натуру для изучения донных отложений водохранилищ и внутренних водных транспортных путей, строительстве морских нефтяных платформ, а также для прокладки и контроля положения подводных трубопроводов.

При эксплуатации подводных участков нефте- и газопроводов необходимы регулярные технические инспекции для контроля состояния тела трубы и ее опор. Обычно подводные трубопроводы проложены прямо по дну или в мелких траншеях. Воздействие течений может приводить к эрозии дна и образованию больших участков провисания трубопровода, которые могут вызвать недопустимые поперечные нагрузки на тело трубы. Поэтому эксплуатация таких трубопроводов предусматривает регулярные технические инспекции. Такие обследования могут осуществляться либо визуально с помощью подводного аппарата или водолаза, либо с помощью гидролокатора бокового обзора (ГБО). Технология обследования подводных трубопроводов с использованием гидролокатора бокового обзора характеризуется высокой степенью автоматизации, информативностью, оперативностью и низкими трудозатратами по сравнению с традиционными способами, основанными на применении подводных аппаратов или водолазов. Поэтому

как средство уменьшения стоимости инспекций контроль с помощью гидролокатора бокового обзора весьма эффективен по трудозатратам и значительно быстрее, чем визуальный контроль с помощью подводного аппарата с видеокамерой. Благодаря автоматизации процедуры обработки изображений в реальном времени, возможно получение отчета непосредственно в ходе съемки без необходимости обработки данных на берегу после нее.

При проектировании и строительстве трубопроводов очень важна способность ГБО давать весьма подробную рельефную картину дна, а также обнаруживать препятствия. Поскольку мутная вода для акустического сигнала прозрачна, ГБО эффективен не только при строительстве и обследовании подводных трубопроводов и кабелей, но также и в ходе сооружения морских нефтяных платформ, портов и причалов.

Обычно ГБО представляет собой буксируемый подводный аппарат в форме торпеды с двумя приемо-передающими антеннами, установленными по правой и левой стороне аппарата. В некоторых случаях приемо-передающая антенна может быть установлена на борту судна. ГБО буксируется на расстоянии 30—50 метров от дна со скоростью не более 8 км/час.

При прокладке трубопроводов и кабелей связи ГБО буксируют на минимальной высоте от дна для получении максимально полной картины рельефа дна вдоль трассы. Буксируемое устройство как правило имеет хорошие гидродинамические свойства, что обусловливает высокую стабильность изображения, создаваемого ГБО. В том случае, когда ГБО установлен непосредственно на судне, получаемые изображения при качке могут быть искажены за счет смещения строк.

В основу действия ГБО заложен принцип поперечного сканирования поверхности дна узконаправленным акустическим лучом при перемещении излучателя вдоль трассы [11, 41]. ГБО способны давать весьма подробную рельефную картину дна (рис. 5.70).

Излучатель ГБО посылает ультразвуковой импульс из точки Р под острым углом к плоскости дна и затем принимает вернувшийся назад отраженный от дна сигнал, разворачивая его построчно на экране монитора или принтере. Благодаря поперечному сканированию акустическим лучом с частотой до 20 Гц и продольному движению ГБО, формируются отдельные строки и составляется изображение дна, похожее на телевизионное [37, 136, 182].

Из-за слабого затухания акустических волн в воде по сравнению со световыми полоса обзора акустической съемки значительно больше и может превышать 1 км, что зависит от физических свойств поверхности дна и предметов на нем. Гидролокатор бокового обзора синтезирует изображение, похожее на аэрофотосъемку, но только в ультразвуке. Именно при сканировании наклонными лучами создаются условия формирования акустической тени, образуемой возвышающимися над

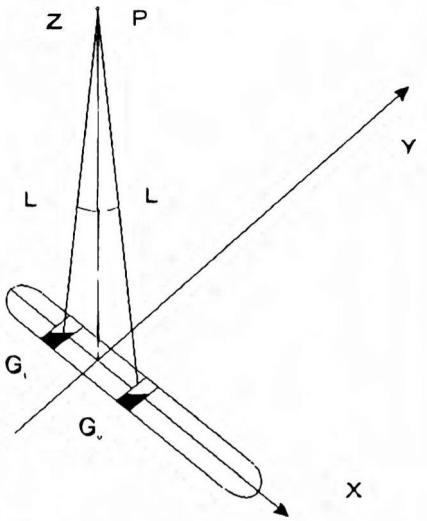


Рис. 5.70. Геометрия съемки дна гидролокационным комплексом бокового обзора

Ширина диаграммы направленности излучающей антенны вдоль оси X равна 40...60°, а вдоль оси У – порядка 1,5°

дном объектами. Тень помогает распознать эти объекты. Поэтому антенна ГБО должна находиться достаточно близко к дну, обычно на расстоянии от 2 до 50 метров. В центральной части изображения ГБО при «угле зрения», близком к прямому, принципиально присутствует «мертвая зона». Причина появления одного из таких эффектов поясняется на рис. 5.70, где показана геометрия съемки рельефа дна акустическим локатором бокового обзора с интерферометрической системой измерения углов прихода эхосигналов [37, 136]. Ось У связанной системы координат совпадает с направлением движения, а сканирование акустическим лучом происходит в координатной плоскости XZ. Координатная плоскость XY совпадает с плоскостью отражения (дном). На высоте H_0 на оси Z находятся излучатель и приемная антенна, выполненная в виде горизонтально расположенной линейной антенной решетки, состоящая из набора приемных антенн. Диаграммы направленности излучающей и приемных антенн, как правило, вытянуты вдоль оси перпендикулярно движению. Акустический импульс от излучателя, установленного в точке Р, отражается от элементов дна и регистрируется антенной решеткой в зависимости от задержки $\tau_0 = 2L/c$ (здесь L – наклонная дальность до рассеивающего элемента, с – скорость звука). Распределение эхосигналов по времени за период сканирования образует одну строку информационных данных. Последовательная совокупность строк при движении носителя служит основой для получения акустического изображения дна и карты глубин. Значение глубины Н определяется по измеренному значению угла прихода φ и наклонной дальности L:

$$H = L\cos\varphi,$$

где $L = c\tau_0/2$. В свою очередь, горизонтальное проложение $X = L\sin\varphi$. Угол прихода φ отраженного импульса в интерферометрических системах бокового обзора определяется на основе измерения разности фаз сигналов на отдельных антеннах путем вычисления коэффициента

взаимной корреляции R_{mn} сигналов $S_n(\tau)$ и $S_m(\tau)$ на элементах антенной решетки A_n, A_m:

$$R_{mn}(\tau) = \langle S_m(\tau)\, S_n(\tau) \rangle = R_0 \exp(i\Delta\varphi),$$

где угловые скобки означают усреднение, а значение угла прихода φ связано с фазой $\Delta\varphi$ соотношением:

$$\Delta\varphi = k(d_m - d_n)\sin\varphi.$$

Здесь $d_m - d_n$ — расстояние между антеннами; $k = 2\pi/\lambda$; λ — длина волны. Для обеспечения высокой точности измерений необходимо вводить поправки в результаты измерений за счет ряда дестабилизирующих факторов, таких как точность координирования судна и буксируемого аппарата, скорость распространения и рефракция акустических волн в воде, крен-дифферент, точность измерения параметров эхо-сигнала. Разрешение некоторых ГБО может достигать 10 см. [169, 181]. Чем выше рабочая частота ГБО, тем выше разрешение и качество изображения.

ГБО, выпускаемые различными фирмами, различаются по допустимой глубине использования, частоте работы, разрешающей способности. Из отечественных гидролокаторов бокового обзора можно отметить комплекс «Гидра» (рис. 5.71). «Гидра» — универсальный, мобильный, малогабаритный программно-аппаратный комплекс площадного исследования водоемов методами активной гидролокации в диапазоне частот от нескольких килогерц до одного мегагерца. Эта аппаратура может устанавливаться на судах любого водоизмещения, начиная с маломерных лодок.

Оператор в реальном времени наблюдает на мониторе за ситуацией в толще воды и двумерное изображение дна. Практически нет ограничений по глубине. На первых метрах разрешение по дальности составляет менее 1 см, а на километровых глубинах океана — десятки см. В реальном времени отображается структура толщи дна с проникание на первые десятки метров с



Рис. 5.71. Структура комплекса «Гидра» [www.screen-co.ru]

разрешением 10 см. При камеральной обработке строится трехмерный рельеф дна с разрешением по глубине менее 10 см. Вся информация сохраняется с привязкой к координатам и может быть воспроизведена в дальнейшем.

Для получения рельефа в комплексе используется интерферометрический метод, а не широко распространенная многолучевая локация. Более сложное программное обеспечение интерферометра позволяет в несколько раз увеличить разрешение по углу, получать совмещенное акустическое и трехмерное изображение от единой системы. При этом значительно снижается объем аппаратуры, появляется потенциальная возможность снизить цену, повысить надежность и т. д. Комплекс сертифицирован как средство измерения и может использоваться для получения данных с заданной точностью. Принцип модульного построения сохраняет преемственность при переходе от более простых комплектаций к сложным.

Эксплуатационные характеристики комплекса

Тип зондирующего сигнала	Тон. ЛЧМ
Разрешение по дальности	1–150 см
Максимальная дальность	70–15000 м
Ширина бокового обзора ГБО на каждый борт	14 глубин
Точность построения рельефа в полосе до 6 глубин (ИГБО)	0,5 %
Максимальная глубина проникновения ПФ	50 м
Среднее разрешение ПФ	10 см
Питание	сеть 220 В/50 Гц, аккумуляторы
Вес	250 кг

Технические характеристики комплекса

Частота, кГц	Разрешение, см	Максимальная рекомендуемая глубина, м	Максимальная наклонная дальность, м
500	1	20	120
240	4	50	300
100	8	100	600
30	150	1500	7500

Ранее отмечалось одно из возможных использований ГБО – обследование подводного трубопровода. На экране труба представляется светлой, так как отраженный сигнал имеет большую интенсивность, а

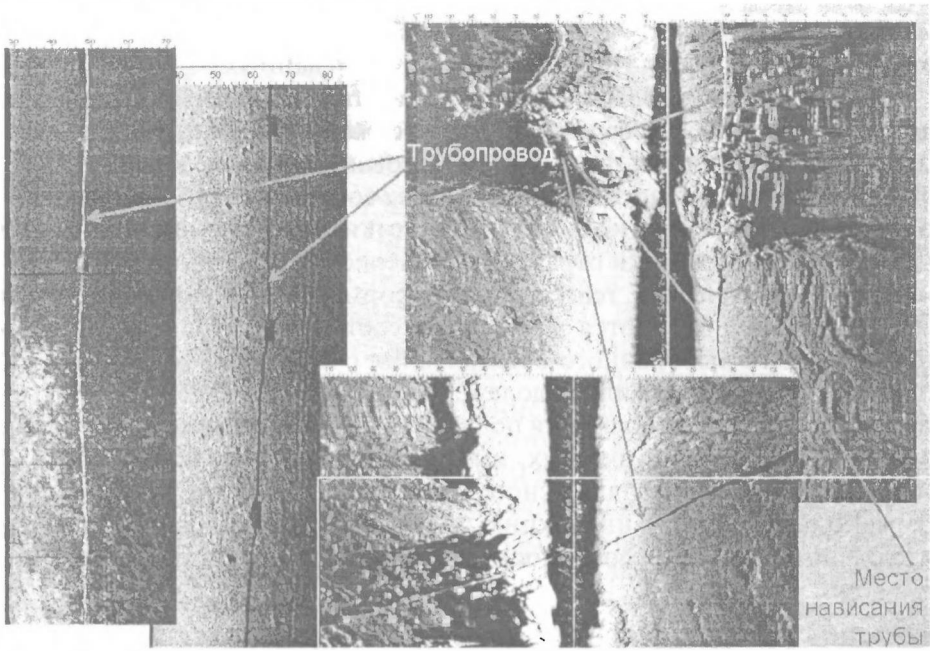


Рис. 5.72. Изображение трубопровода, создаваемое на экране монитора ГБО [www.screen-co.ru]

темной выглядит акустическая тень, отбрасываемая трубой на дне (рис. 5.72). По интенсивным отражениям и теням оператор делает заключение, где труба поддерживается дном, а где нет, и выделяет участки провисания. Длина участка провисания и высота трубы над дном могут быть рассчитаны по длине акустической тени на изображении ГБО. Если труба уложена в углубление с наклонными стенками, то отбрасываемая ею акустическая тень на наклонную стенку углубления и сильное отражение сигнала от этой стенки не будут давать возможность оценить ее высоту и провисание. Для труб малого диаметра – менее 15 см – довольно сложно интерпретировать получаемое



Рис. 5.73. Изображение участка дна с различными объектами [136]

изображение и выявить дефекты в положении. Для этой цели используется автоматическая интерпретация – фильтр данных.

Автоматическая интерпретация позволяет привлечь внимание человека к участкам, где вероятность обнаружения провисания достаточно велика. Алгоритмы фильтрации основаны на отслеживании более 30 различных переменных, описывающих состояние трубопровода. Используются также другие методы обработки изображений. Например, на основании обработки отражения с высокой интенсивностью и отображения акустической тени дается информация о положении трубы. Эти данные используются для оценки состояния трубопровода и его последующего выборочного обследования с помощью подводного аппарата с видеокамерой или водолаза. ГБО в настоящее время все больше используются для выполнения подводных съемок, а также для решения экологических, геологических, инженерных и других задач [174, 138] (рис. 5.73). Внедрение таких систем позволит более качественно и оперативно осуществлять инспекцию подводных участков трубопроводов, что очень важно для безопасности и эффективности их эксплуатации.

ГЛАВА 6
ПРИБОРЫ ДЛЯ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

6.1. Общие сведения

Одним из важных видов геодезических работ являются гравиметрические съемки, результаты которых используются в научных целях и для решения народнохозяйственных задач [45, 152]. В зависимости от поставленной задачи относительная точность измерений силы тяжести при выполнении различных видов гравиметрических съемок может изменяться в пределах от 10^{-5} до 10^{-9}. Так, например, для общей характеристики гравитационного поля обширных территорий земной поверхности (несколько миллионов км^2) измерения силы тяжести достаточно выполнять с точностью до 5—10 мГал. Наиболее точные измерения (до 1—2 мкГал) необходимо выполнять при изучении суточных флуктуаций силы тяжести, а для решения большинства практических задач геофизики и геодезии необходимо измерять силу тяжести с точностью 1—5 мкГал. В то же время точность определения опорных пунктов гравиметрической съемки характеризуется ошибкой порядка 0,1 мГал. Такая же точность измерений необходима при региональных и среднемасштабных исследованиях, для картирования кристаллического фундамента под мощной толщей осадочных отложений и поисков рудных тел полезных ископаемых. Высокоточные измерения силы тяжести и ее вертикального градиента необходимо выполнять при инженерно-геологических изысканиях, и прежде всего такие измерения обычно используются при сейсмотектоническом районировании городских и промышленных территорий для выделения тектонических зон и разломов, обнаружения карстовых образований и пустот естественного и техногенного происхождения, а также при инженерной подготовке площадок гражданского и промышленного строительства. Гравиметрические измерения также выполняются при исследовании поведения грунтов в процессе воздействия на них естественных и техногенных нагрузок, так как большая часть опасных геологических процессов связана с изменением плотности пород грунтов.

В настоящее время исходным пунктом для гравиметрических измерений является Потсдам, где в начале XX века было определено с высокой точностью абсолютное значение ускорения силы тяжести g. XIV Генеральная Ассамблея Международного Геодезического и Геофизического Союза (Люцерн, 1967 г.) рекомендовала принимать уточненное значение абсолютной силы тяжести для Потсдама, равное 981,260 Гал. Опорную сеть пунктов мировой гравиметрической съемки в каждой стране образуют один или несколько основных гравиметрических пунктов.

Международная гравиметрическая стандартная сеть по состоянию на 1971 г. включала 1997 пунктов. Эта сеть является основой для проведения региональных гравиметрических съемок. Значение силы тяжести на основных гравиметрических пунктах определяют относительными методами, т.е. определяют не полное значение силы тяжести, а разность значений Δg между таким пунктом и Потсдамским. В нашей стране за исходное начало гравиметрической сети принят пункт Москва, связанный с Потсдамским. В СССР работы по созданию единой гравиметрической сети были начаты в 1932 г. Пункты гравиметрической съемки 1 класса выполнены с ошибкой 0,10–0,15 мГал, а пункты 2 класса соответственно с ошибками порядка 0,15–0,20 мГал относительно пунктов 1 класса. Заполняющая сеть пунктов 3 класса характеризуется ошибками определения силы тяжести в пределах 3–5 мГал. Расстояния между гравиметрическими пунктами государственной сети в среднем составляют около 10 км, что не позволяет использовать их для выявления аномальных значений поля силы тяжести при геофизических съемках.

Пункты государственной гравиметрической сети используются для привязки опорных сетей при выполнении гравиметрической съемки. Опорная съемочная сеть разбивается для учета изменения места нуля прибора и нахождения абсолютных значений ускорения силы тяжести, где определения ускорения силы тяжести должны выполняться в 1,5–2 раза точнее, чем на точках съемочной сети. Количество точек опорной сети обычно составляет до 5–10 % от общего числа точек съемочной, равномерно распределенных по площади. Для наблюдения опорных точек обычно используются более высокоточные приборы, выполняются многократные измерения, а также добиваются сокращения промежутка времени между измерениями на соседних точках путем использования транспорта. Определения силы тяжести может быть абсолютным и относительным и базируется на физических явлениях, основанных на зависимости от силы тяжести. При абсолютных измерениях измеряют полное значение силы тяжести g, а при относительных – разность значений Δg между двумя пунктами. При этом используются динамические и статические методы.

К динамическим методам относятся измерения:

1. периода колебания свободного маятника, качающегося под действием силы тяжести;
2. периода колебания маятника, совершающего колебания под действием силы тяжести и упругой пластины;
3. скорости падения тел;
4. частоты колебания струны;
5. скорости вытекания жидкости через узкое отверстие.

К статическим методам относятся:

1. гипсометрический — сравнение измеренного давления атмосферы при помощи ртутного барометра и гипсотермометра;

2. барометрический — измерение высоты ртутного столба, находящегося в равновесии под действием упругой силы газа и силы тяжести;
3. измерение смещения некоторой массы, находящейся в равновесии под действием силы тяжести или какой-либо другой силы, например, упругой силы пружины.

Большинство современных гравиметров построено по принципу пружинных весов, когда сила тяжести определяется по силе упругой деформации.

В основе баллистического метода, основанного на определении скорости падения тел, лежит закон прямолинейного равномерно ускоренного движения свободно падающего тела:

$$h = h_0 + v_0 t + gt^2/2, \qquad (6.1)$$

где h_0, v_0 — координата и скорость тела в начале отсчета времени; h — координата тела в момент времени t; g — ускорение силы тяжести, считаемое постоянным.

6.2. Гравиметры для относительных измерений силы тяжести

Наиболее распространенный прибор для измерения силы тяжести — гравиметр, используемый для относительных измерений, т. е. разности значений силы тяжести в двух пунктах. Абсолютное значение g_i в i-той точке получают, суммируя известное абсолютное значение g_0 в начальной точке с измеренным приращением ускорения силы тяжести Δg_i в определяемой точке. Как правило, применяются статические гравиметры. Они основаны на компенсации силы тяжести противодействующей упругой силой. Статические гравиметры можно рассматривать как высокочувствительные пружинные весы. В таких гравиметрах используется либо упругая сила газов, либо упругая сила пружины (рис.6.1, а) или крутильной нити (рис.6.1, б).

Для пружинных гравиметров мерой изменения ускорения силы тяжести служит изменение длины пружины, один конец которой закреплен, а к другому подвешен груз массой m. Уравнение равновесия имеет вид:

$$mg = fl, \qquad (6.2)$$

где m — масса груза, укрепленного на нижнем конце пружины; f — постоянная пружины (сила, необходимая для растяжения пружины на 1 см). Приращение силы тяжести между начальной точкой и определяемой можно рассчитать по формуле:

$$\Delta g = f\Delta l/m. \qquad (6.3)$$

Для гравиметров с вращательным перемещением массы (рис.6.1, б) рычаг с грузиком крепится к горизонтальной упругой нити и под воздействием силы тяжести наклоняется, закручивая нить. Для условия равновесия требуется, чтобы сумма моментов всех действующих сил

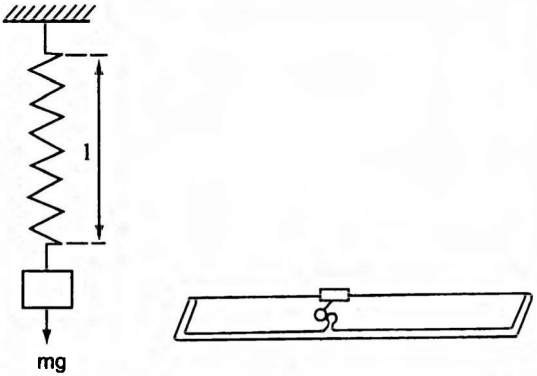


Рис. 6.1. Пружинная (а) и крутильная (б) системы гравиметров

была равна нулю. Во время измерений микрометренным винтом грузик выводится в горизонтальное положение. При этом указатель шкалы прибора, связанный с положением груза, стоит на нуле. При перемещении на другую точку под воздействием изменения силы тяжести грузик отклоняется, и показание на шкале прибора будет отличаться от нуля.

Приращение силы тяжести Δg определяют, вновь перемещая микрометренным винтом грузик в горизонтальное положение, которому соответствует отсчет Δn. Это показание шкалы и определяет разность значений силы тяжести между двумя пунктами:

$$\Delta g = C\Delta n, \qquad (6.4)$$

где C – цена деления прибора, зависящая от его конструктивных особенностей.

Для повышения точности гравиметров применяется астазирование, т. е. используется состояние системы в положении равновесия, близком к неустойчивому, благодаря чему происходит искусственное увеличение чувствительности. В зависимости от степени астазирования измеряемые перемещения грузика становятся в 100—1000 раз большими, т.е. небольшие изменения ускорения силы тяжести вызывают большие изменения отсчета по шкале прибора. Достоинствами таких гравиметров являются малые размеры и высокая точность (0,02 мГал). Необходимо отметить, что в настоящее время в некоторых разрабатываемых относительных гравиметрах вместо механических упругих элементов устанавливают электростатические или сверхпроводящие магнитные бесконтактные подвесы пробных тел.

Гравиметры делят на кварцевые, металлические и кварцево-металлические в зависимости от материала, из которого изготовлена чувствительная система прибора. Так как свойства кварца зависят от температуры, чувствительные элементы термостатируют. В нашей стране выпускаются кварцевые гравиметры ГАК-4М, ГАГ-2, ГНУ-КС и др. весом до 5–6 кг.

Для выполнения полевых работ обычно используют гравиметр наземный кварцевый ГНУ-КВ (рис. 6.2) – портативный геофизический прибор, позволяющий производить относительные измерения ускорения силы тяжести. Этот прибор имеет малые габариты и вес, что

способствует применению его в полевых условиях и труднодоступных районах.

Чувствительная система гравиметра изготовлена из плавленого кварца. Построена по схеме серийных приборов и дополнена электрической индикацией положения чувствительного элемента, остаточных наклонов и температуры. Отличительной особенностью прибора является электростатический компенсационный принцип измерений.

Гравиметр предназначен для выполнения региональной гравиметрической съемки, создания опорных гравиметрических сетей и высокоточных работ.

Термостатическое исполнение обеспечивает работоспособность приборов при температуре окружающего воздуха от −25 до +40 °С. Прибор выдерживает вибрацию с ускорением 20 м/с^2 при 70 Гц.

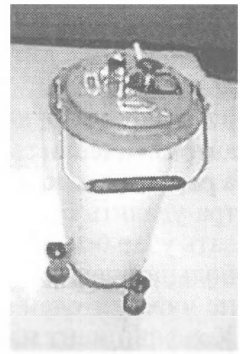


Рис.6.2. Гравиметр ГНУ-КВ, выпускаемый ОАО «Нефтекип»

Основные параметры:

Погрешность единичного измерения, mGal	<0,02
Чувствительность при измерениях силы тяжести, mGal	<0,001
Диапазон измерений, mGal	80–450
Диапазон измерений с перестройкой, mGal	7000
Остаточное смещение нуль-пункта, mGal/день	0,2
Время измерений на пункте, мин.	3
Количество пунктов измерений в памяти	3000
Масса гравиметра и электронного блока с аккумулятором, кг	5
Габаритные размеры (высота х диаметр), мм	450 x 210

Гравиметры, выпускаемые зарубежными фирмами SINTREX, LaCoste-Romberg и другими, позволяют проводить измерения с точностью 0,001–0,005мГал. Эти приборы широко используются во всем мире и в том числе в нашей стране. Одним из наиболее распространенных приборов является гравиметр GG-5 AutoGrav (рис. 6.3), который является новейшим обновлением ранее выпускавшегося гравиметра GG-3 AutoGrav. Это высокоточный (1 мкГал) и самый легкий из автоматических гравиметров, обеспечивающий автоматическое выравнивание прибора и автоматическую диагностику после включения питания. Личные ошибки наблюдателя при измерениях полностью

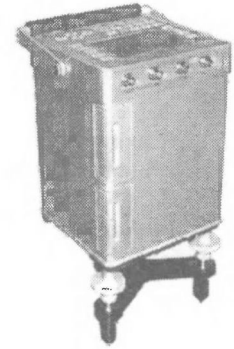


Рис. 6.3. Внешний вид гравиметра GG-5 AutoGrav

исключаются, так как прибор полностью автоматизирован. Процессор позволяет вводить в реальном времени программные поправки за долговременный дрейф, уменьшая его до менее чем 0,02 мГал/день; коррекцию за рельеф; компенсировать измерения за ошибку наклона датчика; автоматически высчитывать поправки за приливы к каждому измерению в реальном времени; за счет использования высокоэффективного фильтра удалять большой микросейсмический шум. GG-5 может выдерживать удар больше чем 20 G, и изменение показаний гравиметра будет не больше, чем на 5 мкГал. Кварцевый датчик GG-5 Autograv абсолютно не чувствителен даже к сильным колебаниям магнитного поля Земли. Коэффициент магнитного поля – менее чем 0,15 микрогал/Гаусс.

Благодаря этим качествам, помимо использования для геодезических работ, GG-5 AutoGrav может применяться для:

- разведки минералов;
- геологического картирования;
- вулканологии;
- разведки нефти и газа;
- инженерных работ;
- региональных исследований гравитации;
- морских измерениях, как морской гравиметр;
- аэрогравиметрических измерениях, как бортовой аэрогравиметр.

Технические характеристики гравиметра GG-5 AutoGrav

Тип датчика	плавленый кварц с электростатической компенсацией
Точность измерения	1 мкГал
Стандартное отклонение	<5 мкГал
Рабочий диапазон	8000 мГал, без переустановки
Остаточный долговременный дрейф (статический)	менее 0,02 мГал в день
Диапазон автоматической компенсации наклона	+/–200 угловых секунд
Скачок измерений	типично: меньше 5 мкГал для удара 20 G
Автоматическая коррекция	прилив, наклон прибора, температура, шумоподавление, сейсмический фильтр
Размеры	30 x 21 x 22 см
Вес с аккумуляторами	8 кг
Емкость батарей	2 x 6 Ач (10 В), литиевые аккумуляторы
Потребление	4,5 Вт при 25 градусах
Рабочая температура	от –40 до +45
Температурный коэффициент	0,2 мкГал/°С (обычно)
Коэффициент атмосферного давления	0,15 miicroGal/kPa (обычно)
Коэффициент магнитного поля	1 мкГал/Гаусс (обычно)
Память	Flash-технология, 1 МБ (стандартно), расширяется до 12 МБ

Часы реального времени	внутренние: выдают день, месяц, год, часы, минуты, секунды
Цифровой выход	последовательный интерфейс RS-232 и USB
Формат данных	Scintrex, text, CG-3, xyz
Аналоговый выход данных	ленточный регистратор
Дисплей	1/4 VGA 320 x 240
Клавиатура	27 клавиш

6.3. Гравиметры для абсолютных измерений ускорения свободного падения

До появления лазеров при метрологических, геофизических и геодезических измерениях гравитационного поля Земли применяли гравиметры, принцип действия которых основан на использовании маятника, пружинных весов либо свободно падающего тела. Точность измерений таких гравиметров оценивается величиной порядка 10^{-4}—10^{-5}. За последние 10 лет значительно улучшены характеристики не только относительных, но и абсолютных гравиметров. Абсолютные гравиметры обеспечивают точность порядка 1 мкГал. Например, создан абсолютный баллистический гравиметр FG5 с точностью 1 мкГал.Эти приборы пользуются значительным спросом: только за 1993-94 гг. введены в строй 10 приборов [45, 142]. Особо точные гравиметрические приборы для проведения фундаментальных физических исследований, как правило, проектируются в криогенном исполнении с использованием лазерной интерферометрии. Эти приборы в основном используются при наблюдениях опорных гравиметрических пунктов, решении задач геодинамики, создании государственного специального эталона (группового) единицы измерений для гравиметрии, создании эталонных полигонов для калибровки относительных гравиметров.

Разработанные в настоящее время лазерные гравиметры, называемые баллистическими, обеспечивают значительно большую точность измерений (10^{-8}—10^{-9}). Принцип действия лазерного гравиметра основан на из-

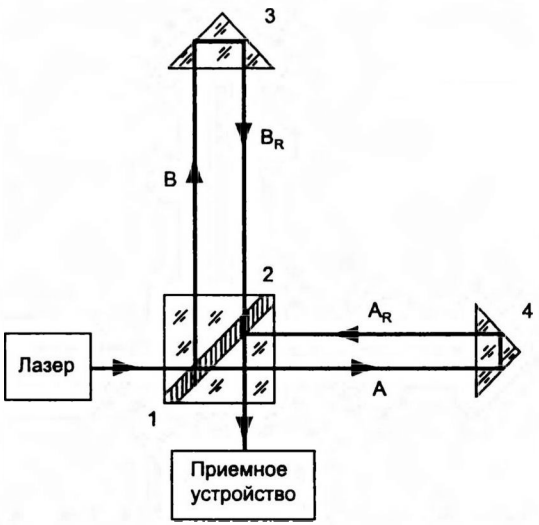


Рис. 6.4. Оптическая схема лазерного баллистического гравиметра

мерении ускорения g свободно падающего тела, которое установлено в вертикальном плече лазерного интерферометра (рис. 6.4). В качестве свободно падающего тела обычно используют трипельпризму, которая имеет в вершине магнитный наконечник и удерживается в верхней части вертикального плеча интерферометра с помощью электромагнита. Такая призма малочувствительна к разворотам.

Лазерный гравиметр работает следующим образом. Световой пучок от лазера расщепляется светоделительной поверхностью 1 призмы 2 на два пучка – А и В. Пучок А направляется на неподвижную призму 4, от которой отражается и направляется назад вдоль пути A_R параллельно своему начальному направлению. Отражаясь от светоделительной поверхности 1, пучок A_R попадает на вход приемного устройства.

В свою очередь пучок В, отражаясь от свободнопадающей призмы 3, возвращается назад по пути B_R и также попадает на вход приемного устройства, где смешивается с пучком A_R. Из-за движения призмы 3 светлые и темные полосы интерференционной картины перемещаются, и приемное устройство регистрирует импульсы , которые используются для определения абсолютного значения g.

Путь, пройденный свободно падающей призмой 3, определяется числом полос. Если начальная скорость неизвестна, то измерения выполняют в течение двух временных интервалов τ_1 и τ_2, имеющих одно и то же начало отсчета, причем τ_2 выбирают обычно вдвое большим, чем τ_1. Значение g вычисляют по формуле:

$$g = \frac{\lambda(N_2 - N_1\tau_1/\tau_2)}{\tau_2^{\,2} - \tau_1\tau_2}, \qquad (6.5)$$

где λ – длина волны света; N_1 и N_2 – число полос, сосчитанных соответственно за временные интервалы τ_1 и τ_2.

Для уменьшения влияния вращения призмы 3 устройство конструируют таким образом, чтобы его центр тяжести совпадал с оптическим центром. Для исключения влияния трения воздуха призму 3 помещают в вакуумированную камеру, укрепленную на основании, где установлены лазер, светоделительная призма 2, приемное устройство и неподвижная призма 4.

В некоторых типах лазерных гравиметров, чтобы учесть влияние движений земной коры, неподвижный уголковый отражатель монтируют на сейсмометре. В результаты измерений вводят поправку на высоту, на которой производят измерения, а также учитывают электрические и магнитные силы (в частности, от катушек сейсмометра), стабильность длины волны излучения лазера и номинальную точность измерения времени. Кроме того, необходимо учитывать поправку на доплеровский сдвиг лазерного излучения, которая имеет относительную величину порядка $3 \cdot 10^{-8}$ и может быть найдена из выражения:

$$\Delta g/g = -[\frac{3}{4}g(\tau_1 + \tau_2)/c + 2v_0/c], \qquad (6.6)$$

где v_0 – скорость уголкового отражателя в начальный момент измерений.

В настоящее время во многих странах разработаны лазерные баллистические гравиметры, обеспечивающие более высокую точность измерений, чем традиционные.

В Новосибирске в Институте автоматики и электрометрии СО РАН разработан лазерный баллистический гравиметр ГАБЛ-Э, не уступающий по техническим параметрам аналогичным зарубежным приборам. Структурная схема этого гравиметра приведена на рис. 6.5.

В серии лазерных гравиметров типа ГАБЛ используется несимметричный метод измерения ускорения свободного падения.

Для уменьшения влияния вибрационных и сейсмических помех референтный (неподвижный) отражатель лазерного интерферометра подвешен в центре качаний низкочастотного сейсмографа 1. При измерениях в вакуумированной камере свободно падает уголковый отражатель 2, длина пути которого измеряется лазерным интерферометром. С помощью фотоприемника регистрируется смещение полос интерференционной картины, которое вызвано перемещением уголкового отражателя 2. Длина волны излучения гелиево-неонового лазера, которая является мерой пути, стабилизируется с помощью йодной ячейки. Стабилизация частоты квантующих импульсов, используемых для измерения временных интервалов, осуществляется с помощью счетчиков и прецизионного рубидиевого стандарта частоты. Обработка результатов

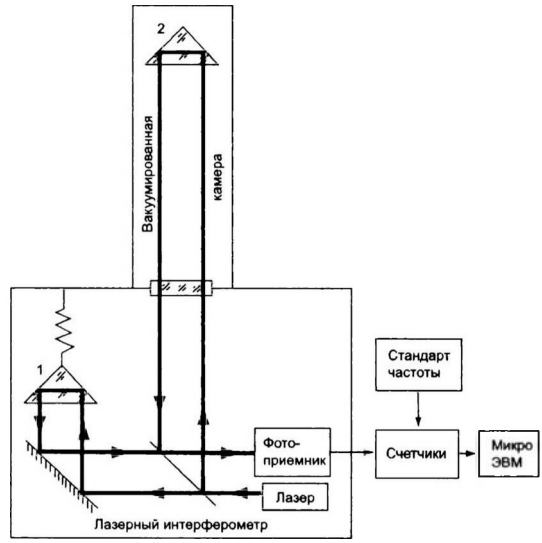


Рис. 6.5. Структурная схема гравиметра

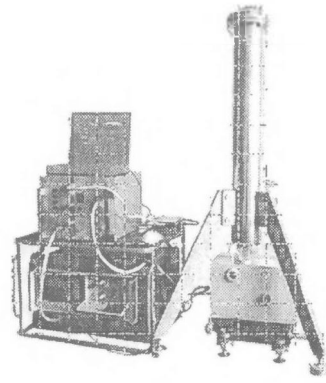


Рис. 6.6. Общий вид гравиметра ГАБЛ-Э

измерений выполняется по способу наименьших квадратов с помощью процессора.

Баллистический гравиметр (рис. 6.6), разработанный по этой схеме, имеет следующие технические характеристики:

Среднеквадратическая погрешность измерения	не более $2 \cdot 10^{-8}$ м/с^2
Систематическая погрешность	не более $5 \cdot 10^{-8}$ м/с^2
Габариты гравиметра:	
оптико-механический блок	1200x700x700 мм
электронный блок	620x560x660 мм
Общий вес гравиметра	180 кг

Во Всероссийском научно-исследовательском институте «Сигнал» разработан баллистический лазерный гравиметр высокой точности для измерения абсолютных значений ускорения свободного падения, схема которого (рис. 6.7) несколько отличается от гравиметра ГАБЛ-Э.

Повышение точности измерений с помощью этого гравиметра достигается за счет встраивания дополнительно вблизи шарнирной опоры специального уголкового оптического отражателя интерферометра, который образует второй информационно-измерительный канал.

Введение поправок по разности показаний двух каналов с учетом корреляционной связи между ними позволяет исключить влияние сейсмических колебаний на результат измерения ускорения свободного падения.

Принцип действия этого лазерного гравиметра несколько отличается от принципа действия гравиметра ГАБЛ-Э и основан на использовании лазерного интерферометра перемещений с двумя информационно-измерительными каналами. Лазерный интерферометр перемещений (рис. 6.7) состоит из He-Ne лазера 1; оптического раздвоителя 2; оптической делительной пластины 3; фотоприемников 4, 5; уголкового оптического отражателя пробной массы 6; поворотных зеркал 13; референтных уголковых оптических отражателей 11 и 15. Интерферометр служит для преобразования свободного движения пробной массы с уголковым оптическим отражателем 6, подброшенной вертикально вверх, в интерференционные сигналы по двум каналам. Попадая в оптический раздвоитель 2, луч от источника монохроматического света He-Ne лазера 1 расщепляется на два луча, каждый из которых попадает на оптическую делительную пластину 3. Часть двух лучей направляется на уголковый оптический отражатель пробной массы 6 и после троекратного отражения возвращается на оптическую делительную пластину 3. Вторая часть лучей, отразившись от поворотных зеркал 13, направляется на уголковые оптические отражатели 11, 15 и после троекратного отражения возвращается на оптическую делительную пластину 3, где интерферируют с лучами, отраженными от уголкового оптического отражателя 6, совершающими свободное движение. Полученные интерференционные сигналы при помощи фотоприемников 4, 5 преобразуются в электрические

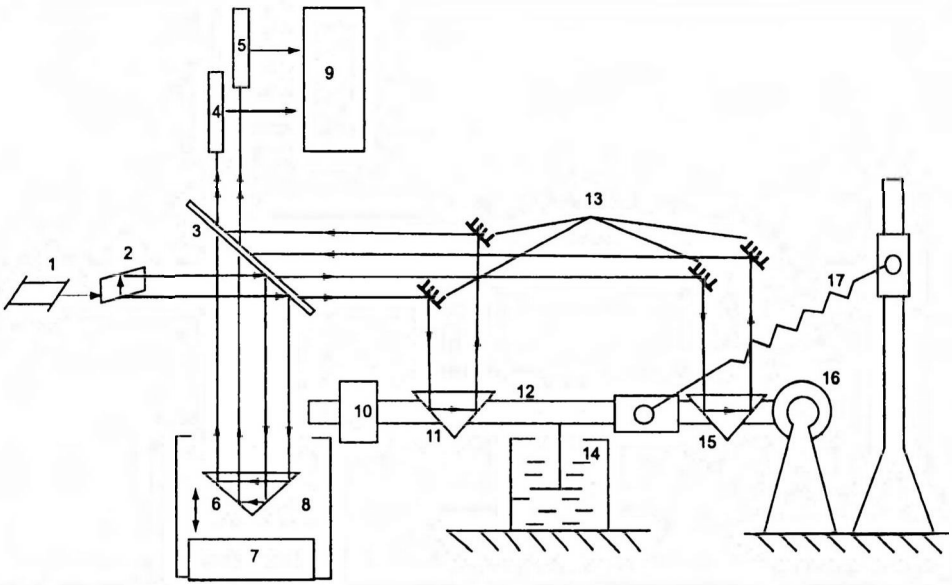


Рис. 6.7. Структурная схема баллистического лазерного гравиметра, разработанного во Всероссийском научно-исследовательском институте «Сигнал» (г. Ярославль)
1 – лазер; 2 – оптический раздвоитель; 3 – оптический делитель; 4, 5 – фотоприемники; 6 – уголковый оптический отражатель пробной массы; 7 – электромагнит; 8 – кювета; 9 – электронно-счетное устройство; 10 – груз; 11, 15 – уголковые отражатели; 12 – коромысло; 13 – поворотные зеркала; 14 – жидкостный демифер; 16, 17 – элементы маятниковой подвески

сигналы переменной частоты, которые обрабатываются в электронно-счетном устройстве 9 для вычисления абсолютных значений ускорения свободного падения g по каждому каналу.

С помощью абсолютных гравиметров создают опорные гравиметрические сети. Результаты измерений используют для уточнения мировой и национальной гравиметрических систем и при решении проблемы определения непрерывных вариаций гравитационного поля Земли. В настоящее время ведутся работы по созданию портативных абсолютных лазерных гравиметров, позволяющих выполнять более точные гравиметрические съемки.

В настоящее время для проведения абсолютных измерений силы тяжести требуется большое количество вспомогательного оборудования, поэтому их нецелесообразно проводить при обычных геодезических съемках. Большинство баллистических гравиметров размещается в стационарных лабораториях, а наблюдения выполняются по специально разработанным для этих целей программам (инструкциям). Однако существуют и транспортабельные устройства, имеющие приемлемые уровни точности измерения.

В ЦНИИГАиК разработаны технические условия на измерения абсолютного значения ускорения силы тяжести на пунктах фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС)[42].

При выполнении измерений на пункте координаты, определяемые спутниковыми методами, передаются на постамент (гравиметрический пункт ФАГС), где устанавливается баллистический гравиметр. На каждом пункте выполняется измерения вертикального градиента силы тяжести с погрешностью не более 3 мкГал. При этом должны выполняться следующие требования: применяемый баллистический гравиметр должен иметь практически неограниченный диапазон измерений; нестабильность длины волны излучения рабочего лазера за время наблюдений не должна превышать $5 \cdot 10^{-9}$; относительная погрешность стандарта частоты должна быть не более $5 \cdot 10^{-10}$; давление остаточного газа в баллистической камере не должно превышать $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.

В РФ гравиметрические определения выполняют под научно-методическим руководством ЦНИИГАиК с использованием поверенных средств измерений и аттестованных методик выполнения измерений. Согласно действующей инструкции [42] при высокоточных определениях ускорения силы тяжести должны выполняться следующие условия:

1. Пункт размещается в капитальном здании в подвале (полуподвале) или на первом этаже.

2. Приборы устанавливаются на постаменте размером верхней плоскости 100 х 100 см, возвышающимся над полом на 10—50 см и углубленном в грунт на глубину не менее 150 см. Типы постаментов устанавливаются в зависимости от физико-географических условий района, глубины промерзания и оттаивания грунтов, гидрогеологического режима и других особенностей местности.

3. В центре постамента закладывается нивелирная марка с номером, к которой относится измеренное значение ускорения силы тяжести. На эту марку передается высота из нивелирования 1 класса.

4. Помещение, в котором находится пункт, должно иметь площадь не менее 8 кв. метров; высота потолка над верхней гранью постамента должна быть не менее 2 м.

5. Температура в помещении должна быть в пределах +10—30 °С.

6. Помещение должно иметь подводку переменного электрического тока напряжением 220±10 % В, мощностью не менее 2 кВт.

7. Для работы вакуумного насоса необходим трехфазный электрический ток мощностью 250 Вт.

8. Для охлаждения вакуумного насоса в комнате должен быть водопровод с температурой воды не выше +20 °С и с расходом 50 литров в час.

9. Пункт должен быть удален от источников вибраций, мощных электрических и магнитных полей, не более: от берега моря — 1 км; от железных дорог — 0,8 км; от крупных промышленных предприятий —

0,5 км; от шоссейных дорог и улиц с интенсивным движением транспорта — 0,2 км. Должна быть обеспечена возможность круглосуточной работы на пункте.

Как уже отмечалось, точность измерения современными баллистическими гравиметрами достигает 0,001–0,01 мГал. Измерения с помощью гравиметров на подвижных основаниях связаны с определенными трудностями, так как прибор не способен ощутить разницу между ускорением силы тяжести и возникающим при этом инерционным (кинематическим) возмущающим ускорением (например, вследствие вертикальных перегрузок при движении автомобиля, корабля или самолета). Несмотря на это, созданы устройства на базе наземных гравиметров или акселерометров, которые могут обеспечить точность гравиметрических измерений порядка нескольких миллигал. При работе этих устройств кинематическая составляющая ускорения вычитается из общего значения. При этом осуществляется постоянное дифференцирование пройденного расстояния по времени, т.е. оценивается скорость движения и после последующего дифференцирования находится ускорение. Кроме того, появляется возможность ввести поправки на ускорение Кориолиса и центростремительное ускорение.

Подвижные гравиметрические устройства обычно снабжают высокоточными спутниковыми средствами навигации. При выполнении аэрогравиметрических съемок используют также радиолокационные или лазерные высотомеры.

Для измерения гравитационного поля Земли используются спутниковые наблюдения.

Высота орбиты спутника определяется с помощью станций слежения, которые расположены в разных частях земного шара. Кроме того, высота полета спутника относительно поверхности океана определяется с помощью лазерных высотомеров. Спутниковые высотомеры имеют точность несколько см (первые спутниковые альтиметры имели точность около 1 м). Используя полученные значения высот спутника из независимых измерений, оценивают уровень поверхности океана, который приблизительно соответствует поверхности геоида. Так как известна конфигурация уровенной поверхности, то определение значений силы тяжести становится чисто математической задачей. Так как около 70 % общей площади поверхности Земли приходится на океан, то значительная часть данных о гравитационном поле Земли (аппроксимированной в виде геоида) может быть получена в процессе нескольких витков полета специализированного спутника.

ГЛАВА 7
ОРИЕНТИРОВАНИЕ

7.1. Основные сведения об использовании компаса

С доисторических времен человек ориентировался по небесным светилам, но при плохих погодных условиях ориентироваться по небесным светилам невозможно. Изобретение компаса открыло новые, более широкие возможности для всепогодной навигации. Письменное упоминание о компасе появилось примерно в 1000 г. до н. э. в Китае, а на западе об использовании компаса впервые упоминается спустя более 2000 лет — в 1187 г. в писаниях английского монаха Александра Некэма. По-видимому, компас привезли на запад арабские торговцы, а первые европейские компасы использовались итальянскими моряками. Благодаря тому, что компас, являясь одним из старейших приборов, может указывать направление, он до настоящего времени широко применяется в навигации, геодезии, геологии, туризме. На основе современных достижений науки и техники компас как прибор все время совершенствуется и все шире используется в качестве модулей в спутниковых приемниках, а также в самых разнообразных навигационных и геодезических приборах. Магнитное поле, окружающее нас, в основном сформировано магнитным полем Земли, которое по форме силовых линий близко к полю диполя — элементарного бесконечно малого магнита, а также магнитными полями, которые создают многие электрические приборы, минералы, содержащие железо, и даже человеческое тело. С удалением от поверхности Земли напряженность геомагнитного поля убывает (пропорционально кубу расстояния).

Магнитное поле Земли, 90 % которого создается электропроводящей внешней оболочкой ядра (так называемое основное поле), имеет очень сложную изменяющуюся структуру, так как на него накладываются дополнительные поля, некоторые из которых могут достигать 10 % от величины основного поля. Дополнительные поля изменяются во времени и пространстве и создаются намагниченными горными породами в коре Земли, возникают за пределами Земли из-за электрического тока в ионосфере и магнитосфере, создаются движением ионов и электронов, электрическими токами, проходящими в коре Земли (обычно создаваемыми различными внешними магнитными полями), и воздействием океанских течений.

Временные изменения поля имеют сложную структуру, меняющуюся от долей секунды (микропульсации, вызванные свойствами магнитосферы и солнечного ветра) до миллионов лет (шкала времени для

полной перемены основного поля). Например, суточные изменения склонения в средней полосе территории РФ достигают 15′.

Точки схождения силовых линий земного магнитного поля располагаются в северном и южном полушариях. Магнитные полюсы не совпадают с географическими полюсами и находятся внутри Земли. Прямая, соединяющая магнитные полюсы Земли, составляет с осью вращения Земли угол 11° 6′ и не проходит через ее центр. Северный геомагнитный полюс сейчас находится рядом с островом Эллесмир на территории Канадского арктического архипелага (74° с. ш., 100° з. д.), а южный геомагнитный полюс расположен на расстоянии примерно 1000 километров к югу от Австралии – на северо-восточной оконечности Земли Королевы Виктории в Антарктиде (68° ю. ш., 145° в. д.), причем в результате происходящих перемен в основном магнитном поле Земли полюса медленно дрейфуют с неравномерной скоростью. Игла компаса показывает направление общего суммарного вектора земного магнитного поля, учитывающего влияние всех накладывающихся на него полей. Точность компаса понижается с увеличением величины полей, накладывающихся на основное магнитное поле Земли. На точность компаса существенно влияют находящиеся вблизи компаса железо или сталь («мягкое железо»), которые обладают индуцированным магнетизмом, влияющим на окружающее магнитное поле, а также объекты, обладающие остаточным магнетизмом («твердое железо»). На точность показаний компаса оказывают воздействие статический разряд от синтетической одежды и даже автомобильные динамики. Таким образом, направление, которое указывает компас, как правило, отличается от направления на северный магнитный полюс. Угловое отклонение иглы компаса от истинного направления называется девиацией магнитного компаса. Интенсивность геомагнитного поля характеризуется не только напряженностью, но и положением вектора напряженности в пространстве (рис. 7.1).

Вектор напряженности магнитного поля земли B в любой точке пространства может быть разложен на горизонтальную составляющую H и вертикальную Z и характеризуется склонением и наклонением, которые называют элементами земного магнетизма. Линия пересечения вертикальной

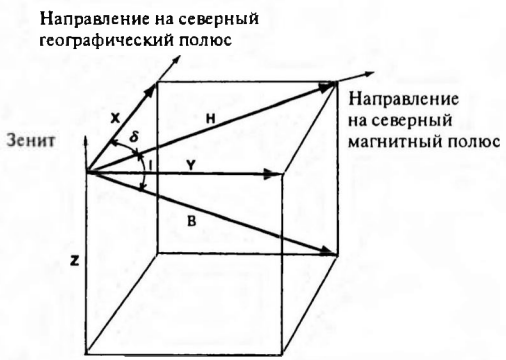


Рис. 7.1. Параметры геомагнитного поля
Склонение (δ), наклонение (I), напряжение поля (B), горизонтальная составляющая поля (H), северная (X) и восточная (Y) составляющие поля

плоскости, в которой лежит вектор напряженности B, с поверхностью геоида называется магнитным меридианом M.

Угол между горизонтальной составляющей вектора H геомагнитного поля B и географическим направлением на север (угол между географическим и магнитным меридианами) называется магнитным направлением или магнитным склонением, обозначаемым через δ. Угол между B и горизонтальной плоскостью называется магнитным наклонением и обозначается через I. Он связан с составляющими вектора простым соотношением $\mathrm{tg}\, I = Z/H$. Величины δ и I измеряются в градусах, положительным значением для δ считается направление на восток, а положительным для I, когда северный конец вектора B направлен вниз. Распределение интенсивности геомагнитного поля изображают на картах, где равные углы магнитного склонения образуют изогоны. Когда на карте отображают равные углы магнитного наклонения, то — изоклины, а равные значения напряженности (Z, H) образуют изодинамы. Напряженность поля в целом увеличивается по направлению к магнитным полюсам, где она составляет (0,008–0,009 А/м). Около географического экватора проходит изодинама минимальной магнитной напряженности — динамический экватор, в пределах которого вертикальная составляющая Z равна нулю.

Магнитное поле Земли может быть математически смоделировано. На рис. 7.2 [183] показаны изогоны, характеризующие магнитное склонение на начало 2000 г., вычисленные по мировой магнитной модели, при расчете которой используется ряд сферических гармонических коэффициентов (коэффициентов Гаусса).

Для вычисления коэффициентов используются данные измерений магнитного поля в различных точках Земли, и данные спутниковых наблюдений на определенный период и их вековые изменения. Основными моделями поля являются Международное Геометрическое Базовое Поле (МГБП) и Мировое Магнитное Поле (ММП). Полученные модели магнитного поля Земли позволяют получать на поверхности океана среднеквадратические ошибки отклонения от модели (в рамках соответствующего промежутка времени) порядка 0,5 градусов. В других местах на поверхности Земли (в ос-

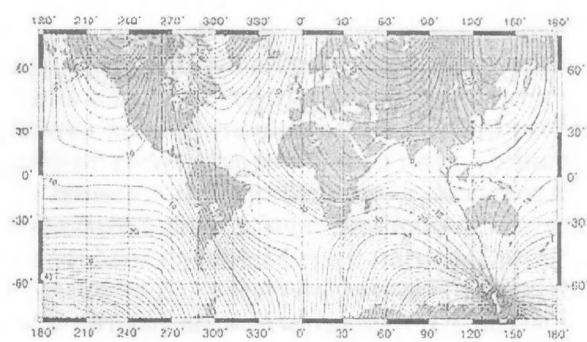


Рис. 7.2. Контуры магнитных склонений — изогоны — на карте мира в проекции Меркатора показывают магнитное склонение на начало 2000 года [183]

новном над сушей, по краям континентов, над горами и крупными котлованами) ошибки в значениях склонений и наклонений могут достигать несколько градусов, а в некоторых аномалиях из-за геологических образований, ошибки могут быть более 50 градусов. Имеются районы, где пользование магнитным компасом затруднено: например, в районе Курской магнитной аномалии. Указанные погрешности могут быть при переводе истинных направлений и пеленгов в магнитные. Это объясняется тем, что полученные математические модели магнитного поля Земли учитывают только длинноволновые пространственные колебания, создающиеся в земном ядре, и не используют средне- и коротковолновые колебания, создающиеся в земной мантии и коре. В программное обеспечение большинства GPS-приемников встроены параметры МГБП или ММП для перевода истинных направлений и пеленгов в магнитные. Точность перевода зависит от внутренних ошибок моделей и от того, используются ли они в тот период, на который они рассчитаны. С течением времени данные используемой модели устаревают, и ошибки увеличиваются. Поэтому требуется периодическое обновление этих данных либо введение поправок в результаты измерений.

7.2. Современные электронные компасы

До недавнего времени в геодезии в основном использовались компасы и буссоли, где чувствительным элементом является намагниченная игла, вращающаяся на стержне и используемая в разных модификациях этих приборов уже несколько тысячелетий. При ориентировании игла принимает такое положение, что ее плоскость становится параллельна линиям магнитного поля, проходящим в данном месте. Если игла имеет две степени свободы, т. е. может вращаться в горизонтальной и вертикальной плоскостях, то направление, в котором указывает игла, будет показывать и склонение, и уклон локального геомагнитного поля. Во многих приборах, для того чтобы игла точно показывала направление на северный магнитный полюс, ее обычно уравновешивают специально под особенности магнитного поля того региона, в котором компас будет эксплуатироваться. Иногда используют компасы с глобальным балансированием, которые могут использоваться по всему миру. Для демпфирования колебаний иглы во время движения компас заполняется жидкостью (смесь воды с алкоголем или очищенным маслом). Показания таких приборов отягощены ошибками из-за влияния внешних воздействий, таких как вибрация, наклон, ускорение, а также внешние магнитные поля. Традиционные компасы и буссоли сложно приспособить к цифровому считыванию, а следовательно, сложно использовать в комплексе с новейшими геодезическими приборами.

В современных электронных компасах в качестве чувствительного элемента используются магнитометры, которые являются, как и компас, аналоговыми приборами и измеряют интенсивность одной или

нескольких составляющих магнитного поля Земли в той точке, где он находится. Сигналы с выхода магнетометра преобразуются в цифровую форму и могут быть использованы для дальнейшей обработки микропроцессором. В современных приборах в основном используются магнитометры, в которых используются магниторезистивные и магнитоиндуктивные датчики, датчики на основе эффекта Холла, а также датчики, изготовленные по технологии «fluxgate». Для ориентирования обычно используется электронный компас, который имеет два магнитометра, установленных в горизонтальной плоскости под прямым углом друг к другу, чтобы измерять одну из компонент магнитного поля B_x или B_y, соответственно по оси x или по оси y. Угол между осью x и магнитным меридианом будет равен:

$$\psi = \text{arctg}(B_y/B_x). \qquad (7.1)$$

Современные магнетометры имеют небольшие размеры и встраиваются в интегральные микросхемы.

В некоторые геодезические приборы встраиваются анизотропные магниторезистивные (АМР) датчики, представляющие собой специальные резисторы, сделанные из тонкой пермаллоевой пленки, вектор намагничивания которой при попадании во внешнее магнитное поле начинает вращаться или изменять угол, меняя сопротивление пленки. При измерениях такую пленку помещают в мост Уитсона и оценивают изменение напряжения, вызванное изменением сопротивления пленки, по которому оценивают силу воздействия магнитного поля. Магниторезистивные датчики обеспечивают точность, превышающую один градус, и могут иметь одну, две или три оси, и их встраивают в электронные компасы.

Необходимо отметить, что многие спутниковые приемники имеют аналогичные встроенные электронные компасы. В спутниковых приемниках обычно используют двухосевой компас, а в некоторых случаях – трехосевые датчики направлений, которые позволяют получать достаточно точные направления даже в случае небольшого наклона. В том случае, когда спутниковый приемник движется со скоростью свыше 10 км/час, он по спутниковым наблюдениям может определять направление своего движения с ошибкой менее одного градуса. При меньших скоростях движения GPS-приемник в комплекте с одной антенной не способен определить направление движения. Поэтому приемник настраивают так, чтобы при достижении им определенной скорости (например, 5 или 10 км в час), он переключался бы с функции направления по компасу на функцию направления, полученного из спутниковых наблюдений, выполненных самим GPS-приемником, а при уменьшении скорости движения приемник возвращался к направлению компаса.

Чтобы спутниковый приемник мог вычислять как географический (истинный), так и магнитный азимуты движения, в приемник встраивают программное обеспечение, которое содержит параметры модели ос-

новного геомагнитного поля Земли. Приемник непрерывно обновляет информацию о направлении на объект по мере того, как пользователь двигается произвольным путем до объекта.

Магнитоиндуктивные датчики направления появились сравнительно недавно – первый патент на них был выдан в 1989 году. Принцип его работы основан на том, что в генераторе колебаний используется катушка, индуктивность которой меняется под воздействием изменения окружающего магнитного поля. Изменение индуктивности катушки вызывает изменение частоты генератора. Таким образом, магнитометр такого типа измеряет магнитное поле по его влиянию на индуктивность катушки проволоки или соленоида.

Для определения направления на северный магнитный полюс (в горизонтальной плоскости) два таких датчика, установленных перпендикулярно друг другу, закрепляют на карданном подвесе, чтобы они располагались в горизонтальной плоскости, а в трехосевом используется еще и креномер. Многие современные автомобильные компасы производятся на основе магнитоиндуктивных датчиков.

7.3. Элементарная теория гироскопа

Задача ориентирования при обеспечении подземного строительства исходными геодезическими данными в настоящее время успешнее всего решается путем применения гироскопического теодолита (гиротеодолита). Конструктивно гиротеодолит представляет собой угломерный инструмент, в котором объединены маятниковый гироскоп как датчик направления истинного меридиана и теодолит, дополненный автоколлимационным окуляром для наблюдений за положением оси гироскопа. Гиротеодолит имеет довольно сложную оптико-механическую схему, состоящую из элементов радиотехники и электроники.

Достоинство гироскопического способа ориентирования – возможность выполнения работ в короткие сроки на дневной поверхности и под землей, независимо от времени года и суток, состояния погоды, в любых географических условиях для широт 0–75°.

Гироскоп – устройство, состоящее из ротора, вращающегося с очень большой скоростью, и системы опор, обеспечивающей движение ротора вокруг неподвижной точки, лежащей на его главной оси.

В практике геодезических работ используют два основных свойства гироскопа: сохранять неизменным направление оси вращения в пространстве (свободный гироскоп) и совершать периодические колебания около положения равновесия, совпадающего с плоскостью меридиана данной точки (маятниковый гироскоп) [111].

Свободный гироскоп. *Свободным* называется гироскоп, имеющий три степени свободы (по осям x, y и z) при отсутствии трения в осях. При этом неподвижная точка совпадает с точкой пересечения осей подвеса ротора и совмещена с центром тяжести гироскопа.

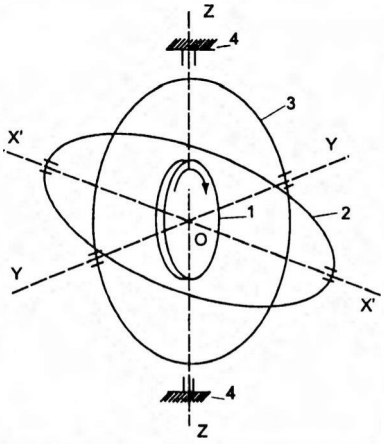


Рис. 7.3. Принципиальная схема свободного гироскопа

На рис. 7.3 показана принципиальная схема свободного гироскопа. Массивный ротор 1 подвешен на двух кольцах 2 и 3, образующих карданный подвес. Таким образом осуществляются три степени свободы гироскопа вокруг трех взаимно перпендикулярных осей: собственное вращение ротора вокруг оси симметрии xx′ в подшипниках кольца 2; вращение ротора вместе с кольцом 2 вокруг оси y в подшипниках кольца 3; вращение ротора вместе с кольцами 2 и 3 вокруг оси z в подшипниках основания 4. Точку пересечения O трех осей называют центром гироскопа, или точкой подвеса. С этой точкой должен совпадать центр тяжести чувствительного элемента (ЧЭ).

Если ротор привести во вращение вокруг оси xx′ с большой частотой вращения (современные гироскопы имеют частоту вращения до 60 тыс. об/мин.), то ось гироскопа приобретает устойчивость и способность сопротивляться изменению ее положения в пространстве. При вращении основания 4 в любом направлении положение оси xx′ гироскопа в пространстве остается неизменным.

Элементарное представление о работе гироскопа дает вращающийся волчок, способный сохранять положение оси вращения неизменным. Если гироскоп установлен на Земле, совершающей суточное вращение вокруг своей оси, а ось гироскопа ориентирована в направлении на какую-либо звезду, то независимо от вращения Земли ось все время будет «следить» за звездой.

Примем это свойство устойчивости оси гироскопа для определения направления меридиана точки наблюдений. Пусть (для простоты рассуждений) гироскоп установлен на экваторе в точке A так, что его ось вращения xx′ в начальный момент времени горизонтальна и приблизительно перпендикулярна направлению меридиана (рис. 7.4, а). Тогда через 6 час. (рис. 7.4, б) плоскость горизонта HH наклонится на 90°, а ось вследствие ее устойчивости останется ориентированной так же, как и в начальный момент. Наблюдателю покажется, что за это время ось наклонилась на 90° . Через 12 час. (рис. 7.4, в) наблюдателю покажется, что ось гироскопа повернулась на 180° относительно начального положения и т. д. За время одного суточного оборота Земли (рис. 7.4, г) ось гироскопа совершит кажущееся движение относительно наблюдателя в этой точке на 360°.

Если ось была установлена под каким-либо углом к меридиану, то в течение суток она опишет в пространстве конус, ось которого будет

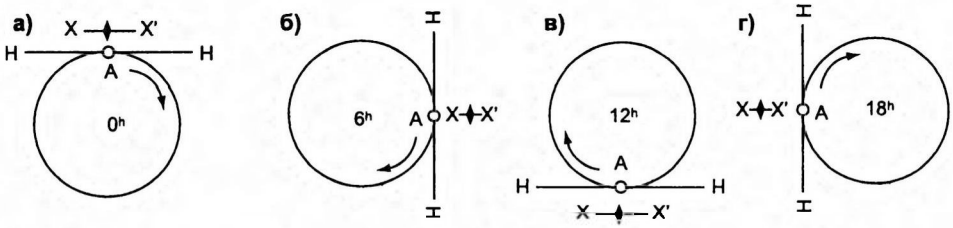


Рис. 7.4. Кажущееся движение оси гироскопа при суточном вращении Земли

лежать в плоскости меридиана. Если же в начальный момент ось была установлена в плоскости меридиана, то она будет казаться наблюдателю неподвижной.

Таким образом, свойство свободного гироскопа сохранять неизменным свое положение в пространстве можно использовать при автономном ориентировании. Однако это свойство сохраняется лишь в идеальном гироскопе. В действительности имеет место трение в осях (подшипниках), а центр тяжести невозможно точно совместить с точкой подвеса.

Под действием внешней силы, приложенной к оси быстро вращающегося гироскопа, ось перемещается в направлении, перпендикулярном к направлению действия силы. В том случае, если действующая сила непрерывна, то и перемещение оси будет непрерывным. Эти перемещения оси, имеющие вид колебаний, называются прецессией и имеют в общем случае для свободного гироскопа незакономерный характер, а величина прецессии в самых совершенных гироскопах достигает 0,5–1° в час. Кроме того, сам процесс наблюдений будет слишком длителен. Поэтому способ ориентирования с помощью свободного гироскопа применяется для геодезических целей лишь в тех случаях, когда требуется сохранение точной ориентировки в течение короткого промежутка времени или же к ориентировке предъявляются пониженные требования (топографический привязчик) и имеется возможность периодически определять поправку за прецессию гироскопа.

Маятниковый гироскоп. Для осуществления гироскопического теодолита в настоящее время чаще всего используют трехстепенной гироскоп, у которого движение по оси уу′ ограничивается применением маятникового груза Q (рис. 7.5).

Пусть груз Q соединен с внутренней рамкой гироскопа так, что всегда приводит ось хх′ в горизонтальное положение. Если отклонить рамку карданного подвеса от плоскости горизонта, в которой она находится в положении равновесия, то при отсутствии вращения ротора рамка будет совершать колебательные движения вокруг оси уу по закону обычного маятника. Поэтому такой гироскоп называют *маятниковым.*

Рассмотрим поведение маятникового гироскопа, установленного на Земле в точке А. Пусть в момент времени t (рис. 7.6, а) ось хх′ гироскопа располагается горизонтально в направлении с востока В на запад З, а

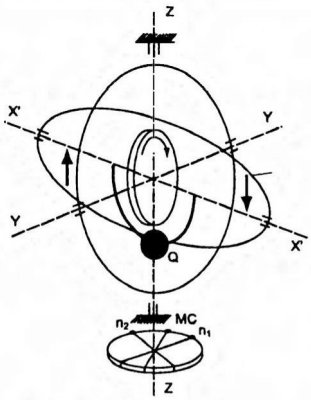


Рис. 7.5. Принципиальная схема маятникового гироскопа

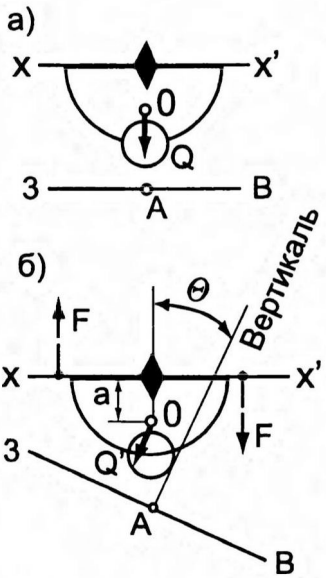


Рис. 7.6. Положение оси маятникового гироскопа, установленного на Земле
а – в начальный момент;
б – через промежуток времени Δt

ротор раскручен в направлении хода часовой стрелки (если смотреть на него с южного конца x′ оси).

Вследствие вращения Земли через бесконечно малый промежуток времени Δt (рис. 7.6-б) восточная часть плоскости горизонта наклонится на угол Θ, и маятник выйдет из состояния равновесия. Под действием груза Q ось гироскопа будет наклоняться, стремясь к горизонтальному положению. Возникает постоянно действующий момент внешней силы, так называемый *маятниковый момент*, равный:

$$M = Q'a, \qquad (7.2)$$

где Q′ – равнодействующая силы тяжести груза Q и ротора; a – расстояние от оси ротора до точки приложения равнодействующей.

Маятниковый момент эквивалентен приложению к оси ротора пары сил F в вертикальной плоскости. По правилу прецессии под действием внешних сил и гироскопического момента, ось гироскопа начнет прецессировать в горизонтальном направлении. В нашем случае северный конец оси x с ускоряющимся движением начнет приближаться к северной части меридиана точки наблюдений. Наибольшая скорость прецессии будет иметь место при совпадении оси с плоскостью меридиана.

Вследствие инерции всей системы ось гироскопа пройдет плоскость меридиана. Теперь в восточной части горизонта окажется северный конец оси x, который по мере вращения Земли будет вынужденно наклоняться под действием груза Q, стремясь к горизонтальному положению. Возникнет момент сил противоположного действия, тормозящий инерционное движение оси. Движение оси прекратится, когда момент количества движения прибора, обусловленный его инерционным движением, окажется равным направляющему моменту, обусловленному вращением ротора и маятниковым моментом. Так как направляющий момент будет возрастать вследствие непрерывного вращения Земли, то начнется прецессия с возрастающей скоростью

конца оси х в обратном направлении, т. е. к плоскости меридиана. Таким образом, ось гироскопа будет совершать периодические колебания относительно положения равновесия, совпадающего с плоскостью меридиана.

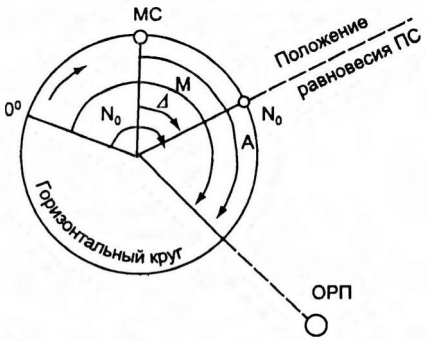


Рис. 7.7. Схема определения гироскопического азимута

Для определения направления меридиана нужно укрепить на основании (Земле) горизонтальный круг (см. рис. 7.7.), а на одном из концов оси гироскопа — индекс, с помощью которого можно взять отсчеты в точках реверсии — при крайнем восточном n_1 и крайнем западном n_2 положениях оси. Среднее из этих отсчетов будет соответствовать положению равновесия, совпадающему с направлением меридиана точки наблюдений, т.е. соответствовать «месту севера» (МС) на горизонтальном круге.

7.4. Принципиальная схема гироскопического теодолита и геодезическая сущность гироскопического азимута

На основании рассмотрения гироскопического способа ориентирования можно наметить следующую структурную схему гиротеодолита. Гиротеодолит (рис. 7.8) должен иметь чувствительный элемент, например, гироскопический датчик маятникового типа; угломерное устройство на штативе со следящей системой, позволяющей производить отсчеты по горизонтальному кругу в моменты реверсии и визирование на земной предмет (ориентирный пункт) для передачи азимута; блок питания с источником питания всех энергетических узлов гиротеодолита.

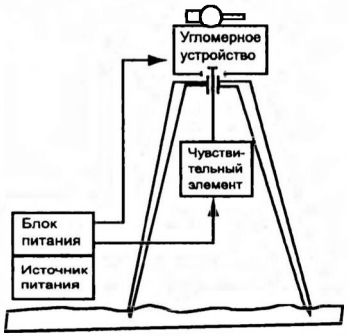


Рис. 7.8. Структурная схема гиротеодолита

При наблюдениях гиротеодолитом все измерения относят к отвесной линии в точке наблюдений и к плоскости горизонта. Следовательно, азимут, определенный гироскопически, тождествен астрономическому азимуту.

Имея отсчеты n_1, n_2 и n_3 точек реверсии по горизонтальному кругу, отсчет положения равновесия N_0 колебаний чувствительного элемента ЧЭ (рис. 7.7) находят по формуле:

$$N_0 = 0{,}5\,[(n_1 + n_2)/2 + (n_2 + n_3)/2\,]. \qquad (7.3)$$

Обычно по конструктивным соображениям отсчетное устройство по горизонтальному кругу располагают под некоторым углом D по от-

ношению к оси вращения ротора гироскопа. Поэтому на горизонтальном круге вычисляют:

$$МС = N_0 - \Delta, \quad (7.4)$$

где Δ – постоянная поправка гиротеодолита.

Астрономический азимут на ориентирный пункт (ОРП):

$$A = M - МС = M + \Delta - N_0, \quad (7.5)$$

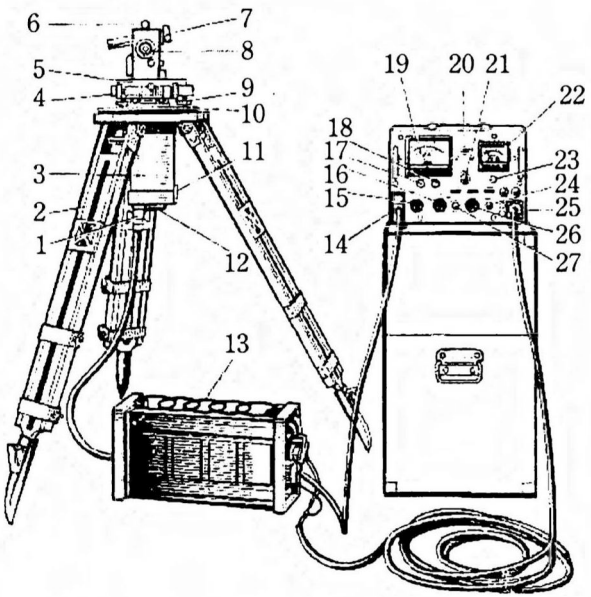
где М – отсчет по горизонтальному кругу при наведении трубы гиротеодолита на ОРП.

Для получения геодезического азимута $A_г$ следует ввести поправку δA в азимут за уклонение отвесной линии:

$$A_г = A + \delta A. \quad (7.6)$$

Для перехода к дирекционному углу α вводят поправку за сближение меридианов γ в проекции Гаусса-Крюгера:

$$\alpha = A_г + \gamma. \quad (7.7)$$



В настоящее время для инженерно-геодезических работ используют гиротеодолиты ГИ-Б1 (рис. 7.9) и ГИ-Б2, а также маркшейдерский гирокомпас МТ-1 и гиротеодолит МВ-2М. Средняя квадратическая ошибка определения азимута с помощью этих приборов составляет 20″.

Рис, 7.9. Гиротеодолит ГИ-Б1

1 – штепсельный разъем; 2 – штатив; 3 – гироблок; 4 – бесконечное наводящее устройство; 5 – алидада; 6 – дополнительный окуляр теодолита; 7 – зрительная труба; 8 – окуляр; 9 – подъемные винты со сферическими подпятниками; 10 – трегер теодолита; 11 и 12 – арретиры I и II; 13 – аккумулятор; 14 – штепсельный разъем; 15 и 16 – переключатель фазы и контроль; 17 – установка нуля; 18 – регулировка напряжения; 19 – миллиамперметр; 20 – блок питания; 21 – тормоз; 22 – амперВольтметр; 23 – переключатель ток-напряжение; 24 – мотор; 25 – штепсельный разъем; 26 – термостат; 27 – освещение

ГЛАВА 8
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕФРАКЦИИ

Современные высокоточные геодезические приборы обеспечивают инструментальную точность 1–2″ и даже доли угловой секунды, а инструментальная точность линейных измерений составляет 1–3 мм на км. Точность получаемых результатов полевых измерений, как правило, значительно ниже, чем инструментальная точность используемых приборов за счет влияния внешних условий, и в первую очередь вертикальной рефракции. Практически во всех руководствах к приборам предлагается вводить в результаты измерений поправку за рефракцию с учетом так называемого «стандартного коэффициента» рефракции k_c = +0,14. Это не совсем корректно, так как в приземном слое атмосферы, где в основном выполняются геодезические измерения, коэффициент рефракции, полученный на основании многочисленных экспериментальных исследований различными авторами, может иметь значения от +4,28 до –4,40 [103]. Такая рефракция может вносить значительные искажения не только в результаты угловых, но и в результаты линейных измерений. Геодезические работы, как правило, выполняются в дневное время при высотах визирного луча не более нескольких метров. При этих условиях наблюдений днем значение угла рефракции отрицательно, и абсолютная величина, как правило, значительно больше k_c. К настоящему времени наиболее полные исследования, основанные на обширных экспериментах, в нашей стране выполнены ЦНИИГАиКом и на геодезическом факультете Львовского политехнического института [74–77, 81, 103–104, 115–118, 140–142, 148]. Для практического применения предложено много методов определения вертикальной рефракции, однако при использовании современного высокоточного автоматизированного геодезического оборудования эти методы, как правило, не используются из-за их сложной реализации и невысокой точности (см. 8.4–8.6).

В работах [58–70, 148, 163–165] предлагается определять рефракцию на основе измерения статистических характеристик электромагнитных или звуковых волн, прошедших слой турбулентной атмосферы. Предложенная методика основана на статистической теории турбулентности атмосферы, что позволяет автоматизировать процесс определения рефракции в реальном масштабе времени, т. е. в момент измерений на любой трассе. Поэтому в данной главе наибольшее внимание уделено теоретическому обоснованию связи между рефракцией и флуктуациями параметров электромагнитной волны. Предложены различные динамические методы определения рефракции, что, может быть, даст

возможность создать еще более совершенные приборы, позволяющие в значительной степени компенсировать влияние внешних условий, и в том числе рефракции, на результаты измерений.

8.1. Общие сведения из физики атмосферы как передающей среды

Атмосфера не является однородной средой, причем ее свойства меняются как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Атмосферный воздух до высоты 90 км представляет собой смесь различных газов, основными из которых являются азот (78,1 %), кислород (21,0 %) и аргон (0,9 %). В атмосферный воздух входит также водяной пар, относительное содержание которого изменяется от 0 до 7 % в зависимости от различных условий. Плотность воздуха с высотой непрерывно уменьшается, и элементы, составляющие атмосферу Земли, постепенно переходят в межпланетное пространство.

Атмосфера всегда находится в непрерывном движении, начальной причиной которого является неодинаковое нагревание различных участков земной поверхности и соответствующих участков атмосферы. Гладкое, упорядоченное, предсказуемое, движение называется ламинарным. Наблюдения показывают, что при определенных значениях безразмерных параметров, определяющих режим течения, ламинарное течение становится неустойчивым. В простейших случаях подобное явление можно предсказать с удовлетворительной точностью. Это означает, что присутствующие в течении малые возмущения начинают расти и растут до тех пор, пока не становятся настолько большими, что должны рассматриваться как нелинейные. При этом они становятся трехмерными и обладают широким спектром частот. Локальные движения превращаются в турбулентные «пятна», которые быстро распространяются в окружающей среде, приводя в конечном счете к турбулизации всего потока. Явления перехода от ламинарного движения к турбулентному подробно описано в [109, 110].

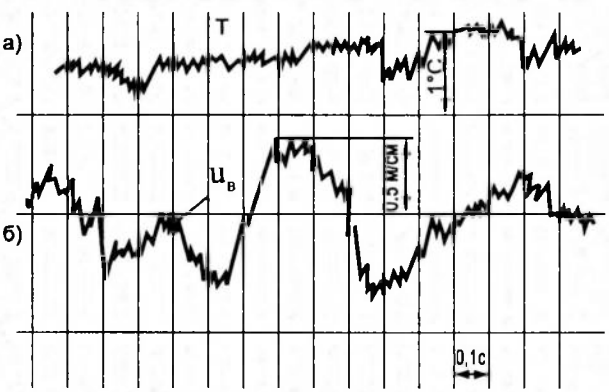


Рис. 8.1. Фрагменты синхронной записи
а) температуры T воздуха и б) вертикальной компоненты скорости ветра $u_в$, которые выполнены с помощью малоинерционной аппаратуры [48]

Турбулентность в атмосфере вызвана перемешиванием теплых и холодных масс возду-

ха, что можно видеть, наблюдая, например, дымовые струи. Вследствие этого возникают пульсации полей метеоэлементов – температуры, давления, влажности воздуха, скорости ветра. В качестве иллюстрации на рис. 8.1 приведены фрагменты синхронной записи температуры T воздуха (рис.8.1, а) и вертикальной компоненты скорости ветра $u_в$ (рис. 8.1, б), которые выполнены с помощью малоинерционной аппаратуры.

Из рис. 8.1. видно, что скорость ветра и температура воздуха непрерывно и беспорядочным образом меняются. Турбулентность атмосферы вызывает флуктуации параметров электромагнитных волн, распространяющихся в атмосфере.

Теоретические и экспериментальные исследования влияния турбулентности атмосферы на распространение электромагнитных волн светового диапазона получили основное развитие с средины XX века, что связано как с развитием техники, так и с успехами статистической теории турбулентности.

Основоположником теории турбулентности является английский физик О. Рейнольдс. Согласно исследованиям О. Рейнольдса, упорядоченное (ламинарное) течение газа переходит в турбулентное, если отношение инерционных сил в некотором объеме газа к силам вязкости, приложенным к границам этого объема, превышает некоторое критическое значение. Это отношение, названное числом (или параметром) Рейнольдса, является величиной безразмерной и определяется формулой:

$$Re = uL/\mu, \qquad (8.1)$$

где u – характерная скорость; L – характерный масштаб движения, равный размеру потока (ширине струй воздуха), μ – коэффициент кинематической вязкости. Например, для течения в круглой трубе: L – ее радиус, u – скорость потока на оси; а для приземного слоя атмосферы: L – высота над поверхностью земли, u – скорость ветра на этой высоте и т.д.

При постепенном увеличении скорости движения воздуха и достижении критического значения числа Рейнольдса ламинарное течение утрачивает устойчивость, что приводит к возникновению колебательных движений воздушных струй. Оценка чисел Рейнольдса, характеризующих переход из ламинарного течения газа в турбулентное, для атмосферного движения показывает, что все они имеют турбулентный характер. (Например, для приземного слоя воздуха на высоте h = 2 м практически всегда наблюдается сильная турбулентность, так как характерные скорости ветра ~1...5 м/с и числа Рейнольдса очень велики $Re = (2,5–7)\cdot 10^5$).

Амплитуды колебаний не превышают некоторого конечного значения. При этом образуются вихри, размер которых имеет порядок

исходного потока l_0 .Эти вихри статистически однородны и изотропны. Число Рейнольдса, характеризующее движение образовавшихся вихрей, всегда меньше, чем число Рейнольдса исходного потока. При увеличении скорости воздушного потока колебательное движение также теряет устойчивость, и возникшие ранее крупные вихри дробятся на более мелкие, которые имеют более высокие частоты колебаний с различными фазами и ограниченными амплитудами. В том случае, если число Рейнольдса, характеризующее движение вихрей, больше критического, вихри дробятся на еще более мелкие до тех пор, пока не образуют вихрей с числом Рейнольдса меньше критического. Такие вихри не распадаются и являются устойчивыми. Таким образом, чем больше число Рейнольдса исходного потока, тем больше актов дробления и тем меньше размер l_0 самого малого вихря.

Линейный горизонтальный размер L вихря (линейный размер объема воздуха с одним знаком вертикальной скорости) может изменяться непрерывно и принимать различные значения. Однако каждому явлению соответствует такой размер L, который определяет наиболее существенные черты рассматриваемого явления.

Однородность и изотропность атмосферы нарушаются движениями большего (планетарного) масштаба. Если размер (масштаб) области, в которой рассматривается турбулентное движение, значительно меньше масштаба L основного движения, то в пределах такой области общий перенос воздушной массы не сказывается на турбулентном движении. Статистические характеристики в рассматриваемой области зависят только от расстояния r между рассматриваемыми точками (при условии $r << L$).

Установлено, что чем больше горизонтальные размеры области, в пределах которой вертикальная скорость потока сохраняет определенный знак, тем меньше абсолютная величина скорости. «Неупорядоченными» (пульсационными) вертикальными скоростями обладают массы воздуха, имеющие размеры от нескольких сантиметров до десятков и сотен метров. Характерная вертикальная скорость таких струй составляет, как правило, несколько метров в секунду. Линейный размер L_0 наиболее крупного вихря, обычно называемый внешним масштабом турбулентности, для приземного слоя атмосферы может быть вычислен по эмпирической формуле:

$$L_0 = \chi h, \qquad (8.2)$$

где χ – постоянная Кармана ($\chi = 0{,}4$); h – высота над земной поверхностью. Размер наименьших находящихся в потоке вихрей l_0, кинетическая энергия которых полностью диссипирует в теплоту, может быть найден из соотношения:

$$l_0 = \sqrt{\mu^2 / \varepsilon}, \qquad (8.3)$$

где μ – коэффициент кинематической вязкости; ε – скорость диссипации энергии. В приземном слое атмосферы значение l_0 имеет порядок 1 мм.

Внешний масштаб турбулентности L_0 соответствует расстоянию, на котором сохраняется корреляция между флуктуациями. Масштаб l_0 характеризует изменчивость случайного поля на малых расстояниях. Для вихрей, размеры которых заключены между l_0 и L, $Re >> 1$, и силы инерции, способствующие возникновению турбулентности, значительно больше сил вязкости, стабилизирующих давление.

Турбулентное движение воздуха можно представить как совокупность большого числа переносимых ветром вихрей различного размера, начиная от самых больших, имеющих характерный масштаб L_0 (соответствующий внешнему масштабу турбулентности), который определяется потоком в целом, и кончая самыми мелкими, размером l_0. Величина l_0 называется внутренним масштабом турбулентности.

Турбулентность атмосферы имеет следующие характеристики и свойства.

1. Турбулентность является вихревым движением с диссипацией. При таком движении механическая энергия переходит во внутреннюю (тепловую).
2. Турбулентность трехмерна, так как взаимодействие между вихрями приводит к трехмерности и нелинейности течения.
3. Турбулентность нелинейна. Это означает, что переход энергии от вихрей одного размера к вихрям другого размера осуществляется только путем нелинейных взаимодействий.

В связи с этим при изучении полей метеорологических элементов и флуктуации показателя преломления воздуха используют методы математической статистики и теории вероятностей. При исследовании полей метеорологических элементов часто используют понятие случайного процесса, который может быть описан не точными уравнениями, а с помощью осредненных статистических характеристик. Какое-либо физическое явление можно описать в любой момент времени осреднением величин по множеству выборочных функций, представляющих данный процесс.

При изучении полей метеорологических элементов, изменяющихся под действием турбулентности, устойчивые средние значения обычно получают при осреднении по интервалу времени порядка 10 мин. При операции осреднения необходимо учитывать, что интервал осреднения должен быть тем больше, чем больше размер (масштаб) неоднородности в поле того или иного элемента. Обычно осреднение осуществляют по времени или по пространству, так как в условиях эксперимента осреднение по ансамблю трудно осуществимо. Турбулентный обмен

обусловлен неоднородностями атмосферы в полях метеоэлементов, размер которых не превышает сотен метров (иногда даже километров). В атмосфере наблюдаются и более крупные неоднородности размером от сотен метров до десятков километров (мезотурбулентность), а также от десятков до тысяч километров (макротурбулентность).

Для описания свойств случайного процесса используют следующие четыре статистические функции: а) корреляционную; б) структурную; в) спектральную; г) функцию распределения.

Одной из характеристик случайного процесса являются корреляционные функции, которые подразделяют на временные и пространственные.

Временная корреляционная функция характеризует взаимную связь между пульсациями случайной функции в различные моменты времени и является математическим ожиданием произведения

$$\langle \varphi'(t_1)\, \varphi'(t_2) \rangle = B(t_1, t_2) = B(\tau), \qquad (8.4)$$

где $\varphi'(t) = \varphi(t) - \langle \varphi(t) \rangle$ – отклонение (пульсация) случайной функции от ее среднего значения в различные моменты времени t (среднее значение обозначается $\langle\ \rangle$); t_1 и t_2 – моменты времени, для которых определено множество значений функций $\varphi(t)$.

В том случае, когда среднее значение случайной функции постоянно, корреляционная функция $B(t_1, t_2)$ зависит только от разности моментов времени. Такую случайную функцию называют стационарной.

Пространственная корреляционная функция характеризует взаимную связь между пульсациями случайной функции в фиксированный момент времени, но в различных точках пространства и записывается в виде:

$$B(r_1, r_2) = \langle [u(r_1) - \langle u(r_1) \rangle]\, [u(r_2) - \langle u(r_2) \rangle] \rangle, \qquad (8.5)$$

где u (r) и $\langle u(r) \rangle$ – соответственно мгновенное и среднее значения метеорологического элемента в точке, положение которой характеризуется радиусом-вектором r (x, y, z).

Поле является однородным, если среднее значение метеорологических элементов постоянно, а корреляционная функция не изменяется при одновременном смещении пары точек на одну и ту же величину.

Однородное поле является изотропным, если свойства турбулентного движения одинаковы по всем направлениям и зависят только от расстояния между точками.

Корреляционная функция $B(t_1, t_2) = B(\tau)$ достигает максимального значения, равного 1, когда $\tau = t_2 - t_2 = 0$; при возрастании $\tau (\tau \to \infty)$ $B(\tau)$ уменьшается и имеет место соотношение $B(\tau) \to 0$ при $\tau \to \infty$. Под временем корреляции понимают время, в течение которого происходит

заметное уменьшение корреляционной функции (например, отношение $B(\tau)/B(0)$ убывает до 0,1).

При изучении полей метеоэлементов часто приходится иметь дело с нестационарными процессами, при изучении которых довольно сложно выявить различия между изменениями среднего значения функции и медленными пульсациями. Реальные процессы никогда не бывают точно стационарными или однородными хотя бы потому, что время измерений ограничено. При изучении оптических свойств атмосферы всегда приходится иметь дело с относительно быстрыми колебаниями измеряемой величины, накладывающимися на ее медленные изменения. Существенные трудности возникают в том случае, когда масштабы этих двух типов колебаний достаточно близки. Корреляционная функция в основном отражает связь между крупными неоднородностями, а свойства мелкомасштабных неоднородностей отражаются лишь в мелких деталях. Для описания связи между мелкомасштабными неоднородностями А.М. Колмогоров предложил ввести структурные функции, которые имеют вид:

$$D(t_1, t_2) = \langle[\varphi(t_1) - \varphi(t_2)]^2\rangle. \qquad (8.6)$$

Структурные функции характеризуют интенсивность возмущений, период которых не больше интервала $(t_1 - t_2)$. В том случае, когда интервал времени $(t_1 - t_2)$ не очень велик, медленное изменение функции $\varphi(t)$ не оказывает влияния на значение структурной функции.

В общем случае (при изучении нестационарных процессов) связь между структурной функцией и корреляционной очень сложна, но для стационарного процесса эта связь выражается следующими соотношениями:

$$D(00) = 2B(0), \qquad (8.7)$$

$$B(\tau) = 1/2[D(0) - D(\tau)]. \qquad (8.8)$$

Структурная функция с увеличением τ растет. Для оценки интенсивности любого случайного процесса находят среднее значение квадрата ψ_φ^2, которое представляет собой среднее всех значений квадрата процесса в пределах данной реализации:

$$\psi_\varphi^2 = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_0^T \psi^2(t)dt, \qquad (8.9)$$

где T – время наблюдения (длина реализации). Иногда случайный процесс рассматривают в виде суммы двух составляющих – динамической (или флуктуационной) и статической (не зависящей от времени), которая представляет собой среднее из всех значений процесса:

$$\langle\varphi(t)\rangle = \mu_\varphi = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_0^T \varphi(t)\,dt. \qquad (8.10)$$

Флуктуационная составляющая определяется величиной, равной среднему квадрату отклонений от среднего значения:

$$\sigma_{\varphi}^{2} = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_{0}^{T} [\varphi(t) - \mu_{\varphi}]^{2} dt \ . \qquad (8.11)$$

Раскрывая скобки в подинтегральной функции (8.11) находим, что дисперсия – δ_{φ}^{2}, равна разности между средним значением квадрата ψ_{φ}^{2}, и квадратом среднего значения μ_{φ}^{2}, т.е.

$$\delta_{\varphi}^{2} = \psi_{\varphi}^{2} - \mu_{\varphi}^{2}. \qquad (8.12)$$

Общая частотная структура спектрального процесса описывается спектральной плотностью C(f), которая может быть выражена через среднее значение квадрата значений процесса ψ_{φ}^{2} в интервале частот от f до f + Δf:

$$\psi_{\varphi}^{2}(f, \Delta f) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_{0}^{T} \varphi(t, f, \Delta f)\, dt, \qquad (8.13)$$

где φ(t, f, Δf) – составляющие функции φ(t), имеющие частоты в интервале от f до f + Δf . При малых Δf спектральную плотность C(f) можно получать, используя приближенные равенства:

$$C(f)\Delta f \sim \psi_{\varphi}^{2}(f, \Delta f). \qquad (8.14)$$

Функция C(f) всегда действительна, неотрицательна и связана с корреляционной функцией B(x) преобразованием Фурье для действительных частей:

$$C(f) = 2\int_{0}^{\infty} B(\tau)e^{-i2\pi f\tau} d\tau = 2\int_{0}^{\infty} B(\tau)\cos 2\pi f\tau \, d\tau. \qquad (8.15)$$

Одной из важных характеристик является плотность распределения, которая характеризует вероятность того, что значения процесса в произвольный момент времени будут заключены в определенном интервале.

Если мы имеем случайную функцию φ(t), полученную за время наблюдения T, то суммарная продолжительность нахождения процесса $\varphi_{k}(t)$ в интервале (φ, φ + Δφ) равна $\sum_{i=0}^{k} \Delta t$. Вероятность такого события при T→ ∞ можно записать следующим образом:

$$P[\varphi < \varphi(t) < (\varphi + \Delta\varphi)] = \lim_{T\to\infty} \frac{\sum_{i=1}^{k} \Delta t}{T}. \qquad (8.16)$$

Если Δφ мало, то плотность распределения:

$$P(\varphi) = \lim_{\Delta\varphi\to 0} \frac{P[\varphi < \varphi(t) \le \varphi + \Delta\varphi]}{\Delta\varphi}. \qquad (8.17)$$

8.2. Эффекты, возникающие при распространении света в атмосфере

Турбулентность атмосферы характеризуется случайным изменением полей метеорологических элементов (температуры T, давления P, влажности e и др.), которые вызывают случайные изменения показателя преломления n воздуха. В свою очередь случайные изменения показателя преломления вызывают флуктуации параметров световой волны (амплитуды, частоты, фазы, направления и т. д.). Они являются источниками искажений и погрешностей при работе различных геодезических приборов, принцип действия которых основан на использовании электромагнитных волн.

В зависимости от длины волны света λ показатель преломления n при температуре воздуха T = 273°K, давлении P = 1013 мб и влажности e =0 мб может быть рассчитан по формуле:

$$n_{0,760} = 1 + [2876{,}04 + (48{,}86/\lambda_v^2) + (0{,}68/\lambda_v^4)]10^{-7}, \qquad (8.18)$$

где λ_v – длина волны света, соответствующая максимуму спектральной чувствительности приемника излучения (мкм). Значение показателя преломления воздуха немного превышает единицу, поэтому для характеристики преломляющих свойств обычно используют индекс рефракции $N(\lambda)$.

$$N(\lambda)=(n_\lambda - 1)\cdot 10^6. \qquad (8.19)$$

Для оптического диапазона длин волн λ от 0,2 до 20 мкм индекс рефракции может быть рассчитан по формуле:

$$N(\lambda) = 77{,}6\ P/T + 0{,}584\ P/T\lambda^2 - 0{,}06\ e \qquad (8.20)$$

по известным температуре T° K, атмосферному давлению P, выраженному в мб и парциальному давлению водяного пара e. Для сухого воздуха и стандартных условий $N(\lambda)= N_0 = 273$. Зависимость $N_0(\lambda)$ от длины волны света для сухого воздуха и стандартных условий приведена на рис. 8.2.

В табл. 8.1 приведены значения индекса показателя преломления $N(\lambda) = (n - 1)\cdot 10^6$ для сухого воздуха.

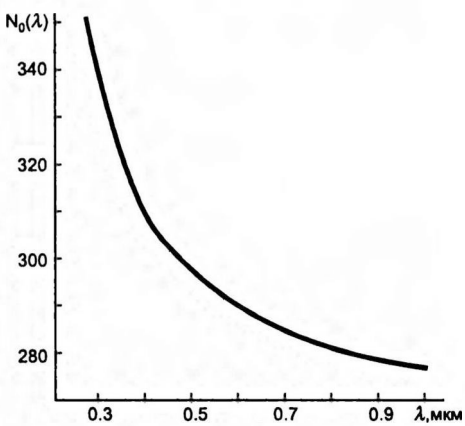


Рис. 8.2. Зависимость индекса показателя преломления $N_0(\lambda)$ от длины волны λ

Таблица 8.1

Таблица величин $N(\lambda) = (n - 1)\cdot 10^6$ для сухого воздуха ($\lambda = 0{,}5$ мкм)

Давление, мм рт. ст.	Температура, °С								
	–40	–30	–20	–10	0	+10	+20	+30	+40
780	354,0	339,4	326,0	313,5	302,0	291,3	281,3	272,0	263,3
760	344,9	330,7	317,7	305,5	294,3	283,8	274,1	265,0	256,6
740	335,8	321,9	309,3	297,4	286,5	276,4	266,9	258,1	249,8,
720	326,8	313,2	300,9	289,4	278,8	268,9	259,7	251,1	243,1
700	317,8	304,5	292,5	281,3	271,0	261,4	252,5	244,1	236,3
680	308,6	295,8	284,1	273,3	263,2	254,2	245,2	237,2	229,6
660	299,5	287,1	275,8	265,3	255,0	246,5	238,0	230,2	222,8
640	290,4	278,4	267,4	257,2	247,8	239,0	230,8	223,2	216,0
620	281,3	269,6	259,0	249,2	240,0	231,5	223,6	216,2	209,3
600	272,2	260,9	250,7	241,1	232,2	224,1	216,4	209,3	202,6
580	263,2	252,2	242,4	233,1	224,5	216,6	209,2	202,3	195,8
560	254,1	243,5	234,0	225,1	216,8	209,1	202,0	195,3	189,0
540	245,0	234,8	225,6	217,0	209,0	201,7	194,8	188,4	182,3
520	235,9	226,1	217,2	209,0	201,7	194,2	187,6	181,4	175,6
500	226,8	217,4	208,8	200,9	193,5	186,7	180,3	174,4	168,8
450	204,1	195,7	188,0	180,8	174,2	178,0	162,2	156,9	151,9
400	181,4	173,9	167,1	160,7	154,8	149,4	144,2	139,5	135,0
350	158,7	152,2	146,2	140,6	135,6	131,1	126,2	122,0	118,2
300	136,1	130,5	125,3	120,5	116,1	112,1	108,2	104,6	101,3

Так как давление водяного пара не превышает 40—50 мб, а в средних широтах редко достигает 15—20 мб, то вклад водяного пара в показатель преломления крайне мал, и поэтому при расчетах не принимается во внимание.

Известно, что на изменение показателя преломления оказывает влияние изменение температуры. При изменении температуры T на 1 °С показатель преломления n изменяется на величину $\Delta n \sim 10^{-6}$. Как правило, среднее значение температуры T зависит от координат (например, от высоты h над земной поверхностью). Величину, характеризующую изменение температуры с высотой, называют вертикальным температурным градиентом dT/dh. Его значение зависит от условий теплообмена между приземным слоем воздуха и подстилающей поверхностью.

При повышении температуры земной поверхности повышается и температура воздуха, но с некоторым запаздыванием. Суточная амплитуда колебаний тем больше, чем ближе слой воздуха к поверхности земли.

Если средняя температура окружающей среды постоянна, то при турбулентном движении перемешиваются массы воздуха с одинаковой температурой, и поэтому флуктуации температуры отсутствуют.

В случае, когда в различных точках наблюдается неодинаковая температура, при турбулентном перемешивании отдельные массы воздуха, характеризуемые некоторым значением температуры T_1, оказываются в точке, где до этого находились массы воздуха с другим значением температуры T_2, т.е. возникают пульсации температуры. В зависимости от высоты над поверхностью земли изменяются значения модуля пульсаций температуры (чем ближе слой воздуха к поверхности, тем больше пульсации температуры).

Если имеется градиент температуры, то между двумя точками, находящимися на различной высоте, существует систематическая разность температур:

$$\Delta T_c = \frac{dT}{dh}\Delta h. \qquad (8.21)$$

Между этими же точками одновременно наблюдается и случайная разность температур ΔT_n, которая подчиняется «закону 2/3»:

$$\Delta T_n^2 = C_T^2 \cdot \Delta h^{2/3}, \qquad (8.22)$$

где C_T^2 – структурная характеристика поля температур, имеющая размерность град$^2 \cdot$ см$^{-2/3}$.

Если разность высот Δh между точками мала, то величина $C_T^2\Delta h^{2/3}$ намного превышает $(dt/dh)^2 \cdot \Delta h^2$, т.е. случайные разности температур ΔT_n намного больше систематических ΔT_c. Вместе с тем всегда можно найти такое значение $\Delta h = \Delta h_0$, при котором систематическая и случайная разности температур равны и при $\Delta h > \Delta h_0$, случайная разность будет уже меньше систематической.

Величина Δh_0, при которой случайная и систематическая разности температур равны, играет роль масштаба перемешивания и называется внешним масштабом турбулентности L_0.

Принимая во внимание, что модуль градиента температуры и пульсации температуры зависят от высоты воздушного слоя над поверхностью земли, можно сделать вывод, что и масштаб перемешивания (внешний масштаб турбулентности L_0) также пропорционален высоте. Согласно экспериментальным исследованиям, зависимость между вертикальным масштабом перемешивания $\Delta h_0 = L_0$ и высотой h выражается формулой:

$$L_0 = 0{,}4h. \qquad (8.23)$$

«Закон 2/3» выполним лишь для расстояний ρ, не превышающих масштаба перемешивания L_0. Структурная характеристика поля показателя преломления C_n^2 может быть вычислена на основе структурной характеристики поля температур C_T^2 [48]:

$$C_n = 10^{-6}\frac{K(\lambda) < P >}{< T >^2} C_T, \qquad (8.24)$$

где <T>,<P> – средние значения температуры и давления; величина C_T выражена в град · $см^{-1/3}$; C_n – в $см^{-1/3}$; P – в миллибарах (1 мб = 102 Па). K(λ) – величина, характеризующая зависимость показателя преломления воздуха от длины волны λ, может быть найдена по формуле [48]:

$$K(\lambda) = N_\lambda T_0/P_0. \qquad (8.25)$$

Здесь $N_\lambda = 77{,}6P/T + 0{,}584P/T\lambda^2 - 0{,}06\,e$; $T_0 = 288$ °K; $P_0 = 1013$ мб = $1{,}01325 \cdot 10^5$ Па, e – парциальное давление водяного пара. В табл. 8.2 приведены значения K(λ) для различных длин волн.

Таблица 8.2

Зависимость K(λ) от длины волны λ

λ, мм	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
K(λ) град/ мбар	82,6	80,4	79,8	78,7	78,4	78,2	78,0	77,9	77,8	77,7

Флуктуации показателя преломления воздуха, возникающие при турбулентном перемешивании слоев с различной температурой, приводят к значительным случайным искажениям поля световой волны, причем наибольшие искажения наблюдаются при распространении волн в приземном слое атмосферы.

В геодезии во многих случаях используются лазерные приборы, и поэтому работы, связанные с прохождением света в турбулентной атмосфере, очень важны как для разработчиков приборов, так и для специалистов, работающих с этими приборами, так как точность результатов измерений во многом определяется влиянием внешних условий.

Колебания («дрожание») светового пучка вызваны флуктуациями угла прихода световой волны. Под флуктуациями угла прихода пучка понимаются случайные изменения угла между оптической осью приемного объектива и приходящим в объектив световым пучком. Угол прихода светового пучка определяется как отношение полярной координаты «центра тяжести» светового пятна, т. е. центра области в световом пятне с максимальной интенсивностью к фокусному расстоянию объектива.

На основании теоретических и экспериментальных данных установлено, что среднее квадратическое значение флуктуации угла при-

хода δ_α для горизонтальной трассы может быть вычислено по формуле [48]:

$$\delta_\alpha^2 = 2{,}84\, C_n^2 L (2R)^{-1/3} \varphi(\alpha_R)$$

или

$$\delta_\alpha = 1{,}69\, C_n L^{1/2} (2R)^{-1/6} \varphi(\alpha_R)^{1/2}, \qquad (8.26)$$

где $\varphi(\alpha_R)$ – числовая функция, зависящая от длины трассы и приемной апертуры, C_n^2 – структурная характеристика поля показателя преломления атмосферы вблизи земной поверхности, которая зависит от условий распространения светового пучка; R – радиус объектива приемника; λ – длина волны излучения.

Согласно [106] среднее квадратическое значение флуктуации угла прихода при отражении от трипельпризмы, установленной на конечной точке трассы длиною L, в два раза больше среднеквадратического значения флуктуаций угла прихода при наблюдениях точечного источника света на трассе такой же длины, т.е.:

$$\sigma_{\alpha(\text{отр})} = 2\delta_\alpha = 2 \cdot 1{,}69\, C_n L^{1/2} (2R)^{-1/6} \varphi(\alpha_R)^{1/2} =$$
$$= 3{,}38\, C_n L^{1/2} (2R)^{-1/6} \varphi(\alpha_R)^{1/2}. \qquad (8.27)$$

Величину $\varphi(\alpha_R)$, характеризующую осредняющее действие приемной апертуры, можно определить из графика, представленного на рис. 8.3. Безразмерная величина α_R зависит от длины трассы L и радиуса приемного объектива, т.е. $\alpha_R = k^{1/2} R / L^{1/2}$ (k – волновое число, $k = 2\pi/\lambda$). Как видно из рис. 8.3, $\varphi(\alpha_R)$ может принимать значения от 1 до 2 в зависимости от соотношения между длиной трассы L и размером приемного объектива. Например, если R = 5 см, L = 2,5 км, то $\alpha_R \sim 3$. Этому значению α_R соответствует $\varphi(\alpha_R) = 2$.

Геодезические приборы обычно имеют R ~2 см и работают на трассах протяженностью до 1 км. Внешние условия начинают вносить значительные искажения в результаты геодезических измерений на трассах длиной более 100 м. Оценка значений α_R для трасс протяженностью 100 м—1 км, показывает, что все они соответствуют $\varphi(\alpha_R)$ ~2,0.

Амплитуда колебаний A светового пучка зависит от величины флуктуаций углов прихода светового пучка и расстояния. В качестве примера на рис. 8.4 показана зависимость значений коле-

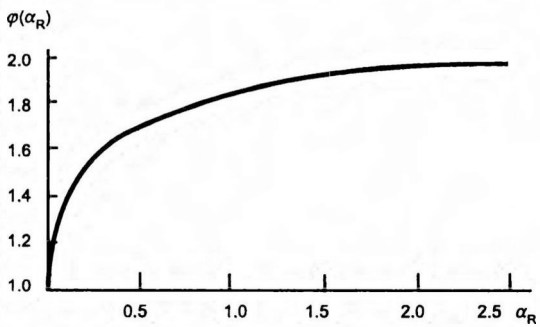


Рис. 8.3. График функции $\varphi(\alpha_R)$, характеризующей осредняющее действие приемного объектива радиуса R на трассе протяженностью L [48]

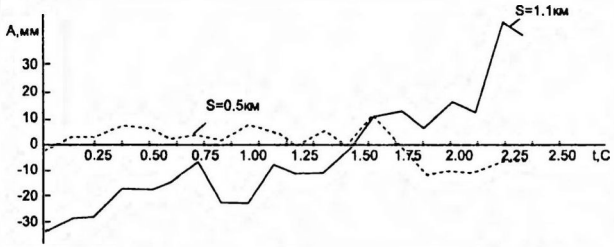


Рис. 8.4. Флуктуации амплитуды колебаний для трасс протяженностью 1,1 км и 0,5 км.
Результаты получены при обработке киносъемки, выполненной с интервалом 1/8 с

баний светового пучка в вертикальной плоскости от длины трассы для высоты пучка h = 2 м над ровной подстилающей поверхностью. Результаты получены при обработке киносъемки, выполненной с интервалом 1/8 с на трассах длиной 0,5 и 1,1 км за время 2,5 с. Амплитуды колебаний пучка на одной и той же трассе изменялись в зависимости от состояния погоды. Наиболее интенсивные колебания пучка лазерного излучения наблюдались в жаркие солнечные дни, менее интенсивные – в пасмурную погоду, причем частота колебаний ночью заметно уменьшалась. Из-за турбулентности атмосферы происходит «расплывание» профиля средней интенсивности светового пучка вследствие рассеяния на турбулентных пульсациях показателя преломления, что приводит к падению интенсивности на оси пучка по сравнению с той, которая должна была быть в однородной среде.

Эффективной шириной пучка считают размер, на котором интенсивность падает в e раз (при фиксированном расстоянии). Квадрат диаметра пучка складывается из квадрата диаметра в однородной среде и среднего квадрата поперечного смещения пучка, вызываемого турбулентностью атмосферы.

Влияние размера приемной апертуры при фиксированном потоке на принимаемый сигнал сказывается двояко: с одной стороны – с увеличением входного диаметра растет дефокусировка из-за размытия светового пучка, создаваемого турбулентностью, а с другой стороны – интенсивность в центре пучка на фокусном расстоянии увеличивается пропорционально $(2R)^2$. Предельное значение интенсивности, которое может быть получено в фокусе на оси оптической системы, равно:

$$\langle I_F \rangle = 0{,}465\, P_0 \lambda^{2/5} / F \,.\, Q^{6/5}, \qquad (8.28)$$

где P_0 – фиксированный поток, λ – длина волны, F – фокусное расстояние приемного объектива, $Q = 4C_n^2 F$.

Экспериментально установлено, что при увеличении апертуры наступает так называемое «предельное насыщение» фокусировки, т. е. при дальнейшем увеличении апертуры интенсивность в фокусе не увеличивается [85, 137, 143, 145].

При учете влияния турбулентности на прохождение лазерного излучения в атмосфере необходимо также принимать во внимание отношение поперечного размера лазерного пучка D к размерам L турбулен-

тных неоднородностей (вихрей). В том случае, когда $D < \sqrt{\lambda L}$, лазерный пучок преломляется как единое целое, и распределение интенсивности в поперечном сечении пучка не нарушается. В случае пульсации показателя преломления нарушается когерентность лазерного излучения, при этом в сечении пучка лучи интерферируют между собой, в результате чего создается визуальный эффект «кипения» (рис. 8.5). Эффект «кипения» обусловлен неоднородностями лазерного излучения, вызывающими флуктуации интенсивности по сечению пучка. При этом более яркие участки чередуются с менее яркими участками, которые хаотически движутся по сечению.

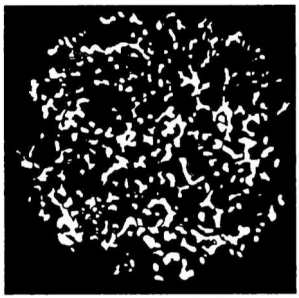
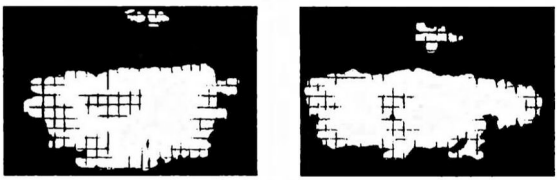


Рис. 8.5. «Кипение» светового пятна, создаваемого пучком лазерного излучения на трассе протяженностью 1,1 км



а) б)

Рис. 8.6. «Дыхание» светового пятна, создаваемого пучком лазерного излучения на трассе, протяженностью 1,1 км

Поперечное сечение пучка на снимке (а) отличается случайным образом от поперечного сечения пучка на снимке (б). Фотосъемка светового пятна выполнена с интервалом в 0,5 с

Другой эффект, называемый «дыханием» пучка (рис. 8.6), связан с изменение площади его поперечного сечения и также является следствием пульсаций показателя преломления воздуха. Световые пятна, создаваемые пучком лазерного излучения на экране, удаленном от излучателя на 1,1 км, сфотографированы с интервалом 1/8 с.

Характерный размер неоднородностей, при которых наступают флуктуации параметров пучка, равен $\sqrt{\lambda L}$ [48] (здесь λ – длина волны излучения лазера; L – расстояние между приемником и передатчиком). Сильные флуктуации, которые могут вызвать исчезновение волнового фронта, возникают при $D >> \sqrt{\lambda L}$. Например, на расстоянии L = 5400 м при D = 30 см и $\sqrt{\lambda L}$ =0,63 мкм первоначальное распределение интенсивности на выходе лазера сильно нарушается. В этом случае $D/\sqrt{\lambda L} = 5$. При $D/\sqrt{\lambda L} = 1,7$ (L = 1500 м, D = 55 мм, $\sqrt{\lambda L}$ = 32 мм) замечаются незначительные отступления от первоначального распределения интенсивности. При D = 200 мм на том же расстоянии наблюдается полное исчезновение волнового фронта.

Таким образом, можно заключить, что при разработке лазерных геодезических приборов следует выбирать диаметр D передающего объектива в зависимости от требуемой дальности действия, в противном случае погрешности измерений резко возрастают, так как волновой фронт пучка разрушается. На основании теоретических и экспериментальных исследований [48, 79] оптимальный размер диаметра D передающего объектива должен отвечать условию $0,3 < D/\sqrt{\lambda L} < 0,4$.

Дисперсия логарифма интенсивности сигнала σ_I^2 подчинена нормальному закону распределения, и

$$\sigma_I^2 = (\ln I - \ln\langle I\rangle)^2, \qquad (8.29)$$

где I – интенсивность сигнала, $\langle I\rangle$ – среднее значение интенсивности. Выражению (8.29) можно придать следующий вид:

$$\sigma_I^2 = [\ln(I/\langle I\rangle)]^2. \qquad (8.30)$$

Флуктуации интенсивности, как и флуктуации угла прихода светового пучка, зависят от флуктуации показателя преломления атмосферы. Эта зависимость выражается соотношением:

$$\sigma_I^2 = 2,24\, k^{7/6} \int_0^L C_n^2 \, (L-x)^{5/6}\, dx, \qquad (8.31)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; L – расстояние, на которое распространяется волна в атмосфере. Если условия прохождения пучка на трассе можно считать однородными с точки зрения турбулентного режима, то C_n^2 не изменяется на всем пути и поэтому:

$$\sigma_I^2 = 1,123\, C_n^2\, k^{7/6}\, L^{11/6}. \qquad (8.32)$$

В приземном слое атмосферы на трассах длиной 1 км и более обычно наблюдаются сильные флуктуации интенсивности. Вследствие этого энергия пучка случайно распределена в плоскости приема, и поперечное сечение пучка увеличивается по сравнению с его невозмущенным состоянием. Средняя интенсивность в сечении пучка при сильных флуктуациях может быть оценена выражением:

$$\langle I(r,L)\rangle = \frac{I_0 a_0^2}{a_L^2} \exp\left(-r^2/a_L^2\right) \qquad (8.33)$$

где a_L^2 – квадрат эффективного радиуса пучка. (Эффективный радиус пучка a_L равен расстоянию от оси ручка до точки, где интенсивность уменьшается в e раз).

Наибольшие изменения интенсивности пучка происходят в период снегопада. При этом для наземных трасс длиной 160 и 700 метров, $\sigma_I = 10^{-1} - 10^{-2}$. Структурный параметр турбулентности при снежной и дождливой погоде примерно одинаков и равен $10^{-6} - 10^{-8}$ м$^{-1/3}$.

Исследования флуктуации интенсивности пучка лазерного излучения выполнялись также и для наклонных трасс. Структурная характеристика поля показателя преломления для наклонных трасс не является однородной, так как величина C_n^2 зависит от высоты прохождения пучка:

$$C_n^2 = C_n^2(h_0)(h/h_0)^{\gamma}, \qquad (8.34)$$

где h_0 – фиксированная высота; $\gamma = 2/3$ при наличии динамической турбулентности и $\gamma = -4/3$ в случае свободной конвекции.

По результатам исследований для наклонных трасс длиной 0,6; 1,4; 2,5; 7; 10 км и перепада высот до 460 м получена эмпирическая формула для среднего квадратического изменения логарифма интенсивности $\sigma_{(I)}$ [153]

$$\sigma_{(I)}^2 = \sigma_I^2(1 + \varepsilon D^{\eta}), \qquad (8.35)$$

где σ_I – результат, вычисленный согласно (8.32) для зависимости от структурной характеристики C_n^2; ε и η – постоянные, зависящие от состояния атмосферы и направления распространения пучка (табл. 8.3).

Таблица 8.3

Значения постоянных ε и η

Направление распространения излучения	Температурная стратификация атмосферы			
	Устойчивая		Неустойчивая	
	ε	η	ε	η
Воздух – земля	0,16	1,64	0,72	0,82
Земля –воздух	1,38	0,61	3,21	0,42

Погрешности в результатах угловых измерений могут возникнуть за счет изменений поперечного сечения пучка. Эти изменения могут во много раз превышать дифракционное расхождение пучка.

Эмпирическая формула для вычисления расширения диаметра пучка ΔD вследствие турбулентности на расстоянии L имеет вид:

$$\Delta D = M \cdot L^b, \qquad (8.36)$$

где $M = 4{,}5 \cdot 10^{-6}$; $b = 1{,}2$; ΔD выражено в см, L – в м.

Для практических расчетов эффективный диаметра пучка лазерного излучения $2a_L$ на уровне 1/e (e = 2,72 – основание натуральных логарифмов) может быть использована формула:

$$2a_L = 2W_B[(1 - L/R) + B^2(1 + 0{,}46D_L)^{6/5}], \qquad (8.37)$$

где $2W_B$ – диаметр пучка на выходе из источника излучения на уровне 1/e; L – длина трассы; R – радиус кривизны волнового фронта, равный эффективному фокусному расстоянию оптической системы;

$B = k W_B/L$; $D_L = (1{,}1\, k^2 L/W_B)^{5/3} C_n^2$.

Расширение пучка вследствие турбулентности накладывает ограничения на получение светового пятна минимального размера на расстоянии L от излучателя:

$$W_{min} = 4{,}3 m_{сф}^{6/5} \sqrt{\frac{L}{k}}, \qquad (8.38)$$

где для сферической волны

$$m_{сф} = 0{,}124 C_n^2 k^{7/6} L^{4/6}, \qquad (8.39)$$

$k = 2\pi/\lambda$ – волновое число. Таким образом, на большом расстоянии размер дифракционного пятна в фокусе больше в турбулентной атмосфере, чем в однородной, и не соответствует размеру, вычисленному по формулам оптики.

Турбулентность атмосферы вызывает также флуктуации фазы световой волны. Случайное изменение фазы, характеризуемое средним квадратическим отклонением $\langle(\varphi_1 - \varphi_2)^2\rangle$, пропорционально длине трассы и квадрату структурной характеристики показателя преломления воздуха:

$$D(r) = \langle(\varphi_1 - \varphi_2)^2\rangle = 2{,}9 k L C_n^2 r^{5/3}, \; R >> \sqrt{\lambda L}, \qquad (8.40)$$

где φ_1 и φ_2 – случайные флуктуации фазы; k – волновое число; R – радиус приемного объектива. Среднее квадратическое значение угла поворота плоскости поляризации ΔQ, вызываемое флуктуациями показателя преломления воздуха, находят из выражения:

$$\Delta Q = 2\pi\sigma 2_n L/l_0. \qquad (8.41)$$

Согласно экспериментальным исследованиям, флуктуации плоскости поляризации пучка лазерного излучения очень малы и составляют 10^{-9} рад/км [79, 80]. Таким образом, при выполнении практических работ значения ΔQ могут не учитываться, так как составляют тысячные доли угловой секунды на 1 км пути. При прохождении светового пучка в атмосфере наблюдается его ослабление, которое вызвано затуханием и рассеянием. Необходимо также отметить, что газы и взвешенные частицы сами могут излучать электромагнитные колебания. Все это приводит к ослаблению мощности и снижению яркостного контраста принимаемого сигнала относительно окружающего фона. Из- за этого также снижается дальность видимости в атмосфере. (Под метеорологической дальностью видимости понимают расстояние, на котором под воздействием атмосферной дымки теряется видимость абсолютно черной поверхности, имеющей на этом расстоянии угловые размеры не меньше 0,3° и проектирующейся на фоне неба (дымки) у горизонта.)

Характеристики ослабления света при хороших атмосферных условиях много раз определяли на трассах различной длины [79, 80, 167]. Полученные результаты приведены на рис. 8.7 для трассы длиной 1,8 км,

где показана передаваемая мощность для различных длин волн λ. В то время, как на частотах резонанса молекул воды и углекислого газа происходит сильное ослабление света, отдельные участки спектра остаются сравнительно свободными от поглощения.

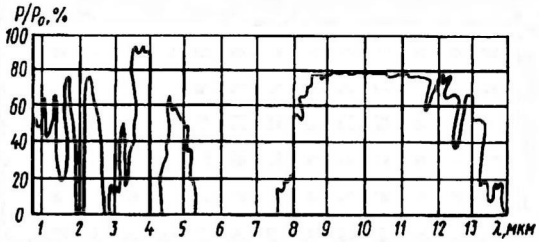


Рис. 8.7. Поглощение света на трассе длиной 1,8 км при хороших погодных условиях [79]

Световой поток Ф, прошедший в атмосфере путь L, может быть вычислен в соответствии с экспоненциальным законом Бугера:

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-\alpha_\lambda L), \qquad (8.42)$$

где α_λ — спектральный коэффициент ослабления; Φ_0 — начальный световой поток. Величину

$$\mu = \exp(-\alpha_\lambda) \qquad (8.43)$$

называют спектральным коэффициентом прозрачности атмосферы на единицу длины пути S. Учитывая (8.43), соотношение (8.42) можно записать в виде:

$$\Phi = \Phi_0 \mu^L. \qquad (8.44)$$

Спектральный коэффициент ослабления (экстинкции) α_λ характеризует прозрачность атмосферы и является суммой трех слагаемых:

$$\alpha_\lambda = \rho + \sigma + \tau, \qquad (8.45)$$

где ρ — коэффициент молекулярного поглощения; σ — коэффициент рассеяния на частицах; τ — коэффициент рассеяния на неоднородностях атмосферы.

Величина молекулярного коэффициента поглощения определяется в первую очередь концентрацией паров воды, углекислого газа и озона и зависит от того, насколько спектральный состав излучения соответствует спектру поглощения. Концентрация паров воды зависит от метеорологических условий и изменяется в пределах от 10^{-3} до 1 %, концентрация углекислого газа в атмосфере обычно составляет 0,1 % и повышается в промышленных центрах, а концентрация озона увеличивается с высотой и выше 30 км достигает 10 %. Полосы поглощения отдельных компонентов представлены на рис. 8.8, где показаны спектры поглощения водяного пара (а) для волн оптического диапазона m, углекислого газа (б), озона (в), а также суммарный спектр (г). Передаваемая мощность p/p_a выражена в процентах.

Для видимого диапазона (λ = 0,4 — 0,7 мкм) молекулярное поглощение незначительно. В ближнем инфракрасном диапазоне (λ = 0,7 — — 25 мкм) имеется целый ряд полос поглощения, а окна прозрачности,

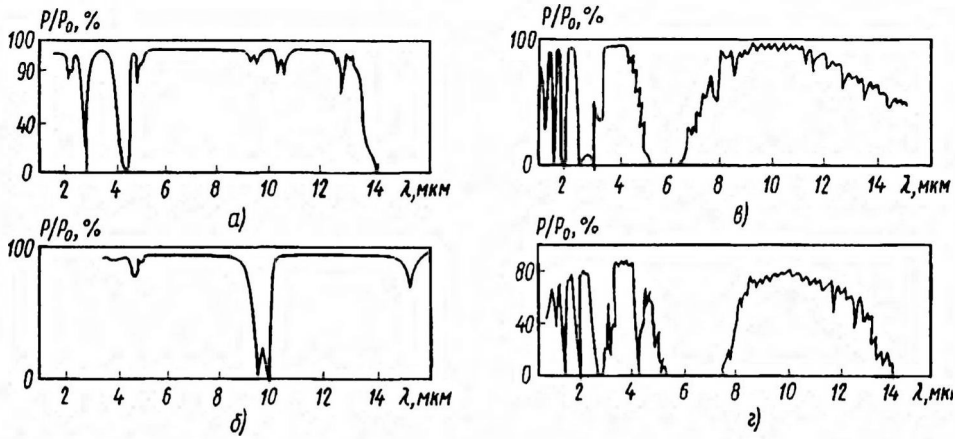


Рис. 8.8. Спектры поглощения отдельных компонентов для волн оптического диапазона λ:
а – водяного пара, б – углекислого газа, в – озона, г – суммарный спектр [79]. Передаваемая мощность p/p_a выражена в процентах

где затухание составляет не более 10 дБ/км, соответствуют длинам волн 8–13 и 18 мкм. В диапазоне от 25 до 100 мкм зависит в основном от влажности и составляет 100–1000 дБ/км.

Необходимо отметить, что при оценке поглощения излучения лазеров необходимо знать также спектры поглощения метана, оксидов азота, углерода и других примесей, так как в окнах прозрачности имеется множество узких линий поглощения, соответствующих этим газам.

На рис. 8.9 приведена запись тонкой структуры спектра поглощения земной атмосферы для длины волны $\lambda = 0{,}69$ мкм (в зависимости от температуры длина волн излучения рубинового лазера может изменяться от 0,6933 до 0,6943 мкм) [79, 80]. Полученный спектр записан спектрографом с разрешением $2{,}3 \cdot 10^{-6}$ мкм.

Из рис. 8.9 видно, что изменение температуры рубинового лазера приводит к изменению длины волны генерации и, следовательно, длина волны излучения может попадать в различные участки спектра поглощения атмосферы. Таким образом, при определении коэффициентов поглощения атмосферы необходимо предъявлять жесткие требования к точности определения положения линий, их интенсивностей и полуширины. В настоящее время, несмотря на возможность теоретического расчета коэффициентов поглощения атмосферных газов, точная оценка поглощения монохроматического или квазимонохроматического излучения невозможна, даже если с высокой точностью известен спектральный состав этого излучения, и поэтому коэффициенты поглощения излучения различных лазеров в атмосфере обычно определяют экспериментально.

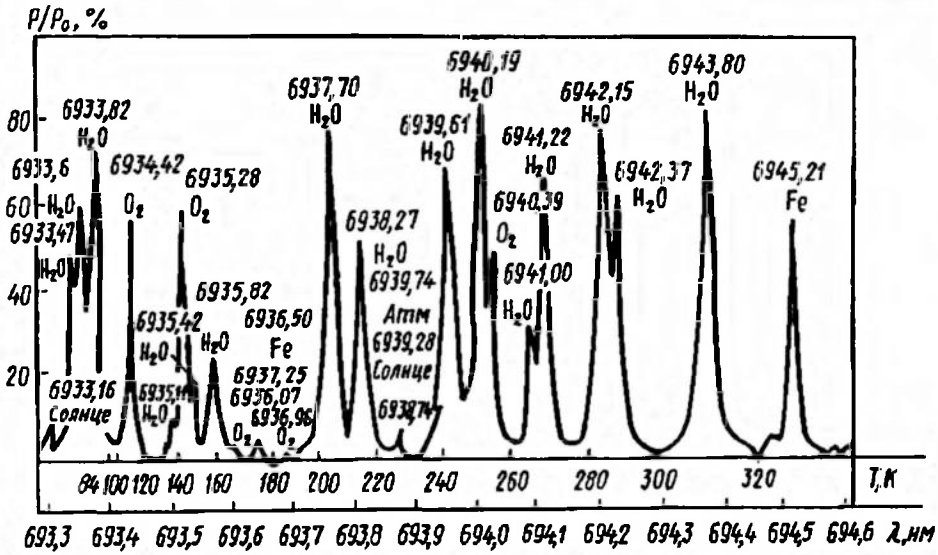


Рис. 8.9. Запись тонкой структуры спектра поглощения земной атмосферы для λ=0,69 мкм (длина волн излучения рубинового лазера в зависимости от температуры может изменяться от 0,6933 до 0,6946 мкм) [79, 80]. Полученный спектр записан спектрографом с разрешением $2{,}3\cdot10^{-6}$ мкм [79]

Благодаря теоретическим и практическим исследованиям ряда авторов установлено, что рассеяние светового потока определенной длины зависит от количества и размеров взвешенных в воздухе мельчайших частиц, причем коэффициент ослабления (в общем случае) тем меньше, чем больше длина волны излучения. Если частицы велики по сравнению с длиной волны, то видимый и инфракрасный свет рассеиваются примерно одинаково.

В совершенно чистой атмосфере спектральный коэффициент ослабления α_λ обратно пропорционален четвертой степени длины волны λ, т. е.

$$\alpha_\lambda = c/\lambda^4, \qquad (8.46)$$

где c — постоянная величина. При слабой дымке и хорошей видимости:

$$\alpha_\lambda = c/\lambda^{2,5}. \qquad (8.47)$$

При сильной дымке и тумане спектральный коэффициент ослабления обратно пропорционален длине волны, т.е.:

$$\alpha_\lambda = c/\lambda. \qquad (8.48)$$

Обычно в геодезических приборах используют гелиево-неоновые и полупроводниковые лазеры (λ = 0,6—1,1 мкм), следовательно, при любых условиях видимости можно ожидать, что излучение такого ла-

зера ослабляется меньше, чем излучение на длине волны $\lambda = 0{,}55$ мкм (средняя длина волны естественного света).

На основании экспериментальных исследований установлено, что при дожде затухание для длин волн $\lambda = 0{,}6$ мкм и $\lambda = 10{,}6$ мкм (лазер на CO_2) одинаково [167]. Поэтому для расчета коэффициента затухания при дожде в видимом и инфракрасном диапазонах используют формулу:

$$\alpha_\lambda = 0{,}9 \cdot I_D^{0{,}74}, \qquad (8.49)$$

где I_D – интенсивность дождя, мм/ч.

Во всех остальных случаях излучение лазеров инфракрасного диапазона ослабляется меньше, чем излучение лазеров видимого диапазона.

Так, например, рассеяние излучения лазера на CO_2($\lambda = 10{,}6$ мкм) в чистой атмосфере очень мало и характеризуется коэффициентом рассеяния 10^{-7} км$^{-1}$, которым можно пренебречь. Ослабление излучения в основном обусловлено селективным поглощением углекислым газом и водяным паром, содержащимися в атмосфере. Существенное влияние на величину коэффициента ослабления излучения $\lambda = 10{,}6$ мкм оказывает относительная влажность воздуха. Вместе с тем эксперименталными исследованиями установлено, что ослабление излучения лазеров на CO_2 в тумане примерно на порядок меньше, чем ослабление излучения лазеров видимого диапазона[79, 80].

С увеличением плотности тумана, что связано с увеличением размеров капель, эта разница уменьшается. В табл. 8.4 приведены результаты измерений ослабления излучения лазера на CO_2 для различных погодных условий. Как видно из этой таблицы, ослабление сигнала даже в сильном тумане составляет 1,9 дБ/км, что соответствует затуханию в оптических световодах, которые специально созданы для передачи оптических сигналов (обычно затухание в оптических световодах характеризуется величиной порядка 1 дБ/км).

Таблица 8.4

Ослабление излучения лазера на CO_2 ($\lambda = 10{,}6$ мкм) в различных условиях

Характеристики	Числовое значение	Дымка	Слабый туман	Сильный туман	Дождь
Видимость, км	100	30	2	0,5	20
Температура, °С	19	14	16	14	10
Влажность, %	20	40	40	75	100
Величина ослабления на трассе протяженностью 30 км, дБ	16	20	28	56	50
Величина ослабления, дБ/км	0,54	0,66	0,9	1,9	1,6

При сильной дымке, тумане, дожде или снегопаде наряду с увеличением ослабления наблюдается также значительное угловое расширение пучка лазерного излучения. Рассеяние света может быть вызвано, кроме того, атмосферной турбулентностью, благодаря которой показатель преломления воздуха непрерывно изменяется во времени и пространстве. Когда световой пучок проходит в среде с неоднородностями показателя преломления, он может отклоняться от исходного направления либо может деформироваться волновой фронт пучка, что приводит к увеличению либо уменьшению его угловой расходимости. Затухание от рассеяния вследствие турбулентности всегда намного ниже 1 дБ/км.

Расчет спектрального коэффициента ослабления а атмосферы для соответствующей длины волны излучения лазера довольно сложен, так как необходимые данные о составе атмосферы на трассе для момента измерений отсутствуют. Поэтому на практике α_λ обычно определяют в зависимости от метеорологической дальности видимости $L_м$:

$$\alpha_\lambda = -3{,}91\lambda^{-0{,}7}/L_м\, 0{,}61^{-0{,}7}. \qquad (8.50)$$

Если световой пучок проходит расстояние от приемопередатчика до отражателя и обратно, то

$$\alpha_\lambda = -7{,}82\lambda^{-0{,}7}/L_м\, 0{,}61^{-0{,}7}. \qquad (8.51)$$

Таким образом, световой поток Ф, прошедший в атмосфере путь L, может быть найден по формуле:

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-3{,}91\lambda^{-0{,}7}L/L_м\, 0{,}61^{-0{,}7}). \qquad (8.52)$$

В табл. 8.5 приведены значения коэффициента ослабления для λ = 0,6328 мкм в зависимости от дальности видимости $L_м$.

Таблица 8.5

Величина ослабления в зависимости от условий видимости для λ = 0,6328 мкм

Состояние атмосферы	Дальность видимости, S, км	Ослабление, дБ/км
Туман:		
легкий,	10	3–5
средний	3–5	10–12
сильный	<1	>20
Дождь:		
слабый	10	2–4
средний	3–5	8–10
сильный	<1	>20
Снегопад:		
слабый	10	5–7
средний	3–5	12–15
сильный	<1	>30

На работу лазерных приборов оказывает влияние фоновое излучение, создаваемое различными объектами (главным образом Солнцем), а также рассеянным лазерным излучением.

Рассеянное лазерное излучение распространяется как вперед, так и назад под различными углами по отношению к направлению распространения лазерного пучка. В том случае, когда передатчик и приемник расположены рядом, значительное влияние на работу приемника оказывает фон, создаваемый обратной засветкой, так как рассеянное излучение модулировано с той же частотой, что и полезный отраженный сигнал. Для уменьшения влияния рассеянного излучения в обратном направлении необходимо увеличить расстояние между передатчиком и приемником либо уменьшить их апертуры.

При сильном рассеянии границы пучка лазерного излучения могут исчезнуть на фоне собственного рассеяния излучения. Интенсивность прямой фоновой засветки может быть оценена по формуле:

$$I = I_0 \, l \, e^{-l\Theta} (2\pi)^{-1} f(0), \qquad (8.53)$$

где I и I_0 – интенсивности рассеянного и первоначального излучения; l – оптическая толща среды, км; Θ – телесный угол пучка; $f(0)$ – значение индикатрисы рассеяния при $\Theta = 0$, т.е. в осевом направлении.

Формула (8.53), как правило, справедлива при значениях $l < 18$, хотя яркость рассеянного вперед излучения остается меньше яркости прямого пучка до значений $l = 28$, при $l > 28$ контраст пучка становится равным нулю. Для реальных условий достоверная оценка интенсивности рассеянного вперед и назад излучения может быть получена только экспериментально, так как рассеянное излучение может снова рассеиваться, образуя двух-, трех- или многократное рассеянное излучение, теоретическая оценка интенсивности которого довольно сложна. Из посторонних источников наиболее сильное фоновое излучение создает Солнце. Мощные световые потоки от Солнца в видимом диапазоне спектра и ближнем инфракрасном диапазоне (до 4 мкм) могут вызываться не только прямым, но также рассеянным и отраженным излучением. В инфракрасной области спектра (область длин волн более 4 мкм) большой вклад в создание фоновых помех вносят тепловые излучения атмосферы и земной поверхности. В табл. 8.6 приведена максимальная яркость фона для помех различной природы. При расчете интенсивности фона, создаваемого Солнцем, основные трудности связаны как с неопределенностью некоторых исходных атмосферных параметров, так и со сложностью методик расчета эффектов многократного рассеяния. По этим причинам достоверные данные об интенсивности фона могут быть получены только на основе эксперимента. Спектральный состав рассеянного излучения заметно изменяется в зависимости от положения Солнца и угла визирования относительно Солнца. Максимальная яркость безоблачного неба составляет $9{,}7 \cdot 10^{-2}$ Вт см^2 ср$^{-1}$мкм$^{-1}$ для $\lambda =$ 0,58 мкм. С переходом в более длинноволновую область спектра роль фона, создаваемого рассеянием солнечного излучения, снижается, одновременно возрастает значение теплового излучения атмосферы.

Таблица 8.6

Спектральная яркость фона, создаваемого различными помехами

Природа фоновых помех	Максимальная яркость фона, Вт/см², для длин волн	
	1 мкм	10 мм
Отражение солнечного излучения водной поверхностью	10^{-1}	10^{-2}
Рассеяние солнечного излучения атмосферой (яркость безоблачного неба)	10^{-2}	10^{-7}
облаками (яркость облачного неба)	10^{-3}	10^{-7}
Тепловое излучение атмосферы	10^{-7}	10^{-3}
Свечение атмосферы	10^{-10}	10^{-4}

Необходимо отметить, что распределение яркости фона имеет, как правило, случайный характер. Для борьбы с фоновыми засветками в оптоэлектронных приборах используют узкополосные светофильтры, которые снижают интенсивность фона, так как спектральное распределение лазерного излучения и фона различно. Основное требование к светофильтру состоит в том, чтобы он имел максимальное пропускание лазерного излучения и минимальное – фона. Обычно угловой размер визирной цели значительно меньше, чем размер объектов фона. Для выделения полезного сигнала необходимо усилить сигналы от объектов, имеющих малые угловые размеры, и подавить сигналы от более протяженных объектов. Эта задача может быть решена, например, с помощью вращающегося растра, имеющего серию чередующихся прозрачных и непрозрачных секторов.

8.3. Рефракция. Общие сведения

Под рефракцией понимают отклонение луча света от своего прямолинейного направления распространения. По-видимому, о рефракции было известно еще в глубокой древности, так как люди сталкивались с этим явлением на протяжении всей своей жизни. Первые письменные упоминания о рефракции света относятся к I в. нашей эры. Так, Клеомед (Древняя Греция) пришел к выводу об искривлении лучей в атмосфере не на основе личных наблюдений, например, захода или восхода Солнца, а слушая рассказы моряков о том, что наблюдатель, находящийся на корабле среди моря, может видеть над горизонтом не только Луну с проецирующейся на нее тенью Земли, но одновременно и Солнце, находящееся с противоположной стороны горизонта. В своем труде «Циклическая теория метеоров» он писал по этому поводу: «Разве не возможно, чтобы световой луч, проходя сквозь влажные слои воздуха, искривлялся, почему и Солнце кажется находящимся над гори-

зонтом уже после того, как оно в действительности зашло за горизонт». Несколько позднее (II век н. э.) Птолемей дал более полное описание атмосферной рефракции. Он указывал, что рефракция должна отсутствовать для лучей, идущих от объекта, находящегося в зените, и должна увеличиваться по мере того, как объект приближается к линии горизонта (т.е. при увеличении зенитного расстояния). Птолемей отмечал также, что влияние рефракции выражается в смещении видимого положения светила вверх от истинного положения.

В XI веке арабский ученый Ибн-Аль-Хайтан обратил внимание на то, что вследствие рефракции света длительность дневной части суток увеличивается. Используя такое увеличение дня, он пытался оценить высоту земной атмосферы. Первые таблицы количественных значений рефракции составил датский астроном Тихо Браге, который использовал результаты астрономических наблюдений, выполненные удивительно точно для того времени. Теория рефракции была впервые разработана знаменитым немецким ученым Иоганном Кеплером, которую он опубликовал в труде «Дополнение к Виттелию». Необходимо отметить, что поправки за рефракцию, вычисленные согласно этой теории, были значительно точнее таблиц Тихо Браге, хотя Кеплер исходил из не совсем правильной физической картины строения атмосферы Земли. Он предполагал, что атмосфера есть однородный слой некоторой толщины, имеющий на всех высотах одинаковую плотность, хотя в действительности плотность атмосферы с высотой уменьшается. Такая предпосылка была обусловлена тем, что во времена Кеплера воздух считался невесомым. Используя закон преломления света на границе двух сред, Кеплер вычислил угол рефракции лишь для луча света, испытывающего преломление на верхней границе воздушного слоя. В самой атмосфере он принял прямолинейное распространение света. В результате расчета угла рефракции для объекта, находящегося у горизонта, Кеплер получил значение максимального угла рефракции на 4′ меньше, чем следовало ожидать на основе известных в то время экспериментальных данных.

Наибольший вклад в теорию рефракции внес великий английский ученый Исаак Ньютон. Теория рефракции, разработанная Ньютоном, не утратила своего значения и в настоящее время, она известна нам благодаря счастливой случайности, так как он не хотел ее публиковать. Свои исследования по рефракции Ньютон изложил в письмах Флемстиду, который занимался астрономическими наблюдениями в Гринвиче и имел звание «королевского астронома», дарованного ему английским королем Карлом II. Переписка между Ньютоном и Флемстидом началась в 1680 г. по поводу наблюдавшейся в том же году большой кометы. Теорию рефракции и таблицы рефракции Ньютон изложил в письмах Флемстиду в средине 90-х годов семнадцатого века. И только спустя более ста лет, в 1832 г. эти письма были найдены на чердаке одного из

домов Лондона и изданы в 1835 г. английским Адмиралтейством. Книга была издана очень малым тиражом и разослана отдельным научным учреждениям и известным астрономам. В 1930-х годах такую книгу случайно приобрел у букиниста выдающийся советский ученый в области кораблестроения академик А.Н. Крылов, который сделал перевод ее на русский язык. Он воскресил выводы и доказательства великого ученого и изложил их в работе «Теория рефракции Ньютона», которая была опубликована в 1935 году. А.Н. Крылов писал, что, сравнивая теорию рефракции Ньютона с современными теориями, сразу можно заметить, насколько просто и естественно ньютоновское изложение и как мало, по существу, за 240 лет прибавлено».

В письме к Флемстиду, датированном 24 октября 1694 г. Ньютон писал: «Я того же мнения, что рефракция.... слегка изменяется вместе с весом воздуха, показываемым барометром, ибо, когда воздух тяжелее и, значит, плотнее, он преломляет более, нежели когда он легче и реже».

Вначале Ньютон полагал, что плотность воздуха убывает равномерно (линейно) от поверхности Земли до верхней границы атмосферы. Затем он отказался от предположения о линейном убывании плотности воздуха с высотой и считал, что плотность уменьшается пропорционально уменьшению давления. Таким образом, Ньютон открыл закон убывания плотности атмосферы с высотой по экспоненциальному закону:

$$\rho(h) = \rho(0)\exp(-\frac{mgh}{kT}),$$

где $\rho(h)$ – плотность воздуха на высоте h; T – абсолютная температура воздуха, предполагаемая в данном случае постоянной на всех высотах; g – ускорение свободного падения (9,81 м/с^2); k – постоянная Больцмана ($1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К); m – масса молекулы газа.

Эта формула описывает изменение плотности с высотой лишь в общих чертах, так как воздух состоит из различных газов. Чем легче газ, тем медленнее с высотой уменьшается его плотность. Формула не учитывает влияние ветра, изменения температуры с высотой. Кроме того, h не должна быть более 100–200 км, чтобы можно было пренебречь зависимостью g от высоты.

Первые определения частных углов земной рефракции были выполнены в 1669 г. Х. Пикаром во Франции при наблюдениях триангуляционного ряда между Парижем и Амьеном.

Наиболее легко наблюдаемым следствием рефракции является деформация видимого диска Солнца, когда оно находится вблизи горизонта. В этом случае солнечный диск является сплюснутым по вертикали. Согласно современным данным при зенитном расстоянии 90° максимальный угол рефракции в этом случае составляет 35 угловых минут. Поэтому, когда наблюдается на море закат Солнца и видно, как нижний край Солнца коснулся линии горизонта, то в действительности в данный момент этот край светила находится на 35′ ниже линии горизонта. Так

как верхний край солнечного диска видим при меньшем зенитном расстоянии, то он приподнимается рефракцией слабее. Поэтому при закате солнечный диск кажется деформированным, так как по горизонтали он наблюдается под углом 32′, а по вертикали – под углом 26′.

Мерцание звезд также связано с рефракцией. Это явление объясняется тем, что видимое положение звезды изменяется вследствие быстрых изменений плотности воздуха, а следовательно, и показателя преломления, что вызывает хаотические изменения направления на звезду. Дрожание видимого изображения удаленных предметов имеет ту же природу, что и дрожание звезд. В результате рефракции изменяется дальность видимости горизонта на равнинах и на море. Так, например, в отдельные дни с побережья центральной части Сахалина в бинокль видны вулканы Курильских островов, находящихся на расстоянии более 500 км от Сахалина. Из-за рефракции длительность дня в средних широтах увеличивается приблизительно на 10 минут. При больших аномальных значениях рефракции возникают миражи, что часто наблюдается в пустыне либо в жаркий день над асфальтовой дорогой. В полярных странах миражи также наблюдаются, но имеют несколько иной характер.

Современные высокоточные оптоэлектронные геодезические приборы имеют инструментальную точность 1″ при измерении углов и относительную ошибку $10^{-6}...10^{-7}$ при измерении расстояний, и поэтому для обеспечения высокой точности измерений необходим учет влияния рефракции, так как прямолинейное распространение света возможно только в идеальной среде. Атмосфера, как всякая реальная среда, неоднородна, и поэтому при переходе от одной неоднородности к другой лучи света в общем случае преломляются. Преломляющие свойства неоднородностей (показатель преломления атмосферы) изменяются на малую величину и эти неоднородности не имеют четких границ. При прохождении границ раздела между неоднородностями показателя преломления n_1, n_2, ..., n_n, которые довольно стабильны во времени (рис. 8.10), пучки света меняют направление в пространстве. Поэтому траектория распространения света представляет собой плавную кривую, которая имеет двоякую кривизну (рис. 8.11), а субъективное восприятие человека принимает направление распространения света, совпадающим к касательной к лучу в точке наблюдения.

Основной мерой рефракции является угол r между касательной АС к линии АВ в точке приема и хордой, соединяющей приемник света А с его источником В. Кроме того, используют понятия частных и полного угла рефракции.

Если спроецировать пространственную кривую (траекторию света) на вертикальную В (рис. 8.12). и горизонтальную Г плоскости, то получим вертикальную и горизонтальную составляющие этой кривой.

Отклонение луча света в вертикальной плоскости носит название вертикальной рефракции, а горизонтальной – боковой рефракции.

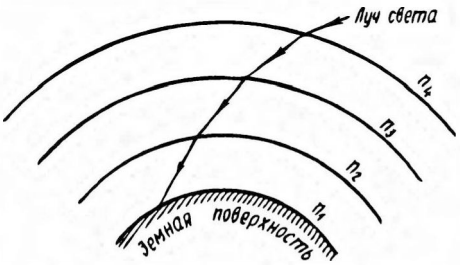


Рис. 8.10. Траектория распространения света в атмосфере

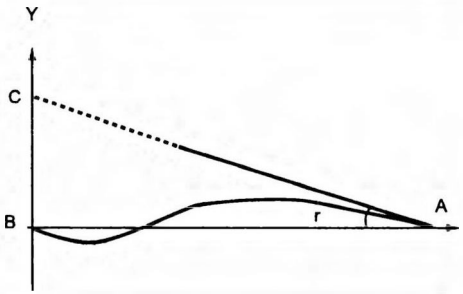


Рис. 8.11. Угол рефракции r между касательной AC к линии AB (к траектории луча) в точке приема A и хордой, соединяющей точки A и B

Углы r_{BA}, r_{GA}, r_{BC}, r_{GC} в точке приема или излучения энергии между хордой и касательной к проекции пространственной кривой на вертикальную и горизонтальную плоскости называют частными углами рефракции. Таким образом r_{BA} и r_{BC} – частные углы вертикальной рефракции в точках A и C; r_{GA}, r_{GC} – частные углы боковой рефракции в этих же точках. Полные углы рефракции δ_B и $\delta_Г$ – углы между касательными, построенными в точках приема и излучения энергии к проекции пространственной кривой на вертикальную и горизонтальную плоскости.

Вертикальная рефракция искажает вертикальные углы. В том случае, если в точке A измерено зенитное расстояние $Z_и$, а $Z_т$ – истинное (теоретическое) зенитное расстояние,то можно написать

$$r_{BA} = Z_т - Z_и. \qquad (8.54)$$

Из этого равенства можно определить величину и знак вертикальной рефракции. Когда проекция световой кривой на вертикальную плоскость направлена выпуклостью вверх, то вертикальная рефракция положительна (рис. 8.13).

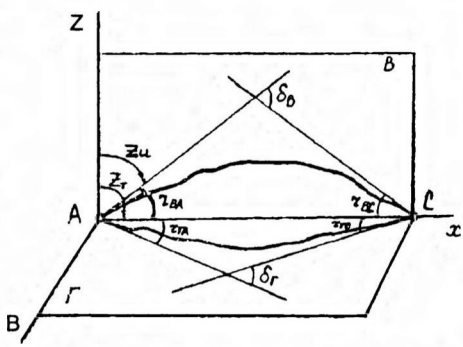


Рис. 8.12. К определению частных и полных углов вертикальной и горизонтальной рефракции

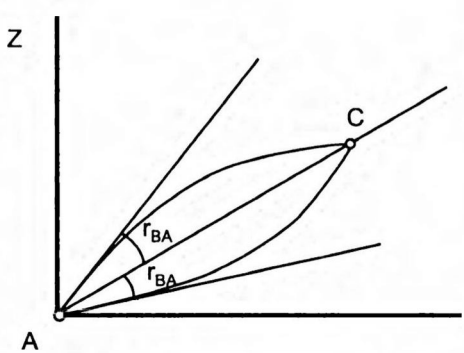


Рис. 8.13. Пример влияния на измеренные зенитные расстояния положительной и отрицательной вертикальной рефракции

Если световая кривая направлена выпуклостью вниз, то рефракция $r_{ВА}$ отрицательна. В течение суток знак и величина рефракции для одного и того же направления могут изменяться.

Боковая рефракция искажает горизонтальные углы. На одном и том же направлении в различные периоды суток боковая рефракция может быть положительной или отрицательной.

Вертикальная рефракция, как правило, значительно больше (примерно в 3–40 раз) [154], чем боковая, следовательно, и погрешности измерений, возникающие из-за влияния вертикальной рефракции, также значительно больше. В дальнейшем рассматривается только вертикальная рефракция.

Различают астрономическую и геодезическую рефракции. В первом случае рассматривают искривление световых пучков, приходящих от небесных светил, во втором – от наземных объектов.

Радиус кривизны ρ светового пучка в точке, отклоняющегося вследствие вертикальной рефракции, определяется как [148]:

$$\rho = -\frac{n}{\frac{dn}{dh}\sin i}, \qquad (8.55)$$

где n – показатель преломления воздуха для длины волны λ; dn/dh – градиент показателя преломления на высоте h прохождения светового пучка, характеризующий быстроту изменения показателя преломления с изменением высоты; i – угол падения лучей (для горизонтальных трасс i ~ 90°).

Знак «минус» градиента показателя преломления воздуха означает, что радиус кривизны ρ светового пучка будет положительным при уменьшении показателя преломления с увеличением высоты (траектория лучей обращена выпуклостью вверх) и отрицательным при увеличении показателя преломления с высотой (траектория лучей обращена выпуклостью вниз).

Для характеристики рефракции часто используют такое понятие, как точечный коэффициент рефракции k, характеризующий отношение радиуса Земли $R_з$ к радиусу рефракции ρ.

$$k = R_з/\rho, \qquad (8.56)$$

а для вычисления угла вертикальной рефракции используют приближенную формулу

$$r_в = kL/2R_з, \qquad (8.57)$$

где L – расстояние между источником и приемником, считая по дуге земной сферы. Зависимость угла вертикальной рефракции от градиента показателя преломления в общем виде выражена формулой [154]:

$$r_в = \rho'' \sin i \frac{1}{L}\int_0^L \frac{1}{n}\frac{dn_{верт}}{dh}x\,dx, \qquad (8.58)$$

где L – длина хорды пучка от источника до приемника; x – координата на ось X, совмещенной с хордой L; $dn_{верт}/dh$ – градиент показателя преломления воздуха, перпендикулярный оси в вертикальной плоскости; i – угол падения луча, $r_в$ и ρ″ выражены в угловых секундах.

Градиент показателя преломления воздуха зависит от градиентов температуры dT/dh, давления d P/dh и влажности d e/dh [154]:

$$\frac{dn}{dh} = -\frac{n-1}{T}\frac{dT}{dh} + \frac{1}{1-0{,}155\frac{e}{P}}\frac{n-1}{P}\frac{dP}{dh} - \frac{1}{6{,}45-\frac{e}{P}}\frac{n-1}{e}\frac{de}{dh}. \qquad (8.59)$$

Вертикальный температурный градиент в приземном слое атмосферы пропорционален притоку теплоты от деятельной поверхности в воздух или из воздуха в почву. Перенос теплоты осуществляется путем молекулярной теплопроводности, длинноволновой радиации и турбулентного обмена, причем последнее имеет основное значение. Минимальная температура земной поверхности наблюдается ночью в предрассветные часы, затем, после восхода Солнца, она начинает быстро возрастать. С повышением температуры земной поверхности повышается и температура воздуха, но с некоторым запаздыванием, которое тем больше, чем выше данный элементарный слой воздуха. Суточная амплитуда температуры возрастает с приближением к поверхности земли. Подобная зависимость от высоты над поверхностью земли наблюдается и для значений модуля градиентов температуры (рис. 8.14).

Вблизи земной поверхности иногда наблюдаются градиенты температуры, которые достигают нескольких градусов на метр, затем они уменьшаются с увеличением высоты. На рис.8.15 представлена годовая повторяемость вертикального градиента температуры на высотах 61 м и 16,8 м при наблюдениях в Австралии.

Летом в приземном слое атмосферы температурный градиент отрицателен (температура с высотой убывает) в дневное время и положителен ночью, т. е. температура с высо-

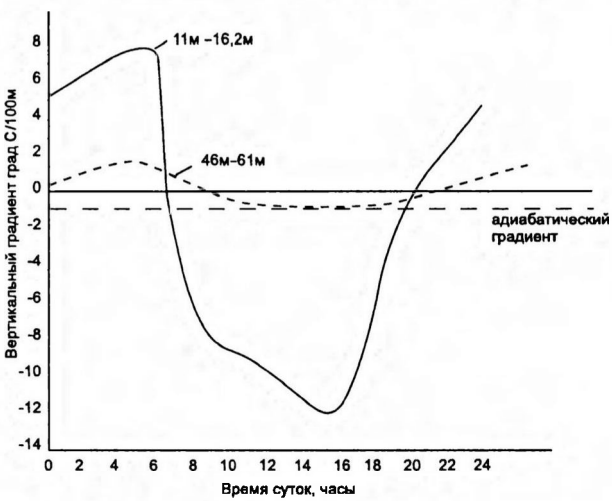


Рис. 8.14. Суточный ход вертикального градиента температуры, определяемого по разности температур на высотах 61 и 46 м, а также между 1,1 м и 16,2 м. Наблюдения проводились в Австралии на метеомачте на высотах 61 и 16,2 м

той возрастает. Зимой промежуток времени, в течение которого градиент температуры отрицателен, значительно меньше, чем летом, т.е. в зимнее время тоже наблюдаются отрицательные температурные градиенты.

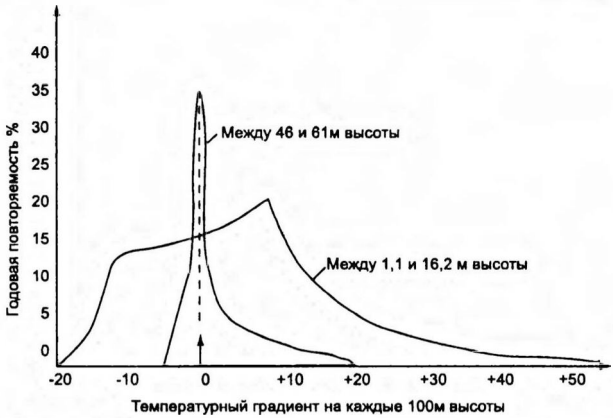


Рис. 8.15. Годовая повторяемость температурного градиента, определяемого по разности температур на высотах 61 и 46 м, а также между 1,1 м и 16,2 м [167]

Изменение температурного градиента в приземном слое обусловлено распределением температуры воздуха и зависит от многих факторов, важнейшим из которых являются отражающая способность (альбедо) поверхности, ориентировка поверхности относительно направления солнечного излучения, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности поверхности. В связи с этим вертикальный температурный градиент, как правило, неодинаков для одного и того же момента наблюдений и одной высоты прохождения светового пучка, но над различными подстилающими поверхностями. Чтобы иметь более достоверную информацию об оптических свойствах трассы, необходимо учитывать турбулентность атмосферы. Для вычислений вертикального градиента показателя преломления воздуха можно использовать формулу:

$$dn/dh = -1{,}0\cdot10^{-6}\,dT/dh + 0{,}3\cdot10^{-6}dP/dh - 0{,}05\cdot10^{-6}de/dh, \quad (8.60)$$

где dn/ dh выражено $м^{-1}$; T – в град K, а P и e – в милибарах. (Если dn/ dh выражено в $см^{-1}$, то коэффициенты при dT/dh, dP/dh и de/dh необходимо уменьшить в 100 раз.)

Давление водяного пара в атмосфере не превышает 40 мм рт.ст. а в средних широтах редко достигает 10–15 мм рт.ст. Вклад градиента влажности в величину показателя преломления не превышает 3%, поэтому им можно пренебречь. Основное влияние на градиент показателя преломления воздуха оказывает градиент температуры. Поэтому без особой погрешности можно написать:

$$dn/dh = 0{,}28\cdot10^{-6}\,dP/dh - 1{,}0\cdot10^{-6}dT/dh, \quad (8.61)$$

где dn/dh выражено в $м^{-1}$, dP/dh – в мб/м и dT/dh – в град/м. Вертикальный градиент давления в приземном слое воздуха достаточно стабилен как в течение суток, так и в различные сезоны года, и поэтому его можно принять равным –0,12 мбар/м. Для приближенных вычислений (±10 %) в приземном слое атмосферы можно использовать формулу:

$$dn/dh = -0{,}34\cdot10^{-7} - 1{,}0\cdot10^{-6}\,dT/dh. \quad (8.62)$$

При определении рефракции на основе градиентных измерений температуры предполагается, что условия прохождения по всей трассе одинаковы, и поэтому оценка угла рефракции осуществляется по упрощенной формуле:

$$r'' = -(\rho'' L/2)\,(dn/dh)\,(1/n). \qquad (8.63)$$

8.4. Метеорологический метод определения рефракции

Впервые метод определения рефракции по измерениям метеорологических элементов был предложен в 1843 г. В.Я. Струве, который вывел эмпирическую зависимость рефракции от температуры воздуха. Позднее, в 1873 г. Н.Я. Цингер в книге «Курс высшей геодезии» предложил учитывать при оценке коэффициента рефракции вертикальные градиенты метеорологических величин.

Как уже отмечалось, рефракция света обусловлена градиентом показателя преломления воздуха, который зависит от градиентов давления, температуры и влажности [82]. Наибольшее влияние на градиент показателя преломления оказывает градиент температуры воздуха (см. 8.62), и поэтому при определении рефракции его измеряют особенно тщательно. Для измерения градиентов температуры обычно применяют термоградиентографы, датчиками температуры которых являются проволочные сопротивления. Так как в приземном слое атмосферы профиль кривой изменения температуры имеет вид, близкий к логарифмическому, то при градиентных измерениях датчики температур для удобства вычислений устанавливают на высотах по логарифмической шкале, т.е. на расстоянии 0,5; 1; 2; 4; 8 м. Градиент температуры находят из соотношения:

$$dT/dh \sim \Delta T/\Delta h, \qquad (8.64)$$

где ΔT и Δh – разность температур и высот установки датчиков.

Точность определения градиента температуры зависит от точности измерения разностей температур ΔT и длины отрезка Δh, а также от погрешности аппроксимации функции T в виде прямой пропорциональности от h. Чтобы уменьшить погрешность аппроксимации, необходимо уменьшить длину отрезка Δh.

Для обеспечения возможности вычисления угла рефракции с погрешностью до 1″ на трассе в 1 км точность измерения разностей температуры в двух точках с помощью термоградиентографа должна быть очень высокой и выражаться погрешностью порядка 0,1 °С/м. Такая точность измерений градиента температуры практически не достижима, так как температурное поле неоднородно, и в любой точке в приземном слое наблюдаются пульсации температуры, которые могут достигать 1 °С, и кроме того, технически достаточно сложно выполнять измерения температуры с точностью в десятые доли градуса, так как любой датчик, внесенный в поле температур, искажает это поле. Следует также отметить, что измерения градиента температуры в одной точке трассы не

позволяют с достаточной точностью и достоверностью вычислять рефракцию для всей трассы, так как условия прохождения луча в различных ее точках неодинаковы. При флуктуациях температуры и сравнительно малой инерционности датчиков измеренные значения ΔT могут содержать случайные погрешности. Для исключения влияния флуктуации температуры необходимо применять инерционные датчики.

За счет инерционности датчиков возникает погрешность $\Delta T_{изм}$, которая определяется соотношением:

$$\Delta T_{изм} = (T_д - T)e^{-\tau/\lambda}, \qquad (8.65)$$

где $T_д$ – температура чувствительного элемента термоградиентографа до начала измерений; T – температура воздуха; τ – время, прошедшее от начала измерений; λ – постоянная, характеризующая инерционность датчика (время, за которое начальная разность между температурами термометра и среды уменьшится в е раз).

С течением времени цена деления термоградиентографа может изменяться из-за изменения удельного сопротивления чувствительного элемента. Для уменьшения влияния ошибок шкал и изменения цены деления необходимо проводить компарирование термоградиентографа. Погрешности измерений могут быть вызваны также нестабильностью напряжения или силы тока, нестабильностью сопротивления подводящих проводов и т.п.

Обычно в термоградиентографах применяют терморезисторные термометры, сопротивление которых изменяется при изменении температуры. Например, сопротивления металлов при нагреве от 0 до 100 °С увеличивается в среднем на 40 %, а сопротивление полупроводников в зависимости от примесей и их состава при повышении температуры может или повышаться или понижаться. В термоградиентографах чувствительные элементы выполняют, как правило, из металлов (меди, никеля, железа, платины), которые обеспечивают высокую надежность результатов измерений, чувствительность, линейную зависимость сопротивления от температуры. Кроме того, металлические чувствительные элементы достаточно просты в изготовлении.

Особенность определения вертикальной рефракции по метеорологическим элементам состоит в том, что вертикальный градиент температуры, как правило, измеряют в одной (двух) точках трассы в слое воздуха толщиной 1–4 м, а визирный луч может проходить на высоте в несколько десятков и даже сотен метров или в условиях, значительно отличающихся от условий установки термоградиентографа. К тому же сами датчики могут вносить искажения в измеряемое температурное поле.

Таким образом, вычисление коэффициентов вертикальной рефракции с использованием значений метеорологических элементов, измеренных в начале и конце трассы, не соответствуют условиям прохождения света на трассе. Несоответствие истинного и вычисленного значений коэффициента вертикальной рефракции объясняется непре-

зентативностью измерений метеоэлементов прибора и визирной цели для всего пути светового луча.

В работе [154] Л.С. Юношевым для более точного определения рефракции предлагается всю трассу разбить на отдельные участки, которые имеют однородную поверхность, а следовательно, и одинаковые условия прохождения (так называемые «квазистационарные блоки»). Затем измерять температурный градиент для каждого из них и по этим измерениям вычислить среднее значение рефракции. Этот способ более точен, так как каждый блок должен иметь однородную подстилающую поверхность, а следовательно, и одинаковые условия прохождения света. Однако в реальных условиях практически невозможно определить границы блоков. К тому же выполнение градиентных измерений на этих блоках при выполнении обычных геодезических работ практически не возможно, так как требует наличия дополнительной аппаратуры (мачты, термоградиентографы, записывающие устройства), что удорожает работы и увеличивает срок их выполнения, так как предусматривает измерение градиентов температуры в нескольких участках трассы. К тому же измерения вертикальных градиентов температуры в полевых условиях на высотах в несколько десятков метров невозможно уже только по той причине, что требует на трассе установки высотных уникальных стационарных мачт, т.е. объем и сложность метеорологических измерений во многом превосходят геодезические измерения. Кроме того, недостатком «метеорологического» метода измерения рефракции являются очень высокие требования к точности измерений вертикального градиента температуры, так как ошибка в измерении вертикального градиента температуры в 0,1 град/м приводит к угловой ошибке в 1″ на трассе длиной 1 км, что соответствует инструментальной точности современных высокоточных геодезических приборов. Основной и принципиально неразрешимый недостаток – это непрезентативность результатов метеорологических измерений при определении угла рефракции, что многократно отмечали различные исследователи [5, 6, 103, 148].

По этим причинам метеорологический метод определения рефракции не нашел широкого применения в геодезической практике, а используется только в научных исследованиях.

8.5. Геодезические методы определения вертикальной рефракции

В работе [148] достаточно подробно выполнен анализ различных геодезических методов определения рефракции. Ниже рассмотрены некоторые из них, которые наиболее часто используются при выполнении геодезических измерений.

До настоящего времени практически во всех руководствах по работе с тем или иным геодезическим прибором для введения поправки за рефракцию предлагается использовать постоянный коэффициент рефракции. Предполагается, что в приземном слое атмосферы рефракция постоянна, и требуется только надежнее определить коэффициент

рефракции для конкретного региона, страны либо группы стран. Например, для Германии был принят k = +0,13, который был определен еще Гауссом, а для СССР k = +0,14. В реальных условиях наблюдались коэффициенты рефракции от +4,28 до –4,40 [103]. Автором при исследованиях вертикальной рефракции в 1981–1992 гг. на горизонтальных трассах под Ашхабадом протяженностью 2 км при высоте визирного луча 1,5 м были получены максимальные по модулю значения коэффициентов рефракции +4,57 и –4,72, которые менялись в течение суток в этих пределах. Поэтому для большинства геодезических работ постоянный коэффициент рефракции использовать нельзя, так как это часто приводит к ухудшению результатов измерений.

Достаточно часто используется метод, согласно которому коэффициент рефракции k может быть найден с помощью одновременного измерения прямого Z_1 и обратного Z_2 зенитных расстояний [141, 148]:

$$k = 1 - \{R_3/L\rho''[(Z_1 + Z_2) - 180°] + (R_3/L^2)[(l_1 + l_2) - (i_1 + i_2)]\}, \quad (8.66)$$

где i_1 и l_1, i_2 и l_2 – соответственно высоты прибора и визирной цели; R_3 – радиус земной сферы; L – расстояние между точками.

Если наблюдения выполняют в сети триангуляции, то вычисляют среднее арифметическое всех коэффициентов k, полученных по каждой стороне. Полученное значение k рассматривают как средний коэффициент рефракции для данного района работ.

Этот метод наиболее часто используется на практике в тех случаях, когда геометрическое нивелирование выполнить очень сложно. Он не обеспечивает высокой точности измерений, так как значения k варьируют не только от направления к направлению, но и с течением времени в широких пределах. Теоретически прямой и обратный углы рефракции могут быть приняты равными, если трасса горизонтальна и однородна, профиль симметричный, происходит одинаковый нагрев склонов солнечными лучами, а взаимные наблюдения проводятся одновременно. Однако эти условия при работе в полевых условиях практически невыполнимы. Поэтому ошибки при определении рефракции особенно на больших расстояниях довольно значительны.

Определенное распространение получил способ определения коэффициента вертикальной рефракции, в основе которого лежит допущение о том, что во время измерения зенитных расстояний коэффициент рефракции на данном пункте практически одинаков для всех направлений. Он полностью основан на использовании результатов только тригонометрического нивелирования.. Этот метод предложен Извековым М.И. для случая, когда имеется сеть триангуляции с измеренными по всем сторонам сети взаимными зенитными расстояниями.

В треугольнике $P_1P_2P_3$ (рис. 8.16) измеряются взаимообратные зенитные расстояния z. Длины сторон L треугольника известны. Превышения h по стороне P_1P_2 равны. В этом случае

$$H_1 - H_2 = h_{1,2} + L_{1,2} f_1, \quad (8.67)$$

$$H_2 - H_1 = h_{2,1} + L_{1,2} f_2,$$

где

$$f_i = (1 - k_i^2)/2R_3. \qquad (8.68)$$

Здесь $h_{1,2}$ и $h_{2,1}$ – превышения, вычисленные по измеренным Z. Из уравнений (8.67) получим:

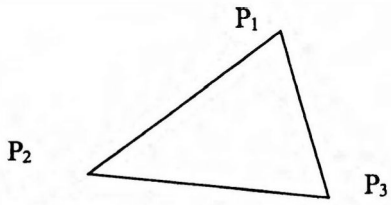


Рис. 8.16.

$$f_1 - f_2 = (h_{1,2} - h_{2,1})/L_{1,2}. \qquad (8.69)$$

Составив два уравнения типа (8.69) для остальных сторон треугольника, найдем значения f_1, f_2 и f_3. По этим данным, используя соотношение (8.68), можно вычислить три значения коэффициента k. Следовательно, если данный пункт является вершиной n-го треугольника, то можно получить n значений f.

При избыточных измерениях задачу следует решать способом наименьших квадратов.

Этот способ определения рефракции не обеспечивает достаточной точности измерений по следующим причинам:

- лежащее в основе метода предположение о том, что во время измерения зенитных расстояний коэффициент рефракции на данном пункте практически одинаков для всех направлений, не является корректным, так как реальным фактором является неоднородность атмосферы и постоянное изменение ее оптических свойств;
- коэффициенты рефракции, полученные в результате измерения прямых или обратных зенитных расстояний, являются не презентативными, так как они относятся только к определенному моменту наблюдений и к определенной трассе. Поэтому нельзя считать, что такие же условия прохождения света будут наблюдаться на других трассах и в другие моменты времени или даже для этой трассы, но в другое время.

Отметим, что этот метод противоречит общепризнанному методу определения рефракции, разработанному Л.С. Юношевым [154], в котором используется понятие так называемых «квазистационарных блоков». Согласно этому методу необходимо дифференцированно подходить не только к каждому измеряемому направлению, но и на каждом направлении выбирать участки с однородными условиями прохождения света с целью дифференцированного определения рефракции на каждом участке, что более правильно отражает многообразие условий прохождения света на неоднородной трассе.

По этим причинам метод определения высот путем тригонометрического нивелирования не достаточно точен, так как искажения, вызываемые вертикальной рефракцией, в значительной степени снижают точность полученных результатов. Он используется в тех случаях, когда для практических целей значения отметок точек допустимо определять грубее, чем при геометрическом нивелировании IV класса или техническом нивелировании.

При исследованиях вертикальной рефракции в основном используется метод определения коэффициента рефракции путем сравнения результатов геометрического и тригонометрического нивелирования:

$$Z_т = 90° + L\rho''/2R_з - h\rho''/L, \qquad (8.70)$$

где $Z_т$ – истинное зенитное расстояние, вычисленное из геометрического нивелирования; h – превышение между пунктами, полученное из геометрического нивелирования:

$$Z_в = Z_и + \frac{l-i}{L}\rho'', \qquad (8.71)$$

$Z_в$ – вычисленное зенитное расстояние; $Z_и$ – измеренное зенитное расстояние; i – высота инструмента; l – высота визирной цели.

Точность определения рефракции данным методом достаточно высока и соответствует точности выполненных измерений. С помощью этого метода в основном и получены наиболее достоверные данные о рефракции на наземных трассах различной протяженности.

Так, например, с 1981 по 1992 годы в различные сезоны в Физико-техническом институте Академии наук Туркменистана проводились исследования вертикальной рефракции на 5 трассах, расположенных под Ашхабадом. В табл. 8.7 приведены сведения об этих трассах.

Таблица 8.7

Характеристика трасс

№№ п/п	Название трассы	Расстояние от Ашхабада	Характеристика поверхности	Длина трассы, L, км	Высота инстр., i, м	Высота цели, l, м	Эквивал. высота луча, $h_э$, м
1	Берзенги	5 км на восток	Пересеченная холмистая поверхность (предгорье Копет-Дага), покрытая травой	2,5	2,20	7,4	21,0
2	Бахардок	80 км на север	Почти горизонтальная поверхность почти без травы (Такыр)	2,0 4,0	1,50	0,5 1,5 2,5	1,0 1,5 2,0
3	Теджен	90 км на восток	Почти горизонтальная поверхность, покрытая травой	2,0 4,0	1,50	0,5 1,5 2,5	1,0 1,5 2,0
4	Кизил-Арват	220 км на запад	Поверхность ровная, покрытая высохшей глиной	2,0 4,0	1,50	0,5 1,5 2,5	1,0 1,5 2,0

Трасса «Берзенги», находящаяся в предгорьях Копет-Дага, проходила по всхолмленной местности и имела эквивалентную высоту 21 м, которая определялась по формуле:

$$h = \frac{L^2}{2} \left[\int_0^L (x/h)dx\right]^{-1}, \qquad (8.72)$$

где L – длина трассы; h – высота текущей точки луча, определяемая профилем трассы. Остальные трассы имели однородную ровную поверхность.

В конечных точках трасс «Бахардок», «Теджен» и «Кизил-Арват» были установлены щиты, на которых на высотах 0,5; 1,5 и 2,5 м были изображены визирные марки с кругом в центре, имеющие диаметр 10 см. Причем на каждой трассе имелась одна начальная точка, на которой устанавливался теодолит, а двух- и четырехкилометровые трассы, имеющие одну начальную точку, располагались почти в одном створе. Щиты устанавливались таким образом, чтобы они не загораживали друг друга.. Таким образом, на этих трассах было установлено шесть щитов: три на 2-километровых трассах и три на 4-километровых трассах. Наблюдения на 2,5-километровой трассе «Берзенги» выполнялось на визирную марку с отражателем, установленную на визирном цилиндре пирамиды. Угол рефракции определялся из сравнения теоретического и полученного с помощью теодолита зенитного расстояния, т.е.

$$r_в = Z_т - Z_и. \qquad (8.73)$$

В свою очередь, теоретическое зенитное расстояние вычислялось на основании результатов геометрического нивелирования 2-го класса. Значения $Z_и$ получали с помощью оптического теодолита 2Т2А, который во время наблюдений устанавливался на каждой из трасс в начальной точке на бетонный столб. Зенитные расстояния измерялись последовательно на визирные цели, расположенные на высотах 0,5; 1,5 и 2,5 м на концах каждой трассы, через каждые 0,5 час. одним полным приемом. В основном наблюдения выполнялись в светлое время суток, иногда – в течение суток. Средняя квадратическая ошибка измерения вертикального угла составляет 2,4″. Для каждого месяца на всех трассах характер суточного хода вертикального угла рефракции практически одинаков (рис. 8.17) . Ночью, как правило, угол рефракции положителен. После восхода Солнца, когда начинают прогреваться поверхность почвы и приземный слой воздуха, рефракция уменьшается, становится равной нулю и затем принимает отрицательные значения. Минимальное значение рефракции (не по абсолютной величине) обычно наблюдается после полудня в интервале 12–16 час. Затем рефракция начинает увеличиваться, к моменту захода Солнца проходит через нуль и далее принимает положительные значения. Период времени, в котором на-

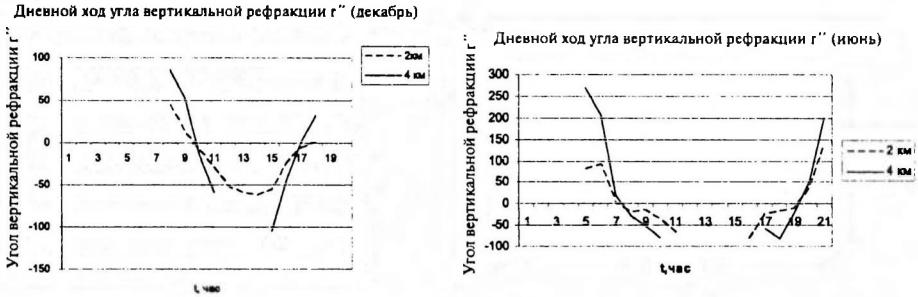


Рис. 8.17. Дневной ход вертикальной рефракции на трассах L = 2 км и и L = 4 км. Высота инструмента – 2,20 м,высота визирной цели – 2,50 м (Кизил-Арват): а) 4 октября 1985 г. и б) 6 июня 1985 г.

блюдается положительная рефракция, днем составляет 20–30 % светлого времени для трасс с высотой луча 1,0–2,5 м. и увеличивается с увеличением высоты луча. В жаркие дни в околополуденные часы всегда имеет место потеря видимости визирных целей, вследствие размытия изображений визирных марок. Жарким днем из-за миражей визирные цели иногда видны перевернутыми. Чем больше протяженность трассы и чем меньше высота визирного луча, тем быстрее наступала потеря видимости. Разрыв линии дневного хода рефракции связан с потерей видимости визирной цели вследствие сильных флуктуаций показателя преломления воздуха.

В зимнее (холодное) время года наблюдалась потеря видимости на более короткий период. Даже летом в прохладные дни на тассах 2-х и 2,5-километровой длины иногда видимость была целый день даже при наблюдениях самой низкой визирной марки (на высоте 0,5 м). Для этих наблюдений дневной ход угла рефракции более сглаженный. Наиболее сглаженный дневной ход всегда наблюдался на трассе «Берзенги», так как визирный луч проходил на гораздо большей высоте (21 м) относительно подстилающей поверхности.

Переход рефракции через ноль проходит примерно через 0,5–1,5 час. после восхода Солнца и за 0,5–1,0 час. перед заходом. В эти периоды температура почвы и прилегающего слоя воздуха выравниваются, т.е. примерно одинаковы, и наблюдается безразличная температурная стратификация, а градиенты температуры близки к адиабатическому. Визирные цели четко видны и не колеблются. После восхода Солнца происходит быстрый нагрев почвы, температура поверхности которой ночью значительно снижается за счет выхолаживания. В жаркие дни температура поверхности почвы может достигать +74–77 °С, а воздуха – +47–50° С, что приводит к большим отрицательным градиентам температуры, соответствующим неустойчивой температурной страти-

фикации атмосферы. Поэтому днем на всех трассах наблюдалась отрицательная рефракция, т.е. луч был обращен выпуклостью вниз. В этот же период наблюдаются сильные колебания визирных целей и потеря видимости. По мере перехода от холодного периода года к теплому разность температур поверхности почвы и воздуха возрастает, что ведет к увеличению абсолютных значений вертикальных градиентов температуры, и как следствие этого, к увеличению суточного хода рефракции. Как видно из рис. 8.17, амплитуды дневного хода угла рефракции на четырехкилометровых трассах рефракции больше, чем на двухкилометровых (высоты лучей на этих трассах одинаковы). То же можно сказать, сравнивая высоты прохождения визирных лучей над подстилающей поверхностью – на малых высотах значения амплитуды дневного хода угла рефракции, как правило, всегда больше, чем на значительных высотах, не зависимо от периода наблюдений. В течение года наибольшие значения рефракции по абсолютной величине наблюдались летом на 4-км трассах (ночью – положительные, днем – отрицательные). Абсолютные значения угла рефракции достигали величины порядка 200″. На основании данных дневных и суточных наблюдений в Туркменистане, выполненных на различных трассах в различное время года, можно сделать вывод, что величина угла рефракции при высоте визирного луча в единицы метров меняется случайным образом в значительных пределах и может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Характер суточного хода рефракции в деталях практически не повторим, но имеет общие черты для различных времен года и для трасс различной длины. Кривая суточного хода сглаживается в более холодное время года, а также для трасс, у которых больше высота луча над поверхностью земли.

При выполнении тригонометрического нивелирования в производственных условиях метод определения рефракции из сравнения результатов тригонометрического и геометрического нивелирования не может быть использован. В реальных условиях отметок точек, определенных из геометрического нивелирования, нет. В противном случае необходимость в тригонометрическом нивелировании отпадает. Следовательно, вычислить поправки за рефракцию и ввести их в результаты тригонометрического нивелирования нельзя.

Этот метод определения вертикальной рефракции используется в основном для академических целей, т.е. при исследованиях рефракции, так как позволяет получить значение рефракции для определенного момента наблюдений и на конкретной трассе.

В работе [114] детально рассмотрен еще целый ряд геодезических методов определения вертикальной рефракции, но всем им присущи те или другие отмеченные выше недостатки, и главное, даже если каким-либо из этих методов получено точное значение рефракции для данной

трассы, то в следующий, достаточно малый момент времени, значение рефракции может коренным образом измениться. По-видимому, для практических работ из разработанных методов учета влияния рефракции наиболее эффективным является метод измерений, предложенный Н.В. Яковлевым, Д.И. Масличем, А.Л. Островским, Б.М. Джуманом и др. [77, 104, 148, 155]. Этот метод не требует выполнения дополнительных измерений и основывается на выборе наиболее благоприятного времени наблюдений (при безразличной температурной стратификации атмосферы), т. е. в то время когда рефракция мала и практически постоянна, что имеет место утром, спустя 0,5–1 час. после восхода Солнца, и вечером — 0,5–1 час. перед заходом Солнца.

8.6. Измерение рефракции дисперсионным методом

При выполнении измерений в длинноволновом участке спектра с увеличением длины волны влияние рефракции на результаты измерений уменьшается. Полученные экспериментальным путем значения коэффициентов рефракции для инфракрасных лучей всегда меньше, чем для видимого диапазона. На этом явлении основан дисперсионный метод измерения рефракции [123, 151].

Этот метод был предложен в 1924 г. немецким геодезистом Нэбауэром и позднее получил развитие в работах И.А. Хвостикова, Е. Тенгстрома и М.Т. Прилепина [123,151, 185] Метод основан на свойстве световых лучей, заключающемся в том, что при прохождении в атмосфере показатель преломления воздуха для различных длин волн различен.

Если источник света посылает два монохроматических луча: синий (длина волны λ_c)и красный (длина волны $\lambda_к$), то углы рефракции для этих лучей будут различны (50):

$$r_c = \frac{\rho''}{L}(n_c - 1)\int_0^L \left(\frac{dP}{dh}\frac{1}{P} - \frac{dT}{dh}\frac{1}{T}\right)x\,dx, \qquad (8.74)$$

$$r_к = \frac{\rho''}{L}(n_к - 1)\int_0^L \left(\frac{dP}{dh}\frac{1}{P} - \frac{dT}{dh}\frac{1}{T}\right)x\,dx, \qquad (8.75)$$

где r_c и $r_к$ – углы рефракции для длин волн λ_c, и $\lambda_к$ соответственно; L – длина трассы; $\rho'' = 206265''$; n_c и $n_к$ – средние показатели преломления воздуха на трассе для длин волн λ_c, и $\lambda_к$; x – текущие координаты луча.

В том случае, если измерена разность углов рефракции (дисперсия рефракции) $\Delta r = r'_c - r'_к$, можно получить угол рефракции r_λ для длины волны λ:

$$r_\lambda = \frac{n_\lambda - 1}{n_c - n_к}\Delta r''. \qquad (8.76)$$

где n_λ – средний коэффициент преломления воздуха для средней длины волны λ. При вычислении угла рефракции по формуле (8.76) вместо разностей $(n_\lambda - 1)$ и $(n_c - n_к)$ используют их значения, полученные по метеорологическим измерениям на конечных пунктах трассы. Это вносит погрешности в полученное значение угла рефракции. Кроме того, угол r также измеряют с некоторой погрешностью. В том случае, если для определения величины Δr взяты также длины волн, при которых $(n_c - n_к) = 6 \cdot 10^{-6}$, то погрешность определения угла рефракции может оказаться примерно в 50 раз большей, чем погрешность измерения дисперсионного угла рефракции Δr:

$$m_r = 46 m_{\Delta r}. \qquad (8.77)$$

Поэтому реализация дисперсионного метода определения рефракции – довольно сложная задача, так как возникают жесткие требования к точности измерения величин Δr. Это обстоятельство вызывает основную сложность при использовании дисперсионного способа определения рефракции.

Для определения рефракции этим методом были использованы устройства на основе лазеров, генерирующих на различных длинах волн. Угловая дисперсия для двух длин спектра определяется либо дифракционным, либо интерференционным способом. При дифракционном способе создаются дифракционные изображения источников света, генерирующих на различных длинах волн. Величину угловой дисперсии можно определять визуально, фотографическим или фотоэлектрическим способом по смещению энергетических центров дифракционных изображений.

Необходимо отметить, что угловой размер α дифракционного изображения зависит от диаметра D объектива приемной трубы и длины волны λ:

$$\alpha = 1{,}22\lambda/D \qquad (8.78)$$

и, как правило, незначительно превышает угловую дисперсию Δr. Поэтому для определения относительного положения энергетических центров визуальный способ находит ограниченное применение, и в основном используются только фотографический и фотоэлектрический способы.

Наиболее высокая точность измерений получена при использовании фотоэлектрического способа регистрации с помощью ПЗС-матрицы [123]. Этот способ регистрации реализован в фазовом фотоэлектрическом устройстве, схема приемной части которого изображена на рис. 8.18.

В качестве источников света в этом рефрактометре использованы гелиево-неоновый (λ = 0,63 мкм) и гелиево-кадмиевый (λ = 0,44 мкм) лазеры. Измерение дисперсионного угла основано на преобразовании этого угла в разность фаз двух электрических сигналов.

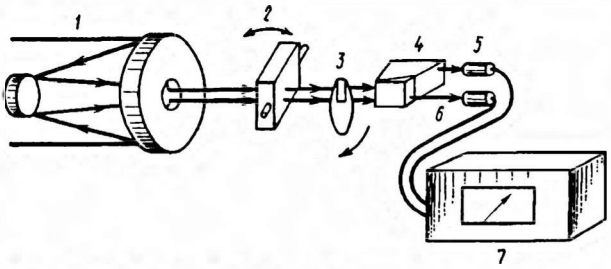


Рис. 8.18. Схема фазового фотоэлектрического устройства

1 – приемный объектив; 2 – оптический клин; 3 – модулирующий диск; 4– цветоделитель; 5 и 6 – фотодетекторы; 7 – фазометр

Световой пучок от этих лазеров, прошедший трассу, собирается с помощью оптической системы 1 и, проходя оптический клин 2, попадает на вращающийся диск 3. Для модуляции светового сигнала на этот диск нанесена маска, выполненная в виде чередующихся прозрачных и непрозрачных спиралеобразных полос. Модуляция светового сигнала осуществляется на частоте 2 кГц, которая более чем на два порядка выше частоты модуляции, вызываемой турбулентностью атмосферы. Модулированный световой пучок попадает на цветоделитель 4, и затем – на фотодетекторы 5 и 6. Вследствие дисперсии углы прихода световых лучей с различной длиной волны неодинаковы, и поэтому проекции маски модулирующего диска, создаваемые в красном и синем свете на фотодетекторах, не совпадают, что вызывает разность фаз сигналов. Для измерения разности фаз фотодетекторы 5 и 6 подключены к фазометру 7. Оптический клин 2, установленный перед модулирующим диском 3, служит для компенсации фаз сигналов. Величина наклона оптического клина является мерой разности лучей различной длиной волны, следовательно, и мерой дисперсии угла рефракции. Для создания одинаковых углов выхода из передающей части рефрактометра применяют вращающуюся вокруг оси пучка призму Аббе, благодаря которой совмещают среднее положение источников света с осью вращения призмы. Для коррекции небольших угловых отклонении выходных пучков используется клиновидная пластинка. Чтобы исключить ассимметрию изображений источников, перед приемным устройством установлена другая призма Аббе большего размера, либо система из трех зеркал, заменяющих призму Аббе. Если система зеркал (или призма Аббе) перед входным устройством повернута на угол α, то весь пучок разворачивается на угол 2α.

По полуразности между отсчетами, соответствующими положению системы зеркал 0 и 90° (пучок поворачивается на 180°), определяют значение дисперсии, свободное от инструментальных погрешностей.

Измерения с помощью рефрактометра выполнялись на трассе длиной 4 км. В табл. 8.8 сведены результаты определения рефракции для пасмурных дней в октябре-ноябре.

Таблица 8.8

Результаты определения рефракции

Дата	Время		Среднее значение вертикальной рефракции
	час.	мин.	
Октябрь 26	16	10	7″
27	15	40	9″
Ноябрь 4	15	10	14″
4	16	15	11″
17	14	15	14″

Погрешность измерения рефракции составила 2″.

Как уже отмечалось, при использовании дисперсионного двухволнового метода определения вертикальной рефракции получают два дифракционных изображения источников света. Энергетические центры этих дифракционных изображений отстоят друг от друга на величину угловой дисперсии меньшую, чем диаметр дифракционных изображений. Поэтому для повышения чувствительности метода были использованы интерференционные методы определения дисперсии рефракции.

При реализации этого способа формируется интерференционная картина, которую создают с помощью щелевых диафрагм. Угловой размер интерференционных полос примерно на порядок меньше, чем угловой размер дифракционного изображения источника света, и поэтому интерференционный метод измерений позволяет оценить угловую величину дисперсии рефракции порядка 0,01″.

Этот способ был реализован в визуальных интерферодисперситометре IDM, разработанном Тенгстромом Е.

Интерферодисперситометр IDM-1 представляет собой насадку на теодолит Вильд Т-3. Насадка имеет две двойные щели, расстояние между щелями составляет b_1 и b_2 и может изменяться, но при этом всегда должно соблюдаться условие:

$$b_1/b_2 = \lambda_1/\lambda_2. \qquad (8.79)$$

Усовершенствованный вариант интерферодисперситометра IDM-2 (рис. 8.19) позволяет изменять длину базы путем перемещения призмы 3 в направлении, перпендикулярном базе, а отраженные от внешних зеркал 1 и 2 лучи попадают в объектив.

Расстояние между внешними зеркалами 1 и 2 составляет B = 6 см. Спектральную разность вычисляют по формуле:

$$\Delta r = \lambda b_1/b_2 B. \qquad (8.80)$$

Для регистрации интерференционной картины применена фотокамера, а в качестве источников излучения использованы гелиево-неоновый (λ = 0,6328 мкм) и гелиево-кадмиевый (λ = 0,4416 мкм) лазеры.

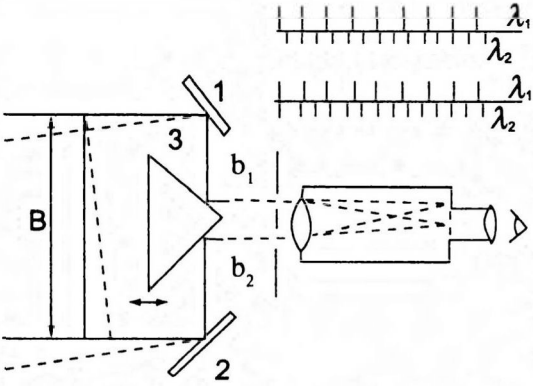


Рис. 8.19. Оптическая схема интерферодисперситометра IDM-2

При благоприятных условиях наблюдений с помощью интерферодисперситометра IDM-2 была достигнута точность определения угла рефракции, равная 0,2″.

При реализации интерференционного способа измерения в рефрактометрах в качестве углового чувствительного элемента используют оптические среды, обладающие двойным лучепреломлением [107]. Как показали испытания такого рефрактометра, инструментальная точность измерения дисперсии рефракции составляет 0,02–0,03″.

Необходимо отметить, что дисперсионный метод определения вертикальной рефракции до настоящего времени не нашел широкого применения в геодезической практике. Это в первую очередь связано со значительными трудностями определения с высокой точностью дисперсии рефракции в условиях турбулентной атмосферы. Действительно, чтобы определить угол рефракции величиной в 2″, необходимо выполнить измерения дисперсионного угла с точностью порядка 0,04″ (под таким углом на расстоянии 1 км должен быть виден линейный объект размером 0,2 мм), что в условиях турбулентной атмосферы является сверхсложной задачей. К тому же флуктуации углов прихода светового пучка на трассе в 1 км при этом могут составлять десятки секунд с частотой в несколько герц, т. е. на два порядка больше, чем дисперсия рефракции, а следовательно, и сам угол рефракции будет хаотически изменяться на такую величину за очень короткий период. По этим причинам дисперсионные рефрактометры не вышли из стадии лабораторных разработок.

8.7. Основы теории определения вертикальной рефракции по статистическим характеристикам оптического излучения, прошедшего слой турбулентной атмосферы

Рассмотренные выше методы определения рефракции основываются на том положении, что атмосфера является средой, неизменяющейся в период наблюдений. В действительности атмосфера, как всякая реальная среда, неоднородна, и ее оптические свойства непрерывно и хаотически меняются. Оценка чисел Рейнольдса (см. формулу 8.1), характеризующих переход из ламинарного течения газа в турбулентное, для атмосферного движения показывает, что все они имеют турбулентный характер [110].

Поэтому при подходе к решению задачи по определению рефракции должна учитываться турбулентность атмосферы, во многом определяющая ее оптические свойства. Поэтому для определения реальных оптических свойств атмосферы и, следовательно, величины рефракции необходимо использовать информацию об условиях прохождения на всей трассе в момент измерений. Классическое решение задачи определения рефракции, когда рассматриваются условия прохождения света в атмосфере, находящейся в статическом состоянии, не совсем корректно.

Чтобы решить задачу по определению рефракции в реальной атмосфере, необходимо использовать физические и математические зависимости, определяющие поле метеорологических элементов и показателя преломления в турбулентной атмосфере. К настоящему времени разработан ряд методов и аппаратура для их осуществления, позволяющие оценить статистические характеристики оптического излучения в атмосфере [8, 46, 50, 79, 80, 106, 112, 143, 145, 153]. Таким образом, с одной стороны, теория такого природного явления, как рефракция света в атмосфере, совершенно не учитывает динамику атмосферы, а с другой стороны, случайные искажения, возникающие в световой волне, прошедшей слой турбулентной атмосферы, хорошо изучены и выявлены. Зависимость между этими физическими явлениями (рефракцией и случайными искажениями) была впервые изучена в [58–68]. На основе этих теоретических и экспериментальных работ исследуется физическая связь между такими явлениями, как пульсации метеоэлементов, вызывающими флуктуации оптического излучения, прошедшего слой турбулентной атмосферы, и детерминированным эффектом рефракции в поле температурного градиента. Здесь же сформулированы основы теории определения вертикальной рефракции путем измерения статистических характеристик электромагнитной волны, а также разработан алгоритм решения задачи по определению угла рефракции с учетом полуэмпирической теории турбулентности атмосферы.

Методы определения вертикальной рефракции на основе измерения статистических характеристик электромагнитной волны можно назвать динамическими методами определения рефракции, так как они учитывают динамику атмосферы. Используемые ранее методы определения рефракции практически не учитывали динамику атмосферы и являются статическими.

В разделах 8.1 и 8.2 рассмотрены оптические свойства атмосферы как передающей среды, для описания которой используется математический аппарат теории случайных процессов. А так как рефракция полностью обусловлена условиями прохождения света в среде со случайными неоднородностями, то рефракцию также необходимо определять, используя соответствующие закономерности, которые в настоящее время разработаны для описания метеорологических полей в турбулентной атмосфере [46, 50, 85,106, 112,137].

В атмосфере всегда имеют место пульсации метеоэлементов, а следовательно, и пульсации показателя преломления.

Если в атмосфере средняя температура убывает с высотой $dT/dh = \gamma_a = -0{,}0098$град/м, то при вертикальном перемещении выделенного объема воздуха его температура не отличается от окружающей, и флуктуаций температуры при вертикальном перемешивании не происходит. Таким образом, условием возбуждения флуктуаций температуры за счет турбулентного перемешивания в термически расслоенной атмосфере является неравенство:

$$dT/dh \neq \gamma_a$$

В приземном слое воздуха днем из-за нагрева солнцем и радиационного выхолаживания ночью практически всегда выполнено условие

$$|dT/dh| >> \gamma_a.$$

Из-за отклонения градиента температуры от адиабатического возникает перемешивание слоев воздуха, что приводит к пульсациям температуры, которые пропорциональны градиентам температуры.

Кинематика турбулентности, как и структура поля температуры и показателя преломления, неотделимы. Изменение температуры на 1 град. С приводит к изменению показателя преломления на величину $\sim 1 \cdot 10^{-6}$.

Таким образом, определяя значение пульсаций метеоэлементов или пульсаций показателя преломления Δn (либо величин, характеризующих эти пульсации), можно оценить вертикальный градиент показателя преломления dn/dh, а следовательно, и угол рефракции.

Сущность методики определения рефракции на основе измерения статистических характеристик световой волны заключается в том, что всю информацию об условиях прохождения на трассе несет свет, прошедший трассу. Чтобы оценить рефракцию, необходимо расшифровать информацию, которую несет свет, прошедший слой турбулентной атмосферы.

В нашей стране и за рубежом данному направлению научных исследований посвящено много работ [33–36, 58–72, 74–77, 104, 114–118, 137, 148, 159, 163–165, 168]. Из зарубежных работ можно отметить исследования Ф.К. Бруннера и Г. Бахнерта [159, 163–165], в которых приведены результаты исследований определения рефракции с учетом турбулентности атмосферы.

Таким образом, задача по определению рефракции света, распространяющегося в турбулентной атмосфере, может быть решена путем оценки регулярного изменения показателя преломления с высотой на фоне беспорядочных флуктуаций показателя преломления воздуха, которые несут информацию о градиенте показателя преломления и, следовательно, о величине рефракции.

В свою очередь, для количественной оценки характеристик пульсаций метеоэлементов и показателя преломления разработано много методов, позволяющих выполнять измерения этих параметров в полевых условиях [8, 47, 48, 106].

При изучении полей метеоэлементов часто приходится иметь дело с нестационарными процессами, при изучении которых довольно сложно выявить различия между изменениями среднего значения функции и медленными пульсациями. В настоящее время разработана теория, описывающая микрометеорологию приземного слоя [97]. Реальные процессы никогда не бывают точно стационарными или однородными, хотя бы потому, что время измерений ограничено. При изучении оптических свойств атмосферы всегда приходится иметь дело с относительно быстрыми колебаниями измеряемой величины, накладывающимися на ее медленные изменения. Существенные трудности возникают в том случае, когда масштабы этих двух типов колебаний достаточно близки. Корреляционная функция в основном отражает связь между крупными неоднородностями, а свойства мелкомасштабных неоднородностей отражаются лишь в мелких деталях. Флуктуации показателя преломления (как и температуры) могут быть описаны с помощью структурной характеристики поля показателя преломления, на значение которой медленное изменение показателя преломления не оказывает влияние:

$$D_n(r) = \langle [n(r + r_0) - n(r_0)]^2 \rangle = C_n^2 \cdot r^{2/3},\ r << L_0. \qquad (8.81)$$

Здесь $D_n(r)$ – структурная функция; $n(r_0)$ – показатель преломления в точке, положение которой характеризуется радиусом-вектором r_0; C_n – структурная характеристика поля показателя преломления; r – расстояние между двумя точками, в которых определяется n. Величина C_n^2 пропорциональна дисперсии флуктуации показателя преломления σ_n^2.

Структурная характеристика поля показателя преломления воздуха C_n является параметром, определяющим интенсивность турбулентных пульсаций показателя преломления в области масштабов (расстояний между точками) от нескольких миллиметров до нескольких метров, не превышающих внешнего масштаба турбулентности L_0.

Значения C_n^2 в приземном слое атмосферы находятся в пределах $0{,}5 \cdot 10^{-17} ... 1 \cdot 10^{-13}$ см$^{-2/3}$. В приземном слое атмосферы наиболее типичным является $C_n^2 = (0{,}46 - 3{,}9) \cdot 10^{-16}$ см$^{-2/3}$ [48].

Как уже отмечалось, случайная разность температур в двух точках, расположенных на одинаковой высоте h и расстоянии 0,4 h, в приземном слое атмосферы может достигать 1 °С. Так как флуктуации температуры подчиняются нормальному закону распределения, то среднее квадратическое значение флуктуации температуры $\sigma_т$ может составлять 0,3°. В свою очередь флуктуации температуры вызывают флуктуации показателя преломлении воздуха:

$$\sigma_n = (n - 1)\, \sigma_т / T. \qquad (8.82)$$

При n = 1,003, T = 300° K, $\sigma_T = 0{,}3°$ получим среднее квадратическое значение пульсаций показателя преломления воздуха $\sigma_n = 0{,}3 \cdot 10^{-6}$.

Структурная характеристика поля показателя преломления воздуха для трассы может быть получена непосредственно из оптических измерений . Почти любой эксперимент по определению статистичеких характеристик световой волны, прошедшей слой турбулентной атмосферы, позволяет найти интенсивность турбулентных пульсаций, характеризующуюся величиной C_n^2. В частности структурная характеристика C_n^2 может быть найдена по результатам измерений дисперсии флуктуаций логарифма амплитуды, разности фаз или смещений изображения в фокальной плоскости приемной линзы и др. способами [48].

До разработки оптических способов определения величина C_n^2 определялась на основе метеорологических измерений.

Структурная функция $D_n(r)$ и структурная характеристика поля показателя преломления C_n могут быть выражены соответственно через структурную функцию $D_T(r)$ и структурную характеристику C_T поля температуры:

$$D_n(r) = \langle (n(r + r_0) - n(r_0))^2 \rangle = D_T(r) 10^{-12} \langle N \rangle^2 / \langle T \rangle^2, \qquad (8.83)$$

$$C_n = \frac{10^{-6} K(\lambda) < P >}{< T >^2} C_T, \qquad (8.84)$$

где r и r_0 – радиусы-векторы точек поля показателя преломления; <N>, <T>, <P> – средние значения индекса рефракции, температуры и давления; величина C_T выражена в град·см$^{-1/3}$; C_n^2 – в см$^{-1/3}$; P – в миллибарах (1 мб = 102 Па). Обычно значения C_T^2 лежат в пределах (10^{-6} – 10^{-3}) град^2·см$^{-2/3}$. Значение K(λ) выражено в град/мбар и может быть найдено из выражения (8.25) (см. табл. 8.2). Так как большинство лазерных геодезических приборов используют полупроводниковые излучатели на арсениде галлия (λ ~ 0,66 мкм), то для расчетов можно принять K(λ) ~ 78,5 град/мбар.

При выполнении экспериментальных работ величину C_T^2 в приземном слое атмосферы можно определить из градиентных измерений температуры и скорости ветра по формуле:

$$C_T^2 = C^2 a^2(\mathrm{Ri})(\chi h)^{4/3}(dT/dh - \gamma_a)^2, \qquad (8.85)$$

где C_T имеет размерность град/см$^{1/3}$; $C^2 = 2{,}8$; χ – постоянная Кармана, равная 0,4; h – высота, на которой измеряют градиент температуры; $\gamma_a = -0{,}98°/100$ м – адиабатический градиент ; $a^2(\mathrm{Ri})$ – универсальная функция; Ri – число Ричардсона, которое характеризует степень стратификации атмосферы и определяется из соотношения:

$$\mathrm{Ri} = \frac{g}{T} \frac{(\frac{dT}{dh} - \gamma_a)}{(\frac{du_e}{dh})^2}, \qquad (8.86)$$

в котором g – ускорение свободного падения; T – температура, °K; dT/dh – вертикальный температурный градиент; $du_в/dh$ – вертикальный градиент скорости ветра; γ_a – адиабатический градиент температуры.

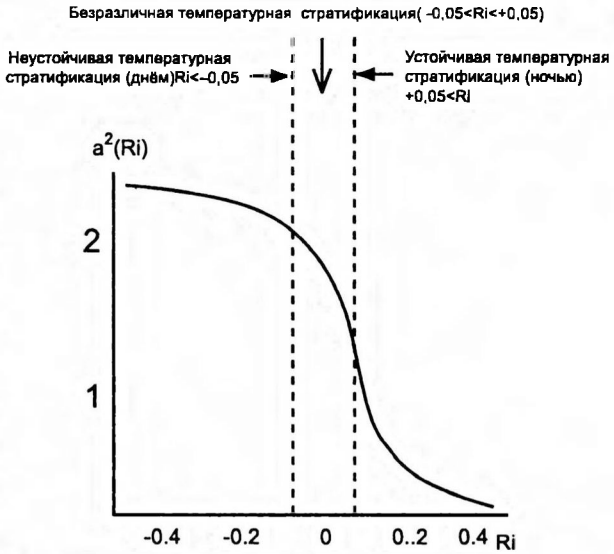


Рис. 8.20. Универсальная функция a(Ri)

Входящие в формулу (8.85) значения C^2 и $a^2(Ri)$ были вычислены [48] на основе независимых измерений C_T^2 и вертикальных профилей температуры и скорости ветра. На основании этих измерений получено значение $C^2 = 2{,}8$, а также получена эмпирическая зависимость $a^2(Ri)$ от величины Ri, которая представлена на рис. 8.20.

В табл. 8.9 приведены значения $a^2(R)$ и a(Ri) в зависимости от числа Ri.

Таблица 8.9

Зависимость $a^2(Ri)$ и a(Ri) от числа Ричардсона Ri

Температурная стратификация атмосферы															
Неустойчивая						Безразличная					Устойчивая				
Ri	–0,5	–0,4	–0,3	–0,2	–0,1	–0,05	–0,025	0	+0,025	+0,05	+0,1	+0,2	+0,3	+0,4
$a^2(Ri)$	2,35	2,34	2,30	2,25	2,16	2,00	1,85	1,65	1,50	1,40	0,92	0,56	0,48	0,40
a(Ri)	1.53	1,52	1,51	1,50	1,47	1.41	1,36	1,28	1,22	1,18	0,96	0,75	0,69	0,63

Как видно из табл. 8.9, при неустойчивой температурной стратификации атмосферы значение функции a(Ri) мало изменяется при различных значениях $Ri > -0{,}05$ и для практических расчетов может быть принята равной 1,5. При безразличной температурной стратификации, когда $-0{,}05 < Ri < +0{,}05$ значение a(Ri) может считаться постоянным и равным 1,3 и при устойчивой стратификации, когда $+0{,}05 < Ri$, значение a(Ri) может быть принято равным 0,76 с относительной средней квадратической ошибкой порядка ±0,1, что составляет ~10 % от величины a(Ri).

Среднеинтегральное значение C_n структурной характеристики поля показателя преломления для трассы можно определить экспери-

ментально, что позволяет, используя это значение и соотношения (8.84) и (8.85) найти значение вертикального градиента температуры воздуха.

$$\frac{dT}{dh} = \pm \frac{10^6 C_n < T >^2}{K(\lambda) < P > Ca(Ri)(\chi h)^{2/3}} + \gamma_a = \pm \frac{C_n < T >^2}{B < P > h^{2/3} a(Ri)} + \gamma_a, \quad (8.87)$$

где K(λ) = 78,5град/мбар; C = 1,67; χ = 0,4; B =10^{-6}·K(λ) Cχ$^{2/3}$ = 0,71·10^{-4} град/мбар .

Обычно вертикальный градиент показателя преломления воздуха представляют в виде двух частей, состоящих из нормального градиента показателя преломления и аномального.

Нормальный градиент показателя преломления воздуха обусловлен двумя составляющими, а именно:

– вертикальным градиентом давления dP/dh, который в приземном слое атмосферы с известным приближением можно считать постоянным и равным ~-0,12мб/м и
– адиабатическим градиентом температуры γ_a = –0,0098 град/м, который наблюдается при безразличной стратификации, соответствующий периодам спокойных изображений либо на высотах более 100 м от поверхности земли.

В свою очередь аномальная часть вертикального градиента показателя преломления обусловлена величиной (dT/dh – γ_a). С учетом вышесказанного формула (8.63) может быть написана в следующем виде:

$$r'' = \rho'' L[0{,}17 \cdot 10^{-7} + 0{,}5 \cdot 10^{-6}\gamma_a + 0{,}5 \cdot 10^{-6}(dT/dh - \gamma_a)] \frac{1}{n} =$$
$$r''_н + 1 \cdot 10^{-6}\rho''(L/2)\,(dT/dh - \gamma_a)\frac{1}{n}, \quad (8.88)$$

где r″ – угол вертикальной рефракции; $r''_н = \rho''$ L (0,17·10^{-7} + 0,5·10^{-6} γ_a) – угол нормальной рефракции; $r''_н$ = 2,5·10^{-5} см$^{-1}$L (L – длина трассы в см), т. е. при «нормальном» значении вертикального градиента температуры, равном адиабатическому γ_a, вертикальная рефракция имеет положительное значение и составляет 2,5″ на каждый км трассы; вертикальный градиент температуры dT/dh, как и γ_a, имеет размерность град с/м, а коэффициент 1·10^{-6} имеет размерность град$^{-1}$с.

Для практических расчетов можно также использовать приближенную формулу:

$$r'' = \frac{\rho'' L}{2}(0{,}34 \cdot 10^{-7} + 1{,}0 \cdot 10^{-6}\frac{d''T}{dh}). \quad (8.89)$$

Используя соотношения (8.89) и (8.87), можно найти значение, угла вертикальной рефракции с учетом структурной характеристики поля показателя преломления C_n:

$$r'' = \frac{\rho'' L}{2n}[0{,}34 \cdot 10^{-7} + 1{,}0 \cdot 10^{-6}(\pm \frac{C_n < T >^2}{B < P > h^{2/3} a(Ri)} + \gamma_a)] =$$
$$= r''_н \pm \frac{K \cdot L \cdot C_n < T >^2}{< P > h^{2/3}\alpha(Ri)}, \quad (8.90)$$

где $r''_н = \frac{\rho'' L}{2}(0{,}34 \cdot 10^{-7} + 1{,}0 \cdot 10^{-6}\gamma_a) = 2{,}5''км^{-1}L$. (Здесь L – длина трассы в км,); $K = \rho'' 1{,}0 \cdot 10^{-6} град^{-1}/2Bn = 1{,}45 \cdot 10^{3} град^{-2}$ угл.сек.·мбар.

Таким образом, измеряя статистические характеристики X оптического излучения, прошедшего слой турбулентной атмосферы, можно определить угол вертикальной r'', выполнив следующую последовательность преобразований

$$X \dashrightarrow C_n \dashrightarrow C_T \dashrightarrow dT/dh \dashrightarrow dn/dh \dashrightarrow r''. \qquad (8.91)$$

Так как ошибки измерения метеоэлементов T и P обычно не более 1 град и 1 мбар, т.е. относительные ошибки достаточно малы (менее 1%), то практически они не оказывают влияния на точность определения угла рефракции. Точность определения r зависит в основном от точности определения C_n, т. е.:

$$\sigma_r = \frac{K \cdot L \cdot \langle T \rangle^2}{\langle P \rangle h^{2/3} a(Ri)} \sigma_c, \qquad (8.92)$$

где σ_r и σ_c – средние квадратические ошибки угла рефракции и структурной характеристики поля показателя преломления.

Таким образом, при определения угла вертикальной рефракции в приземном слое атмосферы необходимо знать значение структурной характеристики поля показателя преломления C_n^2, а затем определить в соответствии с (8.90) угол вертикальной рефракции. Основная задача при этом заключается в оценке параметра C_n^2, который является важнейшей характеристикой оптического поля турбулентной атмосферы и может быть определен на основе измерений статистических характеристик электромагнитной волны.

8.8. Методы определения структурной характеристики поля показателя преломления воздуха

К настоящему времени разработан целый ряд методов определения структурной характеристики C_n^2. Почти любой эксперимент по определению статистичеких характеристик световой волны, прошедшей слой турбулентной атмосферы, позволяет найти интенсивность турбулентных пульсаций, характеризующуюся величиной C_n^2. В частности, структурная характеристика C_n^2 может быть найдена по результатам измерений дисперсии флуктуаций логарифма амплитуды, разности фаз или смещений изображения в фокальной плоскости приемной линзы и т.д. Следует отметить, что значения C_n^2 могут быть получены путем измерения искажений в акустической волне либо радиоволне, распространяющейся в турбулентной атмосфере [48, 145]. Многообразие возможных методов определения рефракции на основе измерения статистических характеристик электромагнитной (звуковой) волны отражено на рис. 8.21.

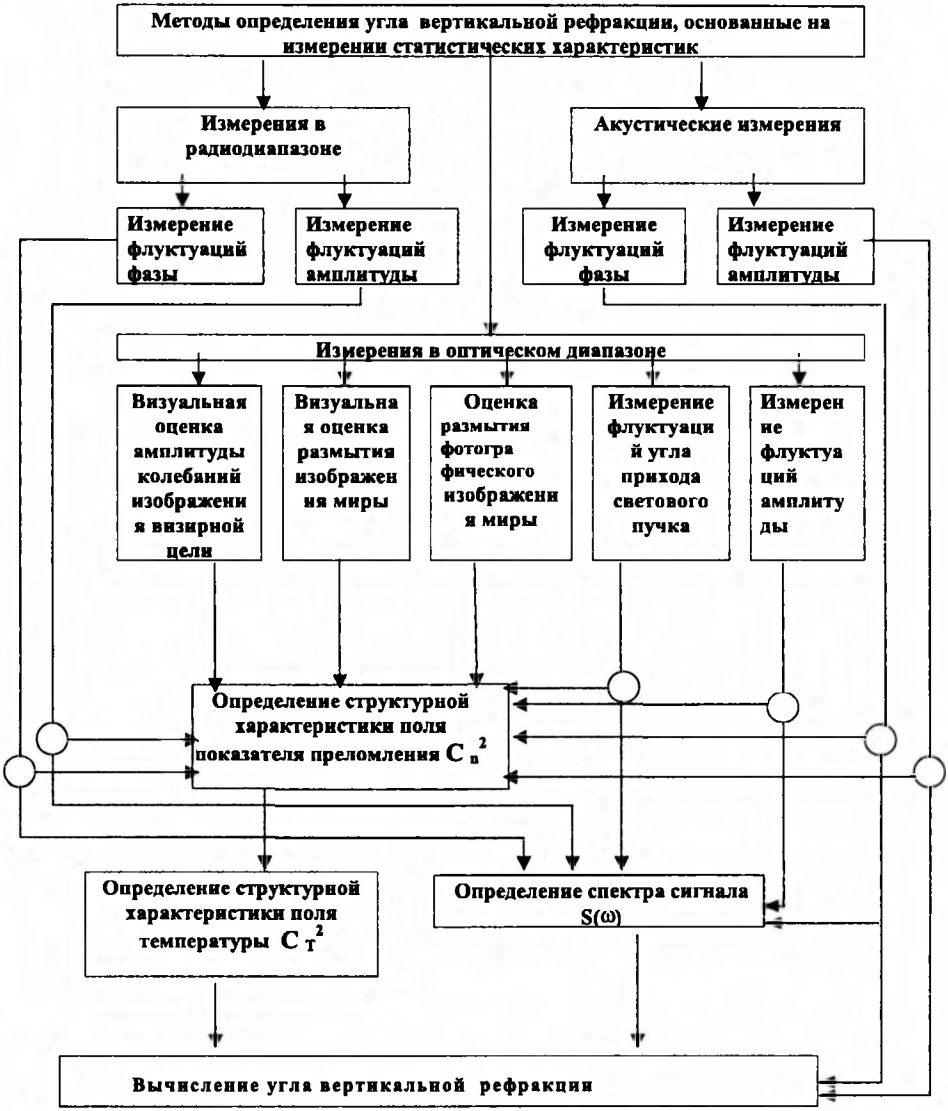


Рис. 8.21. Методы определения структурной характеристики показателя преломления воздуха

Определение знака вертикальной рефракции связано с дополнительным анализом флуктуаций параметров волны (см. 8.9). На первом этапе исследований оптических свойств турбулентной атмосферы использовался метод определения C_n^2 на основе измерения вертикальных градиентов скорости ветра и температуры [145]. При этом измерения вертикальных градиентов температуры обычно выполняют с помощью

термоградиентографов, устанавливаемых на мачте, а градиентов скорости ветра – с помощью анемометров.

Из-за сложности реализации градиентных измерений в полевых условиях мачты обычно устанавливают в одной-двух точках трассы. Если трасса горизонтальна и достаточно однородна, то результаты этих измерений в той или иной степени могут быть использованы для вычисления C_n^2 на данной трассе на момент измерений.

В реальных условиях трассы не являются однородными, и время измерения C_n^2 по метеоданным может не совпадать со временем выполнения оптических измерений, результаты которых необходимо корректировать за рефракцию. По этим причинам в геодезической практике данный метод определения C_n^2 практически не используется. Методы определения C_n^2 на основании измерения флуктуаций радиоволн или акустических волн также практически не находят применения, так как для наземных высокоточных геодезических наблюдений используется в основном оборудование, работающее в оптическом диапазоне.

Поэтому в данном разделе рассмотрены методы определения C_n^2 только на основе измерения статистических характеристик световой волны. Оптические методы определения C_n^2 имеют следующие преимущества перед метеорологическим методом [47]:

1. Оптический датчик не искажает структуру турбулентного потока, поскольку нет необходимости размещать прибор непосредственно в исследуемой среде.
2. Оптические измерения обеспечивают большую стабильность и достоверность получаемых статистических данных, так как по своей природе они связаны с дополнительным осреднением определяемой характеристики вдоль трассы распространения светового пучка.
3. За счет малой длины волны оптического излучения и наличия практически безинерционных фотоэлектрических преобразователей, можно обеспечить высокое пространственное и временное разрешение измеряемых параметров турбулентного потока.

Ниже более детально рассмотрены оптические методы определения C_n^2.

а) Определение C_n^2 по измерениям дисперсии флуктуаций интенсивности

С появлением лазеров этот метод начал широко использоваться в экспериментальных исследованиях. Так, в [47,106] приведены результаты определения C_n на основе измерения среднего квадрата флуктуации логарифма интенсивности.

Дисперсия логарифма интенсивности

$$\sigma_I = \langle(\ln I - \langle \ln I \rangle)^2\rangle, \qquad (8.93)$$

$$\sigma_I^2 = 2{,}24\, k^{7/6} \int_0^L C_n^2\ (x)\, x^{5/6} dx \qquad (8.94)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, L – длина трассы.

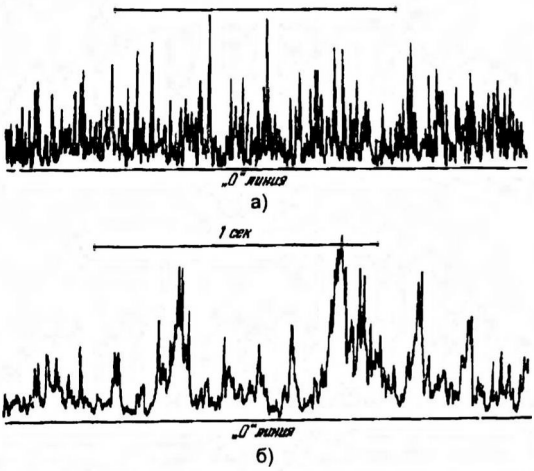
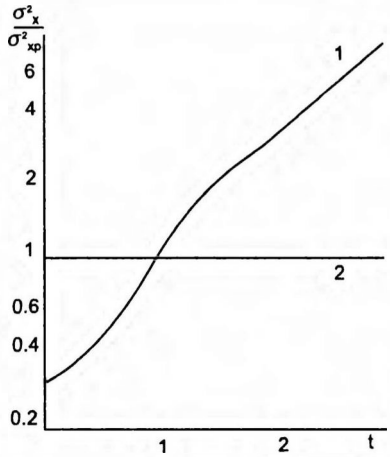


Рис. 8.22. Флуктуации интенсивности излучения в турбулентной атмосфере [145]
а) область слабых флуктуаций;
б) область сильных флуктуаций

При оценке флуктуации логарифма интенсивности разделяют область слабых флуктуации ($\sigma_I^2 < 0{,}8$) и область сильных флуктуации ($\sigma_I^2 > 0{,}8$) На рис. 8.22 приведена осциллограмма интенсивности света I(t), полученная на приземной трассе при расстоянии 1750 м между приемником и источником света [47].

На рис. 8.23 приведены кривые, характеризующие распределения нормированной дисперсии уровня амплитуды σ^2/σ_0^2 в поперечном сечении коллимированного пучка ($F = \infty$) в зависимости от нормированного расстояния r от оси пучка до «центра тяжести» светового пятна при различных числах Френеля $Q = L\lambda/2\pi a^2$. Здесь L – длина трассы; λ –длина волны излучения лазера; a – эффективный радиус пучка. (Эффективный радиус пучка – расстояние от оси пучка до точки, где интенсивность уменьшается в e раз).



Из рис. 8.23 видно, что флуктуации амплитуды возрастают по мере смещения точки наблюдения от оси к краю пучка. При расфокусировке пучка наблюдается выравнивание

Рис. 8.23. Зависимость нормированной дисперсии флуктуаций амплитуды σ^2/σ_0^2 от нормированного расстояния r_0 от оси пучка до «центра тяжести» светового пятна [47]
Кривая 1 характеризует относительную дисперсию для сфокусированного пучка, а 2 – для расфокусированного пучка

дисперсии флуктуаций интенсивности по сечению пучка (кривая б). Минимальные флуктуации наблюдаются в узком коллимированном пучке (кривая а).

При слабой турбулентности или на коротких трассах относительные флуктуации невелики.

При увеличении длины трассы или усилении турбулентности флуктуации возрастают. Когда среднеквадратическое значение относительных флуктуаций становится близким к единице, результаты расчетов по формуле (8.92) оказываются неприменимы, что подтверждают экспериментальные данные, которые оказываются ниже расчетных. Важной характеристикой флуктуаций интенсивности лазерного пучка, распространяющегося в турбулентной атмосфере, является временной спектр. Имеющуюся информацию о спектре можно использовать для получения информации о характере рефракции. Применяя соответствующие методы обработки оптических сигналов, можно ослабить влияние случайных составляющих сигнала.

В области слабых флуктуаций экспериментальные и теоретические данные хорошо согласуются, а для области сильных флуктуаций удовлетворительной теории нет. Слабые флуктуации наблюдаются на участке в несколько сотен метров, и для оценки дисперсии логарифма интенсивности используют формулу [47]:

$$\sigma_l^2 = 0{,}308\, C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \qquad (8.95)$$

откуда следует:

$$C_n^2 = 3{,}25\, \sigma_l^2 k^{-7/6} L^{-11/6}. \qquad (8.96)$$

С увеличением длины трассы и интенсивности турбулентности воздуха величина σ_l^2 сначала возрастает, а затем наступает насыщение. При дальнейшем увеличении L и C_n^2 экспериментально измеренные значения флуктуаций интенсивности оказываются выше расчетных. Сама величина дисперсии логарифма интенсивности при измерениях на коротких трассах существенно зависит от величины внутреннего масштаба турбулентности, который необходимо измерять независимо, что вносит дополнительную неопределенность. По этим причинам дистанционный амплитудный метод измерения структурной характеристики и, в особенности ее значения, усредненного вдоль длинной трассы, пока не использован для определения рефракции при выполнении геодезических измерений.

б) Определение C_n^2 по ослаблению интенсивности светового пучка в фокусе приемной линзы

Интегральное значение структурной характеристики поля показателя преломления можно определять, измеряя отношение светового потока P_S, прошедшего через узкую щель шириной D, расположенную

в центре дифракционной картины, к полному потоку P через объектив радиуса R в виде [48]:

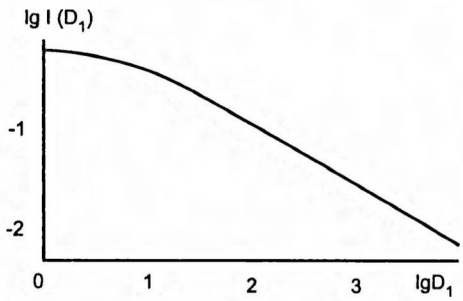


Рис. 8.24. Зависимость величины $I(D_l)$, определяющей среднюю интенсивность в фокусе линзы от структурной функции $D_l(2R)$ комплексной фазы падающей волны

$$P_S / P = \frac{4R\Delta}{\pi\lambda F} I(D_l). \quad (8.97)$$

Здесь Δ — ширина щели; λ — длина волны лазерного излучения; $D_l(2R) = 2{,}91 \cdot C_n^2 k^2 x \cdot (2R)^{5/3}$; F – фокусное расстояние объектива; интеграл $I(D_l)$, определяющий среднюю интенсивность в фокусе линзы в зависимости от структурной функции комплексной фазы падающей волны находится из графика, представленного на рис. 8.24.

В случае точечного источника света наибольший вклад в пространственно усредненное значение структурной характеристики вносит участок трассы, прилегающий к приемнику.

Для реализации этого метода измерений C_n^2 был разработан прибор [47], у которого в качестве источника света использовался гелиево-неоновый лазер, работающий на основной моде (гауссово распределение энергии в пучке). Для уменьшения расходимости пучка использовалась телескопическая система. После прохождения турбулентной трассы пучок света падал на приемный объектив, в фокальной плоскости которого устанавливалась диафрагма, представляющая собой вертикальную щель. Диаметр лазерного пучка был примерно в два раза больше диаметра 2R приемного объектива. Ширина щели была в три раза меньше диаметра кружка Эйри приемного объектива, а ее длина – в три раза больше максимально возможного эффективного диаметра размытой турбулентностью дифракционной картины в фокальной плоскости. Вертикальное расположение щели избавляло от помех, обусловленных вертикальной рефракцией.

Световой поток через щель попадал на фотодетектор и после обработки регистрировался.

Конструкция прибора предусматривала возможность регистрации и сравнения сигнала, прошедшего диафрагму, и сигнала, который диафрагмой не обрезался. Таким образом, разность отсчетов на ленте самописца при переключении прибора была равна отношению потоков через щель и объектив, выраженному в децибелах. Выбранный режим работы прибора и способ измерений исключали влияние нестабильности работы лазера и прозрачности атмосферы на получаемые данные. В соответствии с формулой (8.95) измеряемая прибором величина равна:

$$\delta = 20 \lg \frac{4R\Delta}{\pi\lambda F K_o}, \qquad (8.98)$$

где K_0 – коэффициент ослабления полного светового потока оптической системой прибора.

Таким образом, во время исследований определялось отношение P_S/P и затем, используя график, представленный на рис. 8.23, находилось значение $D_l(2R)$. В свою очередь структурная функция $D_l(2R)$ и структурная характеристика поля показателя преломления связаны соотношением (8.97), что позволяет вычислить величину C_n^2. Полученные экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с результатами измерений C_n^2 метеорологическим методом на однородных трассах [48].

в) Измерение C_n^2 по размытию средней дифракционной картины и размытию изображения миры

Структурную характеристику поля показателя преломления C_n^2 можно определить, измеряя степень размытия дифракционной картины в фокальной плоскости приемной линзы [47]:

$$\tilde{C}_n^2 = \frac{0{,}95(y_k / 2F)}{2{,}91 k^{1/3} L}. \qquad (8.99)$$

Здесь $y_к$ – полуширина, измеренная на уровне половины максимальной средней интенсивности. Формула (8.99) соответствует измерению интенсивности с помощью вертикальной щели, длина которой во много раз превышает средний размер дифракционного изображения, а ширина удовлетворяет обратному условию.

Для проведения измерений C_n^2 этим методом была разработана аппаратура, где источником света служил одномодовый гелиево-неоновый лазер с угловой расходимостью 2′. С помощью коллиматора расходимость пучка уменьшалась до 8″ при выходном диаметре пучка 3,5 см. В конечной точке трассы устанавливалось приемное устройство, которое имело приемный объектив (F = 200 см), через усилитель подключалось к регистрирующему устройству. В фокальной плоскости приемного объектива перед фотодетектором была установлена щель шириной 20 мкм, приводимая в равномерное движение со скоростью 0,01 мм/мин. После щели был установлен интерференционный светофильтр с полосой пропускания 60Å на волне λ = 0,6328 мкм. Сигнал с фотодетектора после прохождения через усилитель постоянного тока подавался на регистрирующее устройство.

Для усреднения быстрых флуктуаций тока фотодетектора на входе усилителя была включена интегрирующая цепочка с постоянной времени интегрирования, равной 2 мин. Время интегрирования подбиралось экспериментально.

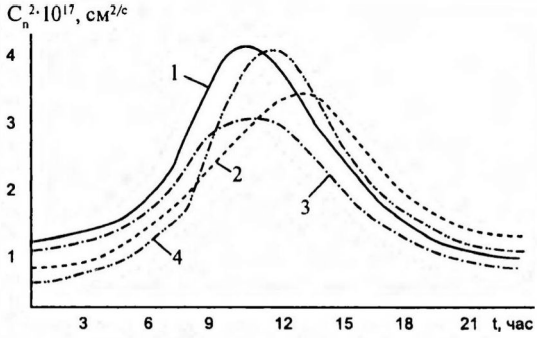


Рис. 8.25. Суточный ход структурной характеристики в июле на трассе длиной 25 км [48]
1–4 июля; 2–5 июля; 3–6 июля; 4–7 июля

Измерения проводились непрерывно в течение четырех суток с 4 по 7 июля 1969 г. на трассе длиной 25 км [47]. Превышение передающего пункта над приемным составляло 350 м. Суточный ход изменения C_n^2, полученный скользящим усреднением за каждые 3 часа, приведен на рис. 8.25. Эти данные позволяют оценить временные вариации величины C_n^2, на длинных трассах в условиях гористой местности.

Этот метод определения C_n^2 требует создания специальной измерительной аппаратуры, и поэтому до сих пор не нашел своего применения при исследованиях рефракции, хотя на него было обращено внимание еще в начале 1970-х гг. как на один из первых дистанционных методов измерений [64] в турбулентной атмосфере.

Достаточно простая и удобная методика определения величины структурной характеристики C_n^2 по величине размытой области изображения миры была предложена в работе [8], а позднее использовалась во многих работах по исследованию оптических свойств атмосферы и в том числе при определении рефракции [33–35]. Согласно этой методике, для определения C_n^2 необходимо с помощью качественного длиннофокусного объектива фотографировать с большой выдержкой (порядка 1 мин.) удаленную радиальную миру. После чего значения C_n^2 находятся по величине размытой области изображения миры.

Размытие изображение миры характеризуется контрастом:

$$\alpha = \frac{< I_{max} > - < I_{min} >}{< I_{max} > + < I_{min} >}, \qquad (8.100)$$

где $<I_{max}>$ и $<I_{min}>$ – соответственно максимальное и минимальное значение освещенности в плоскости изображения.

Интегральное значение структурной характеристики поля показателя преломления C_n^2 может быть найдено для миры, состоящей из равношироких черных и белых полос — так называемый тест Фуко (рис. 8.25), ширина которых равна M/2:

$$\tilde{C}_n^2 = \frac{\ln \frac{4}{\pi\alpha}}{1{,}46 L k^{1/3} \left(\frac{2\pi F}{m}\right)^{5/3}}, \qquad (8.101)$$

где $\tilde{C}_n$ – интегральное значение структурной характеристики; α – контраст изображения; L – длина трассы; k – волновое число, F – фокусное расстояние объектива; m = M/V. (Здесь V – линейный коэффициент увеличения оптической системы, M – период миры). Интегральное значение $\tilde{C}_n^2$ связано с истинной величиной $\bar{C}_n^2$, усредненной для всей трассы, соотношением $\tilde{C}_n^2 = {}^3/_8\,\bar{C}_n^2$.

В том случае, когда используется радиальная мира в виде набора мир с изменяющимся периодом, C_n^2 определяется в виде:

$$\bar{C}_n^2 = \frac{\ln\frac{4}{\pi\alpha}}{1{,}46Lk^{1/3}\left(\frac{2\pi F}{2r_0\Theta}\right)^{5/3}}, \qquad (8.102)$$

где r_0 – текущий радиус окружности, приведенный из центра миры, Θ – ее угловой период.

В работе [33] при исследованиях рефракции использовалась радиальная мира (рис. 8.26) с угловым периодом Θ и угловым размером $V_м = d_м/L$ ($d_м$ – диаметр миры), которые связаны со средним квадратическим значением флуктуаций угла прихода соотношением:

$$\sigma_\alpha = 0{,}156(d_P/d_M)V_M\Theta, \qquad (8.103)$$

где d_P – диаметр размытия миры.

Структурная характеристика поля показателя преломления может быть найдена из соотношения [33]:

$$\tilde{C}_n^2 = \frac{4{,}28}{L}10^{-3}(2R)^{1/3}\left(\frac{d_P}{d_M}V_M\Theta\right)^2. \qquad (8.104)$$

$$\bar{C}_n^2 = 8/3\tilde{C}_n^2. \qquad (8.105)$$

Таким образом, истинная величина структурной характеристики поля показателя преломления может быть найдена из следующего соотношения:

$$\bar{C}_n^2 = \frac{1{,}14}{L}10^{-2}(2R)^{1/3}\left(\frac{d_P}{d_M}V_M\Theta\right)^2. \qquad (8.106)$$

Измерения структурной характеристики по изложенной методике проводились на однородной ровной степной трассе протяженностью 770 м [47]. Здесь использовалась мира с переменным угловым периодом $\Theta_1 = 1{,}96$ рад$^{-1}$ и $\Theta_2 = 3{,}92$ рад$^{-1}$. Фотографирование миры проводилось с экспозицией 30 с и 60 с. Оценка величины C_n^2 осуществлялась при разных значениях контраста, включая значение $\alpha = 0{,}1$, которое соответствует полному визуальному размытию миры. Одновременно

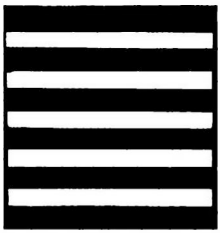


Рис. 8.26.
Параллельная мира

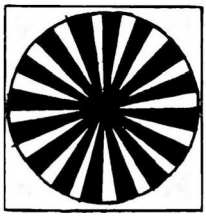


Рис. 8.27.
Радиальная мира

определяли C_n^2 метеорологическим методом. Результаты измерений, полученные независимо разными методами на указанной трассе, незначительно различались между собой.

г) Определение C_n^2 по флуктуациям угла прихода пучка лазерного излучения

При распространении лазерного пучка в турбулентной атмосфере возникают его хаотические смещения. Это явление легко наблюдается при наличии тумана или дыма, а также если на пути следования пучка поставить экран. Дрожание лазерного пучка имеет ту же природу, что и колебание изображений визирных целей.

Смещение световых пучков в турбулентной атмосфере обусловлено в первую очередь флуктуациями фазы световой волны, а также в некоторых случаях – влиянием флуктуаций амплитуды. Оценка флуктуаций направления распространения важна не только для определения величины рефракции, но и для других практических приложений в области геодезии, локации, астрономии, так как точность и надежность таких систем зависит не только от рефракции, но и от случайных смещений пучка. Поэтому метод определения C_n^2 и рефракции по флуктуациям угла прихода представляет значительный практический интерес.

Под флуктуациями угла прихода пучка понимаются случайные изменения угла между оптической осью приемного объектива и приходящим в объектив световым пучком.

Обычно положение светового пучка в плоскости, перпендикулярной направлению распространения, характеризуется координатами центра тяжести случайного распределения интенсивности. Например, среднее квадратическое значения угла прихода и C_n^2 связаны зависимостью [48]:

$$\sigma_\alpha = 2{,}84\, \varphi(\alpha_R) C_n^2\, L\, (2R)^{-1/3} \qquad (8.107)$$

или

$$\sigma_\alpha = 1{,}69\, C_n\, L^{1/2}\, (2R)^{-1/6}\, [\varphi(\alpha_R)]^{1/2},$$

где C_n^2 – структурная характеристика поля показателя преломления атмосферы вблизи земной поверхности, которая зависит от условий распространения светового пучка; L – длина трассы; R – радиус объектива приемника; $\varphi(\alpha_R)$ – числовая функция, характеризующая осредняющее действие приемной апертуры и зависящая от длины трассы и диаметра приемной апертуры (см. 8.2). $\varphi(\alpha_R)$ определяют по графику, представленного на рис. 8.3.

В том случае, если диаметр приемного объектива превосходит радиус корреляции флуктуаций, то на объектив будут попадать участки волнового фронта с противоположными знаками флуктуаций. В результате этого полный световой поток будет флуктуировать меньше светового потока, поперечные размеры которого равны или меньше радиуса корреляции. Радиус корреляции интенсивности плоской волны имеет порядок первой зоны Френеля $\sqrt{\lambda L}$. Геодезические приборы имеют объективы с характерным размером диаметра 40—50 мм, который значительно больше радиуса корреляции для трасс протяженностью менее 2 км. Осредняющее действие объектива может быть охарактеризовано функцией осреднения $\varphi(\alpha_R)$, показывающей, во сколько раз величина относительных флуктуаций полного светового потока через объектив радиуса R меньше, чем для точечного объектива.

Таким образом, измеряя флуктуации угла прихода на трассе, можно оценить структурную характеристику поля показателя преломления:

$$C_n^2 = 0{,}35\sigma_\alpha^2\, \varphi(\alpha_R)^{-1} L^{-1} (2R)^{1/3}. \qquad (8.108)$$

Формула (8.108) справедлива для наблюдений точечного источника света, установленного на противоположном конце трассы. Как показали исследования [106], при наблюдениях уголкового отражателя, установленного на противоположном конце трассы, амплитуда флуктуаций удваивается, т.е.:

$$\sigma_\alpha^2{}_{(\text{отр})} = 4\sigma_\alpha^2. \qquad (8.109)$$

Таким образом:

$$\overline{C}^2{}_n = 0{,}088\sigma_\alpha^2{}_{(\text{отр})}\, \varphi(\alpha_R)^{-1} L^{-1} (2R)^{1/3}. \qquad (8.110)$$

В случае использования квазисферического источника света наибольший вклад в пространственное усредненное значение структурной характеристики вносит участок трассы, прилегающий к приемнику, поэтому интегральное значение $\widetilde{C}_n^2$ связано с истинной величиной $\overline{C}_n^2$ соотношением $\widetilde{C}_n^2 = {}^3/_8\, \overline{C}_n^2$. Следовательно, равномерно усредненная по всей трассе величина:

$$\overline{C}_n^2 = \frac{8}{3}\widetilde{C}_n^2 = 0{,}93\, \sigma_\alpha^2 \cdot \varphi(\alpha_R)^{-1} \cdot L^{-1} (2R)^{1/3}. \qquad (8.111)$$

Формулу (8.111) используют для определения C_n^2 в полевых условиях, когда наблюдения ведутся с помощью некогерентных методов, например, при наблюдении миры.

В том случае, когда оценка флуктуаций углов прихода осуществляется косвенно визуальным методом на основании измерения амплитуды колебаний изображения визирной цели, иногда используют соотношение [148]:

$$C_n^2 = \sigma_\alpha^2 L^{-1}(2R)^{1/3}, \qquad (8.112)$$

где C_n вычисляют на основании измерений амплитуды колебаний изображения визирной цели.

Метод определения C_n^2 с помощью автоматического углоизмерительного устройства был использован на геодинамическом полигоне под Ашхабадом [69, 70].

Трасса длиной 2,5 км проходила над холмистой поверхностью, равномерно покрытой травой. Эквивалентная высота трассы составляла 21 м. Измерения проводились в течение суток в несколько циклов – зимой в феврале и летом – в июне.

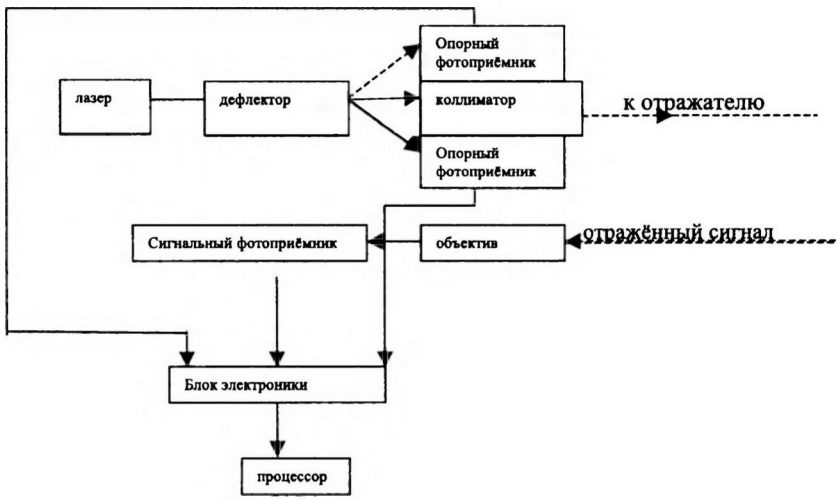


Рис. 8.28. Структурная схема лазерного углоизмерительного устройства



Рис. 8.29. Внешний вид лазерного углоизмерительного устройства

Для измерений флуктуаций угла прихода использовалось лазерное углоизмерительное устройство (ЛУ), структурная схема которого показана на рис. 8.28, его внешний вид – на рис. 8.29. Прибор работает следующим образом. Световой пучок от гелиево-неонового лазера (см. рис. 8.28) попадает на сканирующий узел, а затем проходит телескопическую систему.

На выходе телескопической системы угловая скорость сканирования пучка снижается в V раз, кроме того, в V раз уменьшается угловая расходимость пучка (V – увеличение телескопической системы).

С помощью электродвигателя пучок развертывается с постоянной угловой скоростью,

обеспечивающей частоту измерений 50 Гц. Выходной объектив угломерного устройства выполнен в виде цилиндрической линзы, по краям которой установлены опорные фотоприемники. После прохождения цилиндрической линзы лазерный пучок увеличивает угловой раствор в горизонтальной плоскости, которая перпендикулярна плоскости сканирования.

В течение каждого полупериода сканирования лазерный пучок облучает опорные фотоприемники, а также отражатель, установленный на конце трассы. Опорные фотоприемники установлены по краям выходного объектива. Отраженные импульсы от уголкового отражателя попадают в объектив сигнального фотоприемника.

В процессе измерений по временному интервалу, заключенному между сигналами, регистрируемыми на выходе опорных фотоприемников, за каждый период сканирования определяют угловую скорость сканирования, а направление на цель определяют по временному интервалу между одним из опорных импульсов и импульсом, полученным с сигнального фотоприемника (см. 2.9).

Блок электроники измеряет эталонный временной интервал между сигналами с опорных фотоприемников и временной интервал между сигналами с опорного и сигнального фотоприемников. Процессор, подключенной к блоку электроники через устройство сопряжения, выполняет обработку результатов измерений, т. е. на основании измеренных временных интервалов получают угол i между опорным направлением, заданном в приборе, и направлением на цель (см. 2.9). Основные технические характеристики прибора представлены в табл. 8.10.

Таблица. 8.10

Основные технические характеристики лазерного углоизмерительного устройства

Технический параметр	Величина
Дальность действия	3,0 км
Максимально измеряемый угол	1°
Точность угловых измерений	1,0″
Частота сканирования	50 Гц
Диаметр приемного объектива	100 мм
Диаметр передающего объектива	34 мм
Увеличение передающей телескопической системы	25^{x}
Источник излучения	лазер He-Ne
Масса приемопередатчика	10 кг
Потребляемая мощность	100 Вт
Питание	220 В, 50 Гц

При работе с традиционными углоизмерительными приборами на измерение одного угла тратится время от единиц до десятков минут в зависимости от требований точности и условии измерений. Ввиду того, что наведение на визирные цели осуществляется наблюдателем визуально и этот процесс довольно длителен по времени, влияние быстро протекающих атмосферных процессов усредняется. В частности, из-за флуктуации показателя преломления происходят размытие и хаотические колебания изображения визирной цели. Влияние этих искажений при визуальных наблюдениях осредняют. Вместе с тем при сильной турбулентности изображение цели размыто настолько, что выполнять оптические измерения невозможно. Искажения, имеющие более длительный период, вносят систематические ошибки в результаты измерений.

Такие приборы, как цифровые теодолиты и электронные тахеометры, имеют автоматическую регистрацию результатов измерений, за счет чего обеспечивают более высокую производительность работ, но не все операции и у этих приборов автоматизированы.

Много времени занимают операции, выполняемые вручную. К ним относятся поиск цели и наведение на нее. Поэтому время, требуемое на измерение одного угла, хотя и уменьшается по сравнению с измерениями обычными теодолитами, но остается довольно значительным.

Даже использование электронных тахеометров с автоматическим наведением на визирные цели (так называемых роботизированных электронных тахеометров) требует достаточно много времени для поиска цели по сравнению со скоростью флуктуаций показателя преломления атмосферы. Поэтому для учета быстротекущих атмосферных процессов, связанных с определением C_n^2 потребовалось создание быстродействующего углоизмерительного устройства.

При выполнении исследований с помощью ЛУ многократно измерялся угол, образованный направлениями из центра сканирующего узла на опорный фотоприемник и отражатель, установленный в конце трассы. Так как инструментальная точность прибора довольно высока и составляет 1″, то все изменения угла относительно среднего значения являются флуктуациями угла прихода, обусловленными влиянием турбулентности атмосферы.

Использование для угловых измерений подобных устройств позволяет получать в короткие промежутки времени ряды наблюдений одного или нескольких углов. Причем каждый последующий результат измерений может отстоять по времени от предыдущего на десятые, сотые и даже тысячные доли секунды (в зависимости от скорости развертки). Количество одновременно наблюдаемых визирных целей, находящихся в поле зрения прибора, не сказывается на скорости измерений.

По этой причине каждое измеренное значение угла содержит не только инструментальные ошибки измерений, но и ошибки, вызывае-

мые влиянием как быстротекущих, так и медленных атмосферных процессов, которые не усреднены за счет продолжительности измерений.

Таким образом, при измерениях получают значительные массивы данных, в которых результаты отличаются друг от друга случайным образом, и поэтому не могут быть описаны точными математическими соотношениями. Запись ряда наблюдений представляет собой лишь одну из бесконечного множества реализаций α.

Выборочное среднее значение α из ряда наблюдений находилось из выражения:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\alpha_i, \qquad (8.113)$$

где N – число измерений в реализации; α_i – измеренные значения угла. При обработке данных, полученных в виде рядов наблюдений, в первую очередь выявлялись и исключались ошибочные измерения, вызванные сбоями при работе прибора.

При этом находилось среднее квадратическое значение флуктуаций угла прихода пучка лазерного излучения:

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\frac{<(\Delta\alpha)^2>}{N-1}}, \qquad (8.114)$$

где углы прихода определялись как отклонение от среднего, т. е.:

$\Delta\alpha = \alpha_i - \bar{\alpha}$.

Для исключения выбросов осуществлялась фильтрация результатов, т. е. сравнивалось среднее квадратическое значение флуктуации угла прихода σ_α с максимальным значением $|\Delta\alpha|_{max}$ и грубые результаты отбраковывались.

$K = |\Delta\alpha|_{max}/\sigma_\alpha$.

При этом должно соблюдаться условие K = 4, если $6 < N < 100$ и K = 4,5, если $100 < N < 1000$.

Если условие не выполнялось, то соответствующее значение $|\Delta\alpha|_{max}$ отбраковывалось.

При дальнейшем анализе все вычисления выполнялись без использования измерений, которые оценивались как промах. Такие величины $|\Delta\alpha|_{max}$ встречались очень редко (раз за несколько суток наблюдений) и, как правило, иногда очень сильно отличалось от допустимых значений, что объяснялось редкими сбоями в работе прибора.

По результатам исследований построен суточный ход флуктуаций угла прихода σ_α (рис. 8.30) и суточный ход C_n^2 (см. рис. 8.31).

Как уже отмечалось, к настоящему времени разработано много способов определения структурной характеристики показателя преломления атмосферы, которая является одним из основных параметров, характеризующим оптические свойства турбулентной атмосферы по всей



Рис. 8.30. Суточный ход флуктуаций угла прихода σ_α, полученный по результатам измерений с помощью ЛУ: зимой – 15.02.88 и летом – 5.06.88 на трассе протяженностью 2,5 км, эквивалентная высота луча – $h_э$ =21 м

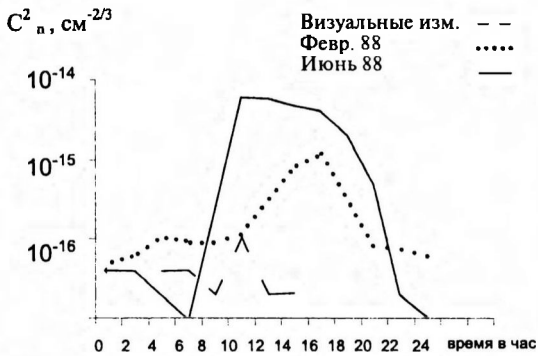


Рис. 8.31. Суточный ход C_n^2, полученный на основании измерений с помощью ЛУ на трассе L = 2,5 км ($h_э$ = 21 м) под Ашхабадом в июне и в феврале 1988 г.

Для сравнения приведен также дневной ход C_n^2 в октябре 1989 г. на трассе под Ашхабадом (L = 1 км, h = 1 м). В последнем случае дневной ход вычислялся на основе визуальных измерений амплитуды колебаний изображения визирной цели

трассе и позволяющим определить величину вертикальной рефракции. Например, во Львовском политехническом институте для определения структурной характеристики поля показателя преломления с целью определения вертикальной рефракции в основном использовался метод, основанный на визуальной оценке амплитуды колебаний изображения визирной цели в поле зрения телескопа [74–77, 104, 115, 116, 118, 148].

Этот метод является разновидностью метода определения C_n^2 по флуктуациям угла прихода. При обработке результатов наблюдений используется формула для вычисления C_n^2, отличающимся численным коэффициентом [148]:

$$\sigma_\alpha = 1{,}7\, C_n L^{1/2} D^{-1/6}, \quad (8.115)$$

где σ_α – средняя квадратическая амплитуда колебания, L – длина трассы и D – диаметр объектива зрительной трубы.

Метод оценки величины C_n^2 на основании измерений амплитуды колебаний изображения визирной цели был использован при исследованиях рефракции под Ашхабадом на ровной трассе L = 1 км [71, 72]. Оценка величины колебаний изображения визирной цели осуществлялась с помощью нивелира Ni 004, установленного в начальной точке трассы. Нивелир

имеет зрительную трубу с диаметром объектива 2R = 56 мм и фокусным расстоянием F 350 мм. Во время наблюдений оценивалась амплитуда колебаний изображения штрихов инварной нивелирной рейки, установленной в конечной точке километровой трассы. Отсчеты по рейке производились на высотах 0,5; 1,5 и 2,0 м, которым соответствовали высоты визирного луча 1 м,1,5 м и 2,0 м. При исследованиях не было зафиксировано изменений значения амплитуды колебаний изображения визирной цели в зависимости от высоты визирного луча/ Отсчеты производились каждый час: с 8 до 20 часов.

Для вычислений C_n^2 использовалась формула (8.112), которая отличается от вышеприведенной формулы (8.115) наличием $\varphi(aR)$ – числовой функцией, характеризующей осредняющее действие приемной апертуры и зависящей от длины трассы L и диаметра зрительной трубы прибора, используемого для наблюдений (см. 8.2), а также наличием коэффициента, осредняющего структурное поле показателя преломления вдоль трассы. В качестве примера на рис. 8.31 дан график дневного хода C_n^2, полученный на основе обработки результатов визуальных наблюдений амплитуды колебания изображения на 1-километровой трассе под Ашхабадом в октябре 1989 г. Как показали исследования, данный метод не дает возможности получить какие- либо данные о величине структурной характеристики поля показателя преломления воздуха в моменты, когда температурная стратификация атмосферы близка к безразличной – глаз не фиксирует никаких колебаний. Таким образом, в утренние и вечерние часы данный метод не применим. Этот метод практически нельзя использовать и при устойчивой температурной стратификации, которая соответствует ночным наблюдениям и характеризуется медленными колебаниями изображения, чередующимися со спокойными периодами. Поэтому задача заключается в выборе оптимального способа определения C_n, который должен обеспечивать высокую точность измерений рефракции в реальном масштабе времени в момент выполнения наблюдений не зависимо от условий освещенности или температурной стратификации атмосферы.

Этим требованиям в наибольшей степени отвечает метод, основанный на измерении флуктуаций угла прихода пучка лазерного излучения с помощью автоматических углоизмерительных устройств. В этом методе получаемые результаты наблюдений содержат практически весь частотный спектр флуктуаций угла прихода. Визуальный метод наблюдений позволяет оценивать только низкочастотные составляющие спектра угла прихода, имеющие период единицы секунд, а высокочастотные составляющие не могут быть учтены из-за инерционности зрения.

8.9. Определение знака угла вертикальной рефракции

Знак угла вертикальной рефракции зависит от характера изменения температуры с высотой, которая может увеличиваться с высотой (вертикальный градиент температуры положительный) либо уменьшаться

(вертикальный градиент температуры отрицательный). Распределение температуры с высотой называется температурной стратификацией атмосферы, которая может быть устойчивой, безразличной, а также неустойчивой. В приземном слое атмосферы степень стратификации связана с числом Ричардсона Ri. Число Ричардсона характеризует степень стратификации атмосферы и определяется из соотношения (8.86):

$$\mathrm{Ri} = \frac{g}{T} \cdot \frac{(\frac{dT}{dh} - \gamma_a)}{(\frac{du_в}{dh})^2} .$$

Так как значение γ_a мало по сравнению с вертикальным градиентом температуры, то вместо (8.86) для практических расчетов Ri часто используют формулу.

$$\mathrm{Ri} = \frac{g}{T} \frac{\frac{dT}{dh}}{(\frac{du_в}{dh})^2} . \qquad (8.116)$$

Для вычисления градиента температуры согласно (8.87) на основе определения среднеинтегрального значения структурной характеристики поля показателя преломления необходимо иметь значение универсальной функции a(Ri), которая находится по величине Ri по графику, представленному на рис. 8.20.

Для наглядности на рис. 8.32 представлен график, показывающий зависимость числа Ri от вертикального градиента температуры при характерном вертикальном градиенте скорости ветра 10 см/с.

Процесс, при котором изменение объема воздуха происходит без поглощения им теплоты, называют адиабатическим. Для сухого воздуха этот процесс определяется уравнением Пуассона:

$$T/T_0 = (P/P_0)^{0,288}, \qquad (8.117)$$

где P_0 и T_0 – соответственно начальное давление и температура; P и T – давление и температура при адиабатическом изменении объема.

Сухоадиабатический градиент γ_a характеризует изменение температуры массы сухого воздуха, не насыщенного паром, на 0,98 °С при адиабатическом поднятии или опускании его на каждые 100 м, т. е. $\gamma_a = -0{,}98$°С/100 м.

Так как нельзя сравнивать температуру воздуха при различном давлении, то влияние давления необходимо исключить. Поэтому вводят понятие потенциальной температуры T*, под которой понимают температуру сухого воздуха при его адиабатическом перемещении с ис-

ходного уровня, на котором давление равно p, на уровень, где имеется стандартное давление, принимаемое равным 1000 мб. Потенциальная температура T* вычисляется по формуле:

$$T^* = T(1000/P)^{0.288}. \quad (8.118)$$

При безразличной стратификации (Ri = 0) отсутствуют силы, стремящиеся поднимать или опускать воздушную массу. При этом температура с высотой изменяется по адиабате (адиабатический градиент γ_a = –0,98 град/100 м). При условии dt/dh = –0,98 град/100 м не только не возникает пульсаций температуры, но и не происходит переноса тепла за счет турбулентного движения воздуха. В этот период наблюдаются спокойные изображения визирных целей.



Рис. 8.32. Зависимость числа Ричардсона от вертикального градиента температуры $\frac{dT}{dh}$ при характерном среднестатистическом вертикальном градиенте скорости ветра $\frac{d\,Uв}{dh}$ = 10 см/с

Безразличной температурной стратификации соответствуют значения Ri, по абсолютной величине не превосходящее 0,05, т. е. +0,05 > Ri –0,05, а вертикальные градиенты температуры, соответствующие этим значениям Ri, мало отличаются от адиабатического: +0,02 град/м > dT/dh > –0,03 град/м. Угол рефракции в этих условиях может изменяться от 0 до +5″ на 1 км трассы (рис. 8.33). Когда вертикальный градиент температуры равен 0, то угол рефракции положителен и равен ~+3,5″ на 1 км трассы. Безразличной стратификации соответствует так называемое «нормальное» значение угла вертикальной рефракции, которое соответствует адиабатическому значению вертикального градиента температуры (–0,0098 град/м). При этом вертикальный градиент показателя преломления (8.62) $dn/dh = -0{,}34 \cdot 10^{-7} - 1{,}0 \cdot 10^{-6}\,\gamma_a$. «Нормальное» значение угла вертикальной рефракции составляет +2,5″ на 1 км трассы, т. е. $r_н$ = +2,5 L (8.88). При этом значение коэффициента рефракции k = +0,14. Слой, в котором температура с высотой растет, характеризуется положительным градиентом и называется инверсией. При инверсии или в условиях, когда температура с высотой падает, но медленнее, чем по закону адиабатического градиента γ_a = –0,0098 град/м, атмосфера

называется гидростатически устойчивой или просто устойчивой. Устойчивое равновесие температурного слоя имеет место в том случае, когда при всяком вынужденном (вертикальном) смещении воздушной массы возникают силы, стремящиеся препятствовать этому смещению и вернуть смещаемую массу на прежний уровень. При этом турбулентность затухает.

Согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям [97], турбулентный обмен в приземном слое атмосферы прекращается, когда критическое значение Ri = +0,36. При ясной погоде ночью обычно имеет место устойчивая стратификация. При наблюдении турбулентных пульсаций в приземном слое атмосферы при устойчивой стратификации наблюдается чередование заметных пульсаций с продолжительными, довольно спокойными интервалами. Стратификация, близкая к безразличной, имеет место на рассвете и в сумерках в ясные дни, а также в облачную погоду либо в ветреную в ясные дни. Термин «стратификация близкая к безразличной» означает, что число Ричардсона по абсолютному значению не превышает 0,03–0,05 (см. рис. 8.32). Выше приземного слоя атмосферы (более 100 м над поверхностью земли) сверхадиабатические градиенты температуры встречаются крайне редко: как только они возникают, воздух перемешивается, и возникает состояние, близкое к безразличной стратификации [97]. В этом случае фактический градиент температуры в нем отличается от адиабатического на столь малую величину, что она не поддается измерению.

На высотах, в слое 100–700 м, имеется область «штилевой» конвенции, где вертикальный градиент скорости ветра пренебрежимо мал и стратификация близка к безразличной, т. е. угол рефракции ~+2,5″ на 1 км. В слое 700–1000 м часто наблюдается инверсия температуры, когда абсолютное значение вертикального градиента температуры очень мало, что соответствует устойчивой стратификации.

Как уже отмечалось, ночью наблюдается в основном устойчивое равновесие, и лишь в короткие промежутки времени, приуроченные к восходу и заходу солнца, наблюдается температурная стратификация близкая к безразличной, т. е когда $+0,05 < Ri > -0,05$. Условием возбуждения температурных пульсаций за счет турбулентного перемешивания является неравенство: $|dT/dh| \neq \gamma_a$.

Если температура с высотой падает быстрее чем по адиабате, то атмосфера считается неустойчивой.

При неустойчивой стратификации в приземном слое атмосферы (до высот 20–30 м) наблюдаются сильные флуктуации температуры, а следовательно, и показателя преломления.В этих условиях наблюдаются колебания и дрожание изображений, а при сильных флуктуациях – потеря видимости.

В условиях неустойчивой стратификации при всяком вынужденном смещении воздушной массы возникают силы, стремящиеся про-

должить смещение в том же направлении. Чем больше вертикальный температурный градиент, тем больше уровень конвекции. При небольших отрицательных значениях Ri режим турбулентности соответствует режиму свободной конвекции.

Вблизи поверхности земли (до 100 м) днем имеют место значительные отрицательные градиенты температуры. В приземном слое воздуха из-за нагрева солнцем днем и радиационного выхолаживания ночью практически всегда имеет место условие $|dT/dh| >> \gamma_a$. Установлено, что чем меньше Ri, тем с большей скоростью возрастает кинетическая энергия турбулентности и наоборот, при больших (положительных) значениях Ri интервалы между турбулентными пульсациями возрастают.

Все температурные пульсации возникают в результате различия между профилем средней температуры и адиабатическим профилем. При безразличной стратификации нет ни флуктуаций температуры, ни турбулентности. Таким образом, можно ожидать, что величина пульсаций температуры зависит от абсолютного значения градиента потенциальной температуры.

Чаще всего геодезические наблюдения выполняются днем и при малых высотах, что в большинстве случаев соответствует неустойчивой температурной стратификации атмосферы.

Так как при неустойчивой стратификации вблизи поверхности земли днем имеют место значительные отрицательные градиенты температуры, то траектория светового пучка будет направлена выпуклостью вниз (радиус кривизны отрицательный), и следовательно, при этом наблюдается отрицательный угол рефракции.

При малой высоте прохождения светового пучка в условиях неустойчивой стратификации наблюдались значения рефракции, которые составляли несколько угловых минут на 1 км трассы. [см. 8.5, рис. 8.17]. Это обычно бывает днем в условиях аридной зоны в безветренную жаркую погоду. В умеренных широтах угол вертикальной рефракции в этот период также отрицательный, но имеет меньшую амплитуду. При аномальных градиентах температуры обычно наблюдаются потеря видимости уже на коротких расстояниях (несколько сотен метров) и миражи.

При увеличении высоты луча над поверхностью земли модуль градиента температуры уменьшается, и поэтому, начиная с определенной высоты, кривизна траектории меняется на противоположную, т. е. луч изгибается выпуклостью вверх. Такое поведение луча, как правило, должно наблюдаться при высоте над поверхностью земли более 100 м. Градиент температуры на таких высотах превышает адиабатический градиент на небольшую величину, поэтому условия можно считать равновесными. На этих и больших высотах значение рефракции составляет ~+2,5″ на каждый км трассы, т. е. угол рефракции положите-

лен и увеличивается пропорционально длине трассы. Таким образом, при этих условиях наблюдений имеет место нормальная рефракция, а коэффициент рефракции принимает значение +0,14. При градиенте температуры, превышающем по модулю в три раза адиабатический (~–0,03 град/м), луч распространяется прямолинейно ($r'' = 0$). Эти условия также близки к равновесным (Ri ~ –0,05). Безразличная стратификация наблюдается в периоды восхода и захода Солнца, а также в облачную погоду либо в ветреную в ясные дни, поэтому условия геодезических наблюдений в эти периоды являются благоприятными, так как искажения, вызываемые рефракцией, минимальны.

При устойчивой стратификации температура с высотой растет. Это наблюдается обычно ночью в приземном слое атмосферы, когда градиент температуры положителен. Поэтому световой луч обращен выпуклостью вверх. В этих же условиях при ветреной погоде температурные градиенты меньше, чем при отсутствии ветра. Ночью (при устойчивой стратификации) различными исследователями наблюдались значительные величины угла вертикальной рефракции [см. 8.5], которые по модулю соответствовали значениям рефракции, полученным при наблюдениях на тех же наземных трассах, но в условиях неустойчивой стратификации (днем).

Таким образом, на основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Знак угла рефракции зависит от температурной стратификации атмосферы, которая полностью определяется вертикальным температурным градиентом и числом Ричардсона Ri (см. рис. 8.30) или универсальной функцией a(Ri), характеризующей относительную роль динамических и термических факторов генерации кинетической энергии турбулентности.
2. Угол рефракции положителен при вертикальном градиенте температуры $dT/dh > +0{,}02$град/м. Этим значениям вертикального градиента температуры соответствует число $Ri > +0{,}05$. При таких значениях вертикального градиента температуры наблюдается устойчивая температурная стратификация. Вертикальная рефракция в этих условиях составляет ~ +5″ на каждый км трассы и более. При устойчивой температурной стратификации в приземном слое атмосферы наблюдается чередование заметных пульсаций температуры с довольно продолжительными, весьма спокойными интервалами.
3. Отрицательное значение угла рефракции соответствуют вертикальному градиенту температуры $dT/dh < -0{,}03$ ($Ri < 0{,}05$) При этом в приземном слое атмосферы наблюдается неустойчивая температурная стратификация, характеризующаяся интенсивным турбулентным обменом. При таком состоянии атмосферы наблюдают-

ся сильные искажения в световом пучке, распространяющемся в приземном слое атмосферы на высоте до 20—30 м. Значения угла рефракции отрицательные, абсолютная величина которых может составлять единицы секунд, а при неблагоприятных условиях (например, днем в пустыне) — единицы минут на 1 км трассы.

4. Наиболее благоприятное время для геодезических измерений при безразличной температурной стратификации, когда вертикальный температурный градиент имеет значения $-0{,}034$ град/м $< dT/dh <$ $+0{,}02$ град/м, т. е. не намного отличается от адиабатического. Как известно, температурные флуктуации возникают в результате различия между профилем средней температуры и адиабатическим профилем. При безразличной стратификации практически не наблюдается температурных пульсаций, и выполняется условие $+0{,}05 > Ri > -0{,}05$. Рефракция при безразличной стратификации незначительна и находится в диапазоне от 0″ до +5,5″ на каждый км трассы.

На основе вышеизложенного можно придти, казалось бы, к однозначному заключению: знак угла рефракции экспериментально можно определить только из градиентных измерений температуры, так как при $dT/dh < -0{,}034$ град/м угол вертикальной рефракции отрицателен, а при $dT/dh > -0{,}034$ град/м угол рефракции положителен (см. рис. 8.33). Но выполнение градиентных измерений является довольно сложной операцией, которая к тому же не позволяет адекватно оценить условия геодезических наблюдений (см. 8.4), так как градиентные измерения температуры, выполненные в одной

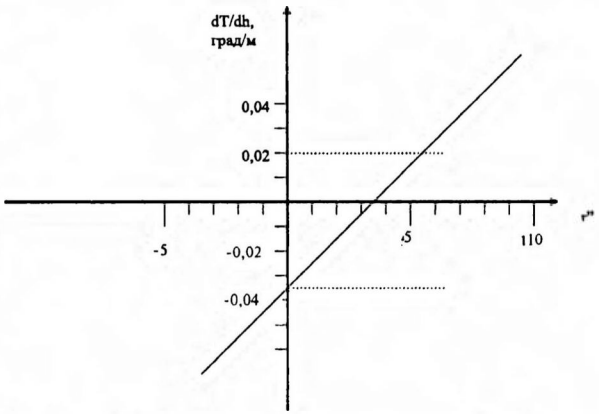


Рис. 8.33. Зависимость угла вертикальной рефракции r" для трассы L = 1 км от вертикального градиента температуры dT/dh.

При адиабатическом вертикальном градиенте температуры $dT/dh = -0{,}01$ град/м величина $r'' = 2{,}5''$. Когда $dT/dh = 0$, то $r'' = 3{,}5''$. При $dT/dh = -0{,}034$ град/м световой луч распространяется по прямой, т. е. $r'' = 0$. Пунктиром показаны границы, соответствующие безразличной температурной стратификации атмосферы, когда вертикальный температурный градиент незначительно отличается от адиабатического, т. е. $+0{,}02$ град/м $> dT/dh > -0{,}03$ град/м. В этом случае угол вертикальной рефракции может иметь величину 0...+ 5″ на 1 км трассы

или двух точках трассы, не могут быть представительными для всей трассы. Таким образом, выполнение градиентных измерений для оценки температурной стратификации нецелесообразно.

Определение степени устойчивости температурной стратификации атмосферы по величине Ri также требует знания величины dT/dh, поэтому для практических целей необходим другой путь оценки Ri и, следовательно, температурной стратификации.

В работе [66] было предложено определять знак угла вертикальной рефракции по спектру флуктуаций угла прихода пучка лазерного излучения, параметры которого зависят от температурной стратификации атмосферы. Характер спектра флуктуаций угла прихода определяется флуктуациями показателя преломления воздуха, которые обусловлены случайными изменениями давления, температуры и влажности. Как уже отмечалось, (см. 8.2) оценка влияния флуктуации давления и влажности в оптическом диапазоне показывает, что их можно практически не принимать во внимание, т.е. флуктуации показателя преломления полностью определяются изменениями температуры воздуха.

Характеристики спектра флуктуаций параметров световой волны, прошедшей слой турбулентной атмосферы, полностью определяются условиями прохождения на трассе. Таким образом, спектр флуктуаций того или иного параметра светового пучка несет информацию об этих условиях. Следовательно, информацию о температурной стратификации атмосферы и о знаке вертикальной рефракции можно получить из анализа любого спектра, характеризующего флуктуации какого-либо параметра световой волны. Ниже рассмотрена возможность оценки знака рефракции на основе анализа спектра флуктуаций угла прихода пучка лазерного излучения.

Частотный спектр флуктуаций угла прихода излучения оптического диапазона может быть достаточно хорошо аппроксимирован дробно-рациональной функцией [145]:

$$S_\alpha(\omega) = \frac{B\omega^2}{(c^2+\omega^2)^2} = \frac{B}{c^2\left(\frac{c}{\omega}+\frac{\omega}{c}\right)^2}. \qquad (8.119)$$

Из этого равенства можно заключить, что функция достигает максимума при выполнении равенства $\omega = c$. При этом предполагается, что флуктуации угла прихода могут быть описаны стационарным случайным процессом:

$$\sigma_\alpha^2 = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} S_\alpha(\omega)d\omega = \frac{B}{\pi}\int_0^\infty \frac{B\omega^2}{(c^2+\omega^2)^2}d\omega, \qquad (8.120)$$

откуда

$$B = 4c^2. \qquad (8.121)$$

Экспериментально установлено, что максимум частотного спектра приходится на частоту, определяемую равенством:

$$\omega_{max} = 0{,}22\pi\, u_{\perp} / 2R, \qquad (8.122)$$

где $u_{\perp}$ – нормальная к лучу компонента скорости ветра; $2R$ – диаметр приемной оптики.

С учетом (8.121) и (8.122) выражению $S_{\alpha}(\omega)$ можно придать вид:

$$S_{\alpha}(\omega) = \sigma_{\alpha}^{2}/c = \frac{\sigma_{\alpha}^{2} R}{0{,}22\pi v_{\perp}}. \qquad (8.123)$$

Спектр флуктуаций угла прихода простирается до нескольких сотен Гц. При неустойчивой температурной стратификации атмосферы имеют место пульсации, когда $\omega_{max} \sim 10$–30 Гц, а при устойчивой характерно чередование отдельных пульсаций с довольно продолжительными спокойными интервалами [85, 145]. Частотная граница флуктуаций при переходе от неустойчивой температурной стратификации к безразличной и устойчивой стратификации, когда $0 < \omega_{max} < 1$ Гц, не является четкой.

На основании изложенного, можно сделать следующие выводы.

1. При неустойчивой температурной стратификации атмосферы максимум спектральной плотности приходится на частоту $\omega_{max} \sim 10$–30 Гц. Спектр простирается до более высоких частот порядка 100 Гц и выше, на которых амплитуды очень малы. Частотные границы достаточно размыты и не являются четкими. Как было сказано выше, отрицательное значение угла вертикальной рефракции наблюдается только при неустойчивой температурной стратификации, когда вертикальные градиенты температуры удовлетворяют условию $dT/dh < -0{,}03$ град./м.

2. Положительное значение угла вертикальной рефракции всегда соответствует состоянию атмосферы с безразличной и устойчивой температурной стратификацией. В этом случае вертикальный температурный градиент $dT/dh > -0{,}034$ град/м. Колебания изображения при этом слабо выражены и происходят на низких частотах. Спектр флуктуаций сглаженный. Максимум спектра практически выделить достаточно сложно, так как он сдвигается в область низких частот $\omega_{max} < 1$ Гц. Следовательно, сглаженному спектру соответствует положительное значение угла вертикальной рефракции.

3. Принимая во внимание п.1 и п.2, последовательность преобразований при вычислении угла вертикальной рефракции (8.91) на основании измерений углов прихода $\Delta\alpha(t)$ пучка лазерного излучения может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{array}{ccccccc} \Delta\alpha\,(t) & \longrightarrow & C_n & \longrightarrow & C_T \longrightarrow dT/dh & \longrightarrow & dn/dh \longrightarrow r'' \\ \downarrow & & & & \uparrow & & \\ S(\omega) & \longrightarrow & \omega_{max} & \longrightarrow & (\pm). & & \end{array} \qquad (8.124)$$

Для наглядности количественная и качественная оценка факторов, влияющих на выбор положительного или отрицательного значения аномальной части угла рефракции (см. формулу 8.90) сведена в табл. 8.11.

Таблица 8.11

Характеристика условий прохождения света в приземном слое атмосферы в зависимости от температурной стратификации атмосферы

Температурная стратификация атмосферы	Значения Ri; a(Ri); dT/dh, град/м	Значение частоты максимума спектра ω_{max} флуктуаций $\Delta\alpha(t)$	Знак и величина аномального значения угла рефракции, r_a''	Условия наблюдения
Устойчивая	Ri > +0,05; $\alpha(Ri) = 0,76$; dT/dh > +0,02	$0 < \omega_{max} < 1$ Гц	Рефракция всегда положительная, а $r_a'' > +5,5''$ на 1 км	При устойчивой стратификации температура с высотой растет, что в приземном слое атмосферы наблюдается обычно ночью либо днем на больших высотах визирного луча (порядка 50—100 м и более). Поэтому световой луч обращен выпуклостью вверх. Угол рефракции положителен и достигает по модулю таких же значений, как и днем, т. е. при неустойчивой температурной стратификации. При ветренной погоде температурные градиенты меньше, чем при отсутствии ветра. При устойчивой температурной стратификации характерно чередование отдельных пульсаций с довольно продолжительными спокойными интервалами. при этом турбулентность затухает. Согласно теоретическим и экмпериментальным исследованиям [49] турбулентный обмен в приземном слое атмосферы прекращается, когда критическое значение Ri = +0,36. Максимум частотного спектра флуктуаций наблюдпется на низких частотах порядка 1 Гц и менее.
Безразличная	$-0,05 < Ri < +0,05$; $\alpha(Ri) = 1,3$; $-0,034 < \frac{dT}{dh} < +0,02$	$\omega_{max} \sim 0$ Гц	Рефракция всегда положительна $0 < r_a'' < +5,5''$ на 1 км	Вертикальный градиент температуры близок к адиабатическому ~ -0,0098 град/м. Колебания изображения визирных целей при этом практически отсутствуют. Спектр флуктуаций угла прихода сглаженный. Угол рефракции положительный.

Окончание табл. 8.11

Неустойчивая	Ri <-0,05; α(Ri) =1,5; dT/dh < –0,034	1 Гц < ω_{max} < 40 Гц	Рефракция всегда отрицательная, а 0 > r_a'' на 1 км	Температура с высотой падает, но быстрее, чем по адиабате. При таком состоянии атмосферы, характеризующимся интенсивным турбулентным обменом, наблюдаются сильные искажения в световом пучке, распространяющемся по наземной трассе. Значения угла рефракции отрицательные, абсолютная величина которых может составлять единицы секунд, а при неблагоприятных условиях — единицы минут на 1 км трассы. При наблюдениях на небольших высотах визирного луча в условиях жаркого климата возможна полная потеря видимости на расстоянии 400 м и более, а также возникновение миражей. Спектр флуктуаций сдвигается в более высокую область частот, т. е. 1 Гц < ω_{max} < 40 Гц

8.10. Экспериментальное определение вертикальной рефракции по флуктуациям угла прихода с помощью лазерного углоизмерительного устройства

Определение вертикальной рефракции по флуктуациям угла прихода с помощью лазерного углоизмерительного устройства (ЛУ) (см. рис. 8.29) проводились в различие сезоны года на трассах протяженностью 2,5 и 1,0 км на геодинамическом полигоне под Ашхабадом [67—70].

До начала исследований была получена пеленгационная характеристика прибора, которая показана на рис. 8.34. В пределах поля зрения прибора, которое составляет 1°, отклонение от линейности не превышает 3″. Таким образом, нелинейность пеленгационной характеристики на участке в 1 или 2 угловые минуты пренебрежимо мала и в худшем случае составляет сотые доли угловой секунды, т.е. практически не может сказаться на результатах измерений флуктуаций угла прихода.

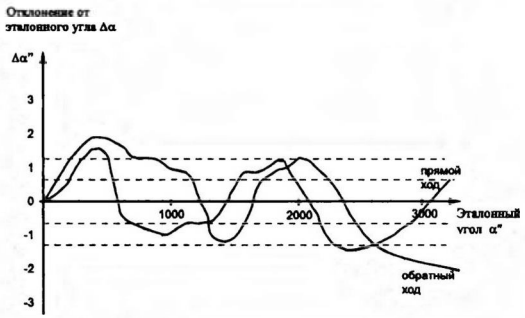


Рис. 8.34. Пеленгационная характеристика лазерного углоизмерительного устройства

(Ожидаемое максимальное значение флуктуаций угла прихода для данных

трасс не более 1—2′). Следовательно, можно считать, что точность измерений флуктуаций угла прихода соответствует инструментальной точности прибора, т. е. 1″ [см. (8.8, г)], а нелинейность пеленгационной характеристики практически не вносит искажения в результаты измерений.

Наблюдения проводились в течение суток эпизодически в различные сезоны года.

ЛУ было установлено под навесом на бетонном основании на высоте 220,0 см. Рядом с ним на на этом же бетонном основании был установлен теодолит ОТ-02, который использовался для наблюдений углового положения отражателя, установленного в конце трассы. Измерения зенитных расстояний на каждую точку выполнялись с помощью ОТ-02 двумя полными приемами. В момент измерений зенитных расстояний, выполняемых с помощью ОТ-02, каждый час выполнялись измерения этого же направления с помощью углоизмерительного устройства [см. (8.8, г)].

Каждый цикл измерений состоял из 10 рядов наблюдений по 512 измерений в каждом.

Обработка результатов измерений производилась по методике, представленной в (8.8, г).

При обработке данных, полученных в виде рядов наблюдений, в первую очередь фильтровались ошибочные измерения, вызванные сбоями при работе прибора.

Затем вычислялось среднее квадратическое значение флуктуаций угла прихода и спектральные плотности флуктуаций угла прихода. На основании полученных результатов вычислялось осредненное для трассы значение структурной характеристики поля показателя преломления по формуле (8.110):

$$\overline{C}_n^2 = 0{,}088\,\sigma^2_{\alpha\,(\text{ОТР})}\varphi(\alpha_R)^{-1}L^{-1}(2R)^{1/3},$$

где $\sigma^2_{\alpha\,(\text{ОТР})}$ — среднее квадратическое значение флуктуаций угла прихода; L — длина трассы; R — радиус объектива приемника; $\varphi(\alpha_R)$ — числовая функция, характеризующая осредняющее действие приемной апертуры и зависящая от длины трассы и диаметра приемной апертуры (см. 8.2). $\varphi(\alpha_R)$ определяют по графику, представленному на рис. 8.3.

На рис. 8.35 представлены графики спектральной плотности флуктуаций угла прихода пучка лазерного излучения, полученные на трассе протяженностью 2,5 км (диаметр приемного объектива 0,1 м) для различных моментов наблюдений.

Как видно из рис. 8.35, а, при безразличной температурной стратификации атмосферы график спектральной плотности сглажен, и незначительный максимум наблюдается на частотах $\omega_м \sim 1$ Гц. Этот момент наблюдений соответствует периоду перед заходом солнца, когда визирные цели четко видны и изображения не колеблются. При неустойчивой температурной стратификации максимум спектральной плотности флуктуаций угла прихода отчетливо выражен и приходится на частоту

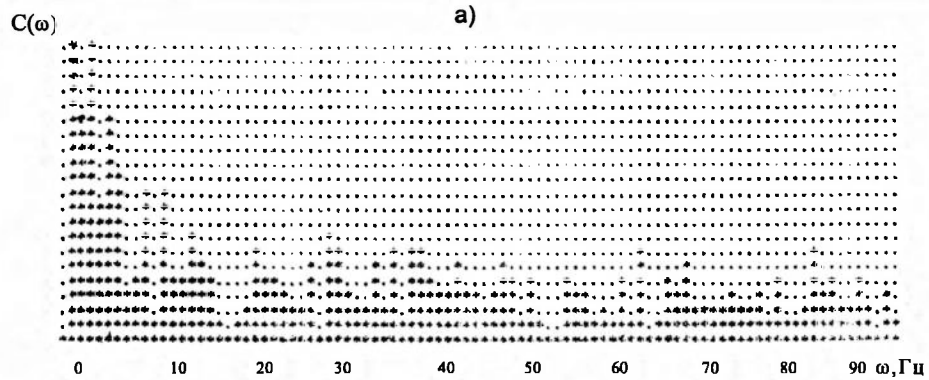


Рис. 8.35. а) График спектральной плотности C(ω) флуктуаций угла прихода при безразличной температурной стратификации (наблюдения перед заходом солнца, когда изображения предметов четкие и не колеблются)

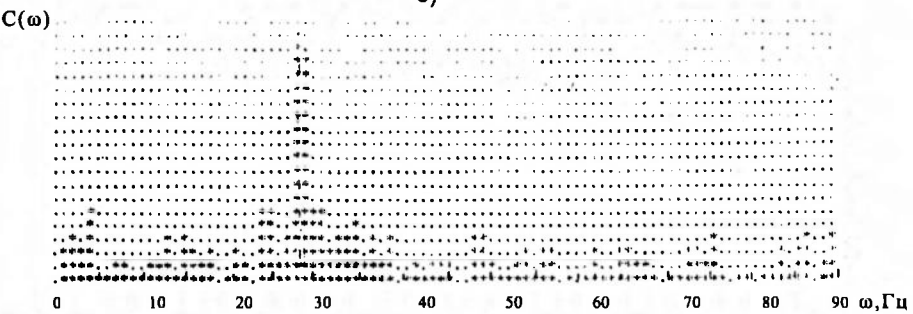


Рис. 8.35. б) График спектральной плотности C(ω) флуктуаций угла прихода при неустойчивой температурной стратификации $\omega_м = 29$ Гц

$\omega_м \sim 29$ Гц (рис. 8.35, б). Этот период соответствует дневным наблюдениям, когда изображения визирных целей хаотически колеблются. Угол вертикальной рефракции может быть вычислен по формуле (8.90):

$$r'' = \frac{\rho'' L}{2}[0{,}34 \cdot 10^{-7} + 1{,}0 \cdot 10^{-6}(\pm \frac{10^4 C_n < T >^2}{B < P > h^{2/3} a(Ri)} + \gamma_a)] =$$

$$= r''_н \pm \frac{K \cdot L \cdot C_n < T >^2}{< P > h^{2/3} a(Ri)},$$

где $r''_н = 2{,}5''L$ (здесь L – длина трассы в км); $K = 1{,}45 \cdot 10^3$ град$^{-2}$·сек.·мбар; C_n – структурная характеристика поля показателя преломления воздуха, см$^{-1/3}$; <T> – средняя температура воздуха, град K; <P> – среднее давление, мбар; h – эквивалентная высота луча, которая может быть определена из выражения (8.72):

$$h = \frac{L^2}{2}\left[\int_0^L (x/h)dx\right]^{-1},$$

a(Ri) – универсальная функция, которая может быть найдена согласно табл. 8.9 в зависимости от числа Ri.

$$\overline{C}_n^2 = 0{,}088\ \sigma_\alpha{}^2{}_{(\text{отр})}\ \varphi(\alpha_R)^{-1} L^{-1} (2R)^{1/3}.$$

Значение a(Ri) и знак угла рефракции оценивались по частотному спектру флуктуаций угла прихода (см. 8.9.).Периоду неустойчивой температурной стратификации соответствует значение a(Ri) = 1,5 (см. табл. 8.11); при безразличной a(Ri) = 1,3 и устойчивой a(Ri) = 0,76.

С учетом (8.110) формула для вычисления угла рефракции может быть представлена в виде:

$$\text{г} = \text{г}''_{\text{н}} \pm \frac{K \cdot L \cdot \overline{C}_n < T >^2}{< P > h^{2/3} a(Ri)} = \text{г}''_{\text{н}} \pm \frac{0{,}44''10^3 \sigma_{\alpha\ (отр)}\ L^{1/2} < T >^2 (2R)^{1/6}}{[\varphi(\alpha_R)]^{1/2} a(Ri) < P > h^{2/3}} \qquad (8.125)$$

На рис. 8.31. показан суточный C_n^2 ход для этой трассы, полученный для одного из зимних дней в феврале 1988 г. и для одного из летних дней (июнь 1988 г.). Кроме того, на рис. 8.36 показан суточный ход рефракции, полученный по данным измерений флуктуаций угла прихода с помощью лазерного углоизмерительного устройства. Здесь же для сравнения дан график суточного хода рефракции, построенный на основе данных измерений зенитных расстояний с помощью теодолита. Инструментальная средняя квадратическая ошибка определения угла рефракции для теодолита составляет 2,8″, а для лазерного углоизмерительного устройства – 1″. Вычисленная на основании сравнения результатов измерений ОТ-02 и лазерного прибора средняя квадратическая ошибка, оказалась равной 3,5″ и зависит в основном от инструментальной точности приборов.

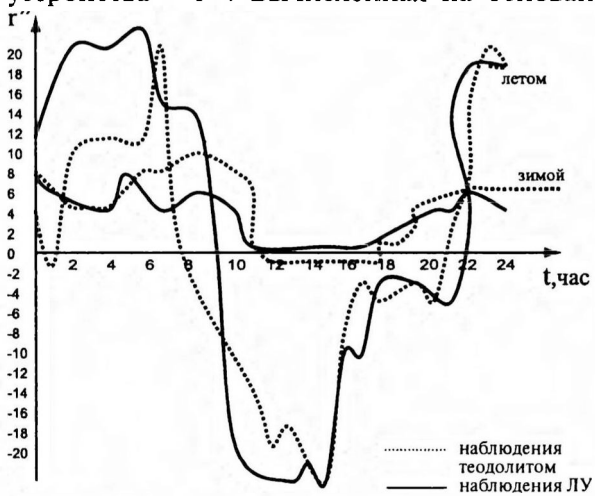


Рис. 8.36. Суточный ход рефракции, полученный по данным измерений в районе Ашхабада
—зенитных расстояний с помощью теодолита ОТ-2 летом 5 июня 1988 г. и зимой 1 февраля 1988 г.;
.....флуктуаций угла прихода с помощью ЛУ летом 5 июня 1988 г. и зимой 1 февраля 1988 г.

Как видно из рисунка, суточный ход рефракции, полученный по результатам измерений флуктуаций угла прихода, в значительной степени повторяет суточный ход угла рефракции, полученный из измерений зенитных расстояний с помощью теодолита. Летом, в ночные часы с 22 часов и до восхода

Солнца, угол рефракции имеет максимальное по модулю (положительное) значение, а затем, после восхода Солнца, угол рефракции меняет знак и становится отрицательным с 8 до 20 час. Максимальное по модулю отрицательное значение рефракции наблюдается в полуденное время. Значение угла вертикальной рефракции по модулю ночью примерно равно значению рефракции (по модулю) днем. Такой характер суточного хода рефракции объясняется тем, что ночью наблюдается устойчивая температурная стратификация и вертикальный градиент температуры положителен, поэтому луч изгибается вследствие рефракции выпуклостью вверх, а днем, как правило, наблюдается неустойчивая температурная стратификация, которой всегда соответствуют отрицательные температурные градиенты. В этом случае угол рефракции имеет отрицательное значение, т.е. луч изгибается выпуклостью вниз.

Расхождения результатов связаны с тем, что измерения, выполняемые с помощью теодолита ОТ-02 и ЛУ, всегда несколько разнесены во времени, так как наблюдения с помощью теодолита выполняются в течение 5–10 минут, а с помощью ЛУ – в течение двух минут. Это объясняется тем, что длина одной реализации, включающей 512 измерений, составляет 10 с, а каждый цикл содержал 10 реализаций.

Как показали исследования, суточный ход рефракции для зимнего периода имеет меньшую амплитуду по сравнению с летним, а угол рефракции имеет положительное значение большую часть времени (для $h_э = 21$ м).

Полученные данные о суточном ходе флуктуации углов прихода также свидетельствуют о значительной зависимости величины флуктуации от условий наблюдении. Летом флуктуации угла прихода имеют большую величину, чем зимой (см. рис. 8.30).

Как видно из рис. 8.30, флуктуации угла прихода возрастают с восходом Солнца, достигают своего максимума в 13–14 час. и вновь уменьшаются. В ночное время среднеквадратическое значение флуктуации угла прихода, как правило, значительно меньше, чем днем, хотя абсолютные значения рефракции для дневных и ночных наблюдений примерно одинаковы. Наименьшее значение флуктуации угла прихода имеют в периоды безразличной температурной стратификации атмосферы, т. е. сразу же после восхода Солнца и перед его заходом. В эти периоды разброс значений измеренного направления достигает минимальной величины и в благоприятных случаях соответствует инструментальной точности ЛУ, т. е. $\sigma_\alpha = 1–2''$.

В эти же периоды рефракция имеет значение, близкое к нормальному, т. е. на трассе протяженностью 2,5 км угол рефракции $r = \sim+6''$, и аномальная часть рефракции r_α практически отсутствует. В это время изображения визирных целей спокойные и четкие.

Характер спектра флуктуации угла прихода зимой и летом также несколько различается. Летом основная частота спектра, как правило, имеет большую амплитуду, чем зимой.

В дневное время спектр сдвигается в область более высоких частот ω_{max} = 20–30 Гц, (рис. 8.35), а ночью в область низких ω_{max} = 1 Гц и менее. Причем при работе с ЛУ в очень короткое время (единицы минут) довольно значительно изменялись результаты измерений в зависимости от самых, казалось бы, незначительных изменений погодных условий. Так, например, если во время измерений на трассу падала тень от небольшого облака размером 250х250 м (в этот момент трасса была покрыта тенью пиметно на 10 %), то среднее квадратическое значение угла прихода, полученное из обработки результатов измерений, уменьшалось в два-три раза, а спектр сглаживался.

8.11. Экспериментальные определения вертикальной рефракции визуальными методами по колебаниям изображений визирных целей и размытию изображения миры

При исследованиях вертикальной рефракции в приземном слое атмосферы еще в XIX в. отмечалась зависимость между колебаниями изображений и величиной вертикальной рефракции.

Так, например, Струве (XIX в.) обратил внимание на связь между колебаниями визирных целей и рефракцией.

В монографии [81] А.А. Изотов и Л.П. Пеллинен отмечают: «Наибольшие полуденные колебания изображений, как правило, соответствуют наибольшим отрицательным градиентам у почвы, наибольшие утренние и вечерние колебания изображений – наибольшим положительным градиентам, а моменты спокойных изображений – градиентам температуры, близким к нулю (точнее, нормальным градиентам). Следовательно, характеристика достоинства изображений в некоторой мере качественно заменяет характеристику аномальных градиентов температуры».

Начиная с 80-х годов прошлого столетия, многочисленные исследования по определению рефракции на основании визуальной оценки колебаний изображения визирной цели были проведены во Львовском политехническом институте [73, 77, 103, 114, 117, 123, 136, 140, 141, 147]. Аналогичные работы выполнялись в Германии [159, 163, 165].

Основная цель указанных работ заключалась в визуальной оценке амплитуды колебаний изображения визирной цели в поле зрения визирной трубы и определении эмпирической зависимости величины угла рефракции от амплитуды колебаний. Результаты всех исследований подтверждают зависимость между величиной рефракции и амплитудой колебаний изображения визирной цели, однако физическая интерпретация этого метода в указанных работах не дается. Некоторые авторы считают, что «турбулентный метод» (т.е. метод, основанный на визуальной оценке амплитуды колебаний визирной цели) «является наиболее точным из всех существующих и к тому же перспективным» [136].

На основе полученной эмпирической зависимости предлагается два возможных варианта учета вертикальной рефракции по колебаниям визирной цели [147]:

1. Выполнять наблюдения на верхние пики колебаний цели и в измеренные значения вводить поправку за нормальную рефракцию.
2. Выполнять наблюдения как обычно (на среднее положение колеблющейся цели) и одновременно измерять теодолитом в угловой мере размах колебаний А визирной цели. Зенитное расстояние Z, свободное от рефракционных влияний вычислять согласно эмпирической формуле,предложенной Б.М. Джуманом [148].

$$Z = Z_и + r_н - A/2, \qquad (8.126)$$

где $Z_и$ – измеренное зенитное расстояние; $r_н$ – угол нормальной рефракции, который соответствует адиабатическому градиенту температуры.

В дальнейшем этот метод был уточнен, в результате чего по измеренным значениям амплитуды колебаний вычислялась величина C_n^2, а затем – угол вертикальной рефракции.

Однако указанный метод имеет определенные недостатки, т. к. при определении рефракции по колебаниям изображения визирной цели довольно сложно определить максимальную амплитуду колебаний на основе визуальных наблюдений, потому что это процесс хаотический и содержит бесконечный спектр гармоник. Инерционность глаза не позволяет фиксировать амплитуду гармоник свыше 5 Гц, т.е. довольно значительная часть спектра колебаний оказывается срезанной. Вместе с тем известно, что характер спектра меняется от внешних условий и практически не повторим даже для одной трассы. К тому же следует учесть что, помимо низкочастотных составляющих, наблюдается общий тренд. Поэтому не совсем ясно, как оценить амплитуду колебаний для различных моментов наблюдений. Например, в работе [147] отмечается, что «колебания изображений в виде небольшого дрожания нельзя смешивать с максимальными колебаниями, которые нас интересуют. Амплитуда последних примерно в два раза больше обычного дрожания штриха».

В своих исследованиях Г. Бахнерт делит время наблюдений на несколько периодов [165]. В частности, там указывается, что есть период наблюдений, когда «изображение перемещается столь сильно, что глаз не может больше уследить за ним. Цель уже нельзя больше видеть четко выраженной. Визирование с трудом еще возможно». Имеется и другой период наблюдений, когда «изображение размывается в бесконтурное аморфное пятно, точное визирование его невозможно».

В этих случаях амплитуду колебаний изображения оценить крайне сложно либо невозможно.

Отметим, что во всех работах, связанных с экспериментальным определением вертикальной рефракции по колебаниям визирных целей, только констатируется связь между колебаниями изображений и рефракцией. Но в них не вскрывается физическая зависимость между этими явлениями, в связи с чем формулы, характеризующие связь между колебаниями изображения визирной цели и вертикальной рефракцией, носят чисто эмпирический характер.

Более того, из этих работ не ясно, какой знак имеет угол рефракции в момент наблюдений на данной трассе, так как не дано рекомендаций по его определению.

При определении рефракции другим визуальным методом — по оценке размытия изображения радиальной или параллельной миры — вначале также находят структурную характеристику поля показателя преломления C_n^2 (см. 8.8, в). Метод определения C_n^2 по размытию изображения миры предложен в работе [8], а позднее был использован в работах по исследованию оптических свойств атмосферы [46, 47, 75, 76] и в том числе при определении рефракции [33–35].

Экспериментальные исследования метода определения вертикальной рефракции по оценке размытия структур регулярной миры проводились в Нижегородском политехническом институте [33–35]. Независимо от этого автором проводились аналогичные исследования под Ашхабадом [70–71] в 1989 г. В задачу этих исследований входила сравнительная оценка визуальных методов определения рефракции, основанных на измерении амплитуды колебаний цели и оценки размытия изображения параллельной миры.

Исследования проводились на ровных трассах, имеющих однородную подстилающую поверхность и различную протяженность. Наблюдения выполнялись в дневное время с 8 до 20 часов летом и осенью. Визирный луч проходил на каждой трассе на трех разных высотах, каждая из которых соответствовала эквивалентной высоте 1,35; 1,85 и 2,1 м над подстилающей поверхностью. Длина трасс составляла 200; 250; 300; 500; 700, 1000 и 2500 м. Все трассы, кроме трассы протяженностью 2500 м, находились в одном створе. В последнем случае эквивалентная высота луча $h_э = 21$ м, а трасса проходила по всхолмленной местности, покрытой травой.

Для визуальных наблюдений амплитуды колебаний изображения визирной цели и размытия изображения миры использовался нивелир Ni 004, зрительная труба которого имела входной объектив диаметром $2R = 56$ мм, фокусное расстояние $F = 350$ мм, увеличение $V = 44$х. Нивелир был установлен под навесом на жестком основании на высоте 220,0 см.

Во время наблюдений амплитуда колебаний изображений штрихов инварной рейки оценивалась относительно средней горизонтальной нити телескопической системы. На этой рейке сбоку в трех местах на высотах 0,5; 1,5 и 2,0 м был закреплен набор различных штриховых мир (см. рис. 8.26), имеющих систему параллельных полос с периодом 0,5; 0,8; 1.0; 2,0; 2,5; 3,0 мм и т.д.

Для трассы длиной 2,5 км выполнялись аналогичные наблюдения, только использовались штриховые миры с большим периодом. Механизм размытия изображения миры с детерминированной структурой также как и колебания изображения визирной цели связан с турбулентными флуктуациями показателя преломления световой волны. В резуль-

тате этого происходит размытие изображения удаленных от наблюдателя объектов [48]. Смещение изображения точечного источника к оптической оси 0X в фокальной плоскости можно выразить через флуктуации угла прихода $\Delta\alpha_i = Zi/F$; $\Delta\beta_i = Yi/F$ (F – фокусное расстояние). Для вычисления среднего для трассы значения $\overline{C}_n^2$ по размытию изображения штрихов параллельной миры использовалась формула (8.111).

$$\overline{C}_n^2 = 0{,}93\sigma_\alpha^2\ \varphi(\alpha_R)^{-1} L^{-1} (2R)^{1/3},$$

где значение σ_α^2 оценивалось на основании наблюдений с помощью нивелира размытие изображения штрихов миры. $\sigma_\alpha = M/2L$. (Здесь M – период миры, который оценивается как размытый; L – длина трассы; R – радиус объектива зрительной трубы; $\varphi(\alpha_R)$ – числовая функция, характеризующая осредняющее действие приемной апертуры и зависящая от длины трассы и диаметра приемной апертуры (см. 8.2); $\varphi(\alpha_R)$ определяют по графику, представленному на рис. 8.3.

Для оценки величины C_n^2 на основании измерений амплитуды A колебаний изображения визирной цели сначала вычислялась величина $\Delta\alpha$ из выражения $\Delta\alpha = A/L$, и затем получали числовые значения.

$$C_n^2 = 0{,}93(\Delta\alpha)^2\ \varphi(\alpha_R)^{-1}\ L^{-1}\ (2R)^{1/3}.$$

В табл. 8.12 приложения приведены результаты наблюдений амплитуды колебаний для трасс L = 300 м и L = 1000 м в течение 1 октября 1989 г. и даны вычисленные значения.

Как показали исследования, для всех расстояний в различное время суток не было заметных различий в амплитудах колебаний изображения штрихов рейки на высотах 0,5; 1,5; и 2,0 м. Не наблюдалось также различия в четкости видимости изображения той или иной части миры для различных высот.

На основе полученных данных вычислялся дневной ход структурной характеристики C_n^2 (табл. 8.12). и угла вертикальной рефракции r (рис. 8.37).

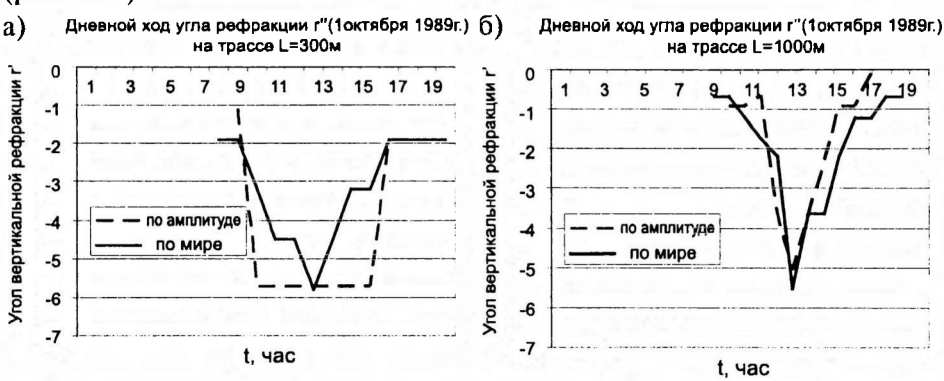


Рис. 8.37. Дневной ход угла вертикальной рефракции r, вычисленный по результатам измерений для трасс протяженностью (а) 300 м и (б) 1000 м

На рис. 8.37 показан дневной ход угла вертикальной рефракции для трасс 300м и 1000м, полученный на основании наблюдений амплитуды колебания изображения визирной цели.

Для вычислений r использовалась формула (8.90):

$$r = r_н \pm \frac{K \cdot L \cdot C_n < T >^2}{< P > h^{2/3} a\,(Ri)}.$$

Как видно, дневной ход угла рефракции для трасс различной протяженности различен, для трехсотметровой трассы график сглаженный, а для километровой трассы амплитуда суточного хода рефракции имеет больший размах. Из этого следует, что угол вертикальной рефракции по абсолютной величине на более длинных трассах всегда больше угла вертикальной рефракции, чем на коротких трассах (при одинаковых условиях наблюдений). Казалось бы, что на более длинной трассе L =2,5 км суточная амплитуда угла рефракции должна быть еще больше, однако этого не наблюдается (см. рис. 8.36). Это связано с тем, что высота визирного луча ($h_э$ = 21) значительно больше, чем на трассах 300 м и 1000 м, где $h_э$ = 2 м.

Как известно, в приземном слое атмосферы, чем больше высота визирного луча, тем, как правило, меньше модуль вертикального градиента температуры. При небольшой высоте визирного луча (не более нескольких м) летом в полдень для трасс длиной 300 м и более происходит потеря видимости визирных целей, что вызвано значительными по модулю вертикальными градиентами температуры и, как следствие этого, интенсивной турбулентностью.

При увеличении длины трассы увеличивается по абсолютной величине угол рефракции и происходит потеря видимости на более длительный промежуток времени. Так, в табл 8.12 приведены данные наблюдений, выполненных 1 октября 1989 г. , т.е. осенью, когда днем температура воздуха не превышала + 25 °С, и поэтому потери видимости не наблюдалось даже на трассе L = 1 км. В октябре в полуденное время в районе Ашхабада потеря видимости происходит только на более длинных трассах, например, при L = 2 км и более (см. рис. 8.17).

Таблица 8.12

Результаты измерений максимальной амплитуды колебаний изображения визирной цели и размытия изображения параллельной миры с помощью нивелира Ni 004 (2R = 56 мм, фокусное расстояние F – 350 мм, увеличение – V-44x)

L = 300 м					L = 1000 м			
Время наблюдений, час.	Амплитуда, А, мм	Мира, М, мм	C_n^2 по набл. ампл., $см^{-2/3}$	C_n^2 по набл. миры, $см^{-2/3}$	Амплитуда, А, мм	Мира, М, мм	C_n^2 по набл. ампл., $см^{-2/3}$	C_n^2 по набл. миры, $см^{-2/3}$
8	–	4	–	$1{,}2 \cdot 10^{-15}$	–	8	–	$1{,}3 \cdot 10^{-16}$

9	2	4	$1{,}2\cdot10^{-15}$	$1{,}2\cdot10^{-15}$	5	8	$2{,}1\cdot10^{-16}$	$1{,}3\cdot10^{-16}$
10	5	6	$7{,}6\cdot10^{-15}$	$2{,}7\cdot10^{-15}$	5	12	$2{,}1\cdot10^{-16}$	$2{,}9\cdot10^{-16}$
11	5	8	$7{,}6\cdot10^{-15}$	$4{,}8\cdot10^{-15}$	10	16	$8{,}4\cdot10^{-16}$	$5{,}1\cdot10^{-16}$
12	5	8	$7{,}6\cdot10^{-15}$	$4{,}8\cdot10^{-15}$	15	20	$2{,}1\cdot10^{-15}$	$8{,}0\cdot10^{-16}$
13	5	10	$7{,}6\cdot10^{-15}$	$7{,}6\cdot10^{-15}$	20	40	$3{,}2\cdot10^{-15}$	$3{,}2\cdot10^{-15}$
14	5	8	$7{,}6\cdot10^{-15}$	$4{,}8\cdot10^{-15}$	15	30	$2{,}1\cdot10^{-15}$	$1{,}8\cdot10^{-15}$
15	5	6	$7{,}6\cdot10^{-15}$	$2{,}7\cdot10^{-15}$	·15	30	$2{,}1\cdot10^{-15}$	$1{,}8\cdot10^{-15}$
16	5	6	$7{,}6\cdot10^{-15}$	$2{,}7\cdot10^{-15}$	10	20	$8{,}4\cdot10^{-16}$	$8{,}0\cdot10^{-16}$
17	2	4	$1{,}2\cdot10^{-15}$	$1{,}2\cdot10^{-15}$	5	12	$2{,}1\cdot10^{-16}$	$2{,}9\cdot10^{-16}$
18	2	4	$1{,}2\cdot10^{-15}$	$1{,}2\cdot10^{-15}$	5	12	$2{,}1\cdot10^{-16}$	$2{,}9\cdot10^{-16}$
19	–	4	–	$1{,}2\cdot10^{-15}$	–	8	–	$1{,}3\cdot10^{-16}$
20	–	4	–	$1{,}2\cdot10^{-15}$	–	8	–	$1{,}3\cdot10^{-16}$

Как уже отмечалось, трасса L = 2,5 км проходит достаточно высоко над подстилающей поверхностью ($h_э$= 21 м), поэтому суточный ход угла рефракции имеет сравнительно небольшую амплитуду, так как систематическая часть угла рефракции (нормальный угол рефракции) соизмерима по величине со случайной частью угла рефракции, которая обусловлена аномальными значениями градиента температуры.

8.12. Точность определения угла вертикальной рефракции при использовании динамических методов измерений

Результаты полевых исследований рефракции, выполненные с использованием визуальных методов, показывают, что характер дневного хода C_n^2, полученный различными методами для трасс различной протяженности, в некоторой степени одинаков, однако имеются систематические различия (см. табл. 8.12). Оценка значения C_n^2 по амплитуде колебаний изображения визирной цели не достаточно точна, так как визуально оценить среднее квадратическое значение амплитуды колебаний весьма проблематично.

Анализируя результаты, полученные при выполнении исследований на трассах различной протяженности под Ашхабадом, можно прийти к выводу, что для одного и того же момента времени наблюдений и для одной и той же трассы одним методом визуально регистрируются изменения внешних условий на трассе, а другим – нет. Например, изменяется амплитуда колебаний изображения визирной цели, а размытие изображения миры остается без изменений либо регистрируется изменение размытия изображения миры, а колебание изображения визирной цели не регистрируется (см. табл. 8.12).

Такое различие в результатах определения C_n^2 обусловлено тем, что визуальные методы определения, основанные на наблюдениях размы-

тия изображения параллельной структуры регулярной миры и оценки амплитуды колебаний изображения визирной цели, недостаточно точны из-за инерционности зрения.

При оценке рефракции по размытию изображения детерминированных структур миры наблюдается следующая картина.

Размытие изображения происходит из-за флуктуации углов прихода на высоких частотах, т.е. на частотах свыше 10 Гц (выше, чем порог инерционности зрения). Быстрые колебания изображения полос миры на частоте более 10 Гц визуально не регистрируются, так как глаза наблюдателя не успевают оценивать положение полос миры, и они кажутся смазанными. Следовательно, в этом случае регистрируется весь спектр высокочастотных колебаний, находящийся выше частоты среза (более $2\pi \cdot 5$ Гц = 32,14 Гц), а низкочастотные колебания с помощью миры не регистрируются. Благодаря этому при наблюдениях днем при неустойчивой температурной стратификации атмосферы, когда основная частота флуктуаций углов прихода находится в высокочастотной области спектра, относительная ошибка в оценке флуктуаций угла прихода этим методом меньше, чем для случая, когда основная частота колебаний находится в низкочастотной области, т. е. при устойчивой и безразличной стратификации. В последнем случае изображение штрихов миры четкое, т. е. размытие изображения миры не наблюдается.

Следовательно, с помощью миры регистрируются высокочастотные колебания изображения, вызванные флуктуациями показателя преломления воздуха при неустойчивой температурной стратификации. В то же время низкочастотные колебания (менее 10 Гц) не влияют на восприятие резкого изображения миры, и поэтому на степень размытия не вносят никакого вклада.

При визуальных наблюдениях амплитуды колебаний изображения визирной цели, наоборот, основной вклад в оценку амплитуды вносят низкочастотные колебания изображения, составляющие менее 10 Гц. Более высокочастотные колебания изображения глазом не воспринимаются, и поэтому общая оценка амплитуды колебаний остается искаженной. Точнее оценить визуально амплитуду колебаний на высоких частотах нельзя из-за инерционности зрения. В этом случае отсутствуют высокочастотные составляющие регистрируемого процесса.

Чтобы подтвердить или опровергнуть данные положения, оценим величины относительных ошибок измерений, вызываемых дискретностью измерений согласно [73]. Эти ошибки зависят от частоты съема информации и закона изменения определяемой величины.

С увеличением частоты измерений уменьшается ошибка аппроксимации воспроизводимой функции. Чтобы правильно выбрать частоту измерений, необходимо знать зависимость между частотой измерений и ошибкой аппроксимации функции.

Согласно теореме Котельникова функция F(t), не содержащая частот свыше f_c, полностью определяется последовательностью сво-

их значений в моменты времени, отстоящие друг от друга на $h = 1/2f_c$ (здесь f_c – частота среза, соответствующая максимальной частоте измерений). Теорема Котельникова справедлива лишь для бесконечно длящихся во времени процессов.

$$F(t) = \sum_{k \to -\infty}^{\infty} F(kh) \frac{\sin 2\pi F'(t - kh)}{2\pi f(t - kh)}. \qquad (8.127)$$

Функцию F(t) с ограниченной шириной спектра можно выразить через отсчеты F(kh). В действительности при наблюдениях функция F(t) имеет конечную длительность, т.е. ограничена по аргументу t и, следовательно, имеет бесконечно широкий спектр. Такую функцию можно восстановить по дискретным отсчетам, число которых $n = 2fT_n$ ограничено вследствие непродолжительности времени наблюдений T_n. Тогда

$$F(t) = \sum_{k=-1}^{n} F(kh)\psi(t)$$

$$\psi(t) = \frac{\sin 2\pi f(t - kh)}{2\pi f(t - kh)}, \qquad (8.128)$$

а энергию спектра этой функции можно представить как сумму квадратов отсчетов:

$$\int_0^T \mathrm{F(t)}^2\, dt = \frac{1}{2F} \sum_{k=1}^{n} \mathrm{F(kh)}^2. \qquad (8.129)$$

Для описания реальной функции F(t) можно использовать функцию с ограниченным спектром. В таком случае ошибки воспроизведения функции в точках отсчета будут равны нулю, а в промежутках между отсчетами они возрастают. Если частота измерений составляет f_c, то круговая частота среза ω_c определяется из соотношения $\omega_c = \pi f_c$. Оценим энергию E_ε пренебрегаемых частот выше ω_c [98,146,147]:

$$E_\varepsilon = \frac{1}{\pi} \int_{\omega_c}^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega. \qquad (8.130)$$

Энергию всего спектра частот находим из соотношения:

$$E_c = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega, \qquad (8.131)$$

где $S(\omega)$ – спектр функции F(t).

Среднюю квадратическую ошибку аппроксимации функции можно найти по формуле:

$$m_g = \frac{E_\varepsilon}{E_c} F(t). \qquad (8.132)$$

Для оценки средней квадратической ошибки, вызываемой дискретностью измерений воспользуемся формулой (8.132).

При характерной скорости ветра 5 м/с в приземном слое атмосферы для приемного объектива диаметром 0,1 м в соответствии с (8.122)

получим значение характерной круговой частоты флуктуаций угла прихода:

$$\omega = 0{,}22 \cdot 3{,}14 \cdot 2.5/0{,}1 = 17{,}3 \text{ Гц}.$$

Здесь $u_\perp = 2{,}5$ м/с.

Чтобы воспроизвести функцию спектральной плотности флуктуаций углов прихода необходимо, чтобы спектр содержал все основные частоты. Наиболее высокая частота ограничена частотой измерений f, а частота среза $f_c = f/2$ (круговая частота среза $\omega_c = 2\pi f_c$ – частота съема информации).

Таким образом, если при измерении флуктуаций угла прихода используется аппаратура, позволяющая брать отсчеты с частотой f, то частота среза $f_c = f/2$.

Имея данные о спектре флуктуации угла прихода, можно оценить относительную среднюю квадратическую погрешность воспроизведения функции $\Delta\alpha(t)$ в том случае, когда частота среза (частота измерений) известна [146,147] .

Спектральную функцию $S(\omega)$ процесса $\Delta\alpha(t)$ определяют, воспользовавшись преобразованием Фурье:

$$S(\omega) = \int_0^\infty \Delta\alpha(t)\exp(-i\omega t)dt, \qquad (8.133)$$

либо на основании экспериментальных исследований частотных свойств процесса.

Если при измерениях флуктуации угла прихода использовалась аппаратура, позволяющая брать отсчеты $\Delta\alpha$ с частотой $f = 50$ Гц, то частота среза $f_c = 25$ Гц, а круговая частота среза определяется из выражения $\omega_c = 2\pi \cdot 25 = 157$ Гц. Спектр функции связан со спектральной плотностью соотношением:

$$C_\alpha(\omega) = |S(\omega)|^2. \qquad (8.134)$$

Так как относительная средняя квадратическая ошибка воспроизведения функции, обусловленная частотой среза, может быть найдена из соотношения (8.131), то, с учетом (8.119-8.121), для оценки точности измерений флуктуаций угла прихода можно использовать выражение:

$$m_\sigma/\sigma_\alpha = \frac{E_\varepsilon}{E_c} = \frac{1/\pi \int_{\omega_c}^{\infty} C_\alpha(\omega)d\omega}{1/\pi \int_0^{\infty} C_\alpha(\omega)d\omega}. \qquad (8.135)$$

Используя полученное выражение, можно оценить относительную ошибку измерений флуктуации угла прихода при использовании того

или иного метода измерений. Полученные результаты теоретических расчетов отраженны на рис. 8.38. В частности, на этом рисунке показана кривая, характеризующая относительную среднюю квадратическую ошибку измерений угла прихода m_σ/σ_α, обусловленную дискретностью измерений при использовании лазерного углоизмерительного устройства (частота среза ω_c = 157 Гц), для различных значений ω_{max}. Относительная ошибка, вызванная дискретностью измерений, составляет ~10% даже в условиях сильной турбулентности (ω_{max} = 30Гц). Характерное значение этой ошибки ~2–3 %, т. е. пренебрежимо мало. Такая скорость измерений позволяет практически полностью выполнять измерения примерно с одинаковой точностью при любой температурной стратификации атмосферы и при любых условиях освещенности (как днем, так и ночью).

Как видно из представленных графиков, при низких частотах флуктуаций показателя преломления атмосферы, составляющих доли Гц (круговая частота $\omega = 2\pi f$ = 2–3 Гц), что соответствует устойчивой и безразличной температурной стратификации, относительные ошибки оценки флуктуаций угла прихода, полученных на основе визуальных наблюдений амплитуды колебаний изображения визирной цели, составляют единицы процентов. Для наблюдений в условиях, когда температурная стратификация атмосферы не устойчива, т.е. частота колебаний изображений составляет более 1 Гц (т.е. для условий наблюдений днем), относительная ошибка достаточно велика и составляет 50–100 %.

В реальных условиях визуальные отсчеты производятся с частотой на два порядка меньше, поэтому в этих условиях наблюдений относительная ошибка будет еще больше, т.е . практически соответствовать по модулю измеряемой величине σ_α даже при слабо выраженной турбулентности.

Отметим, что устойчивая температурная стратификация наблюдается в основном ночью, когда визуальные наблюдения практически не выполняются, а безразличная температурная стратификация (наблюдаемая в утренние и вечерние часы) характеризуется практически полным отсутствием колебаний. При неустойчивой стратификации (т.е. днем) использование визуального метода определения рефракции на основании измерений амплитуды колебаний визирной цели невозможно, так как погрешность

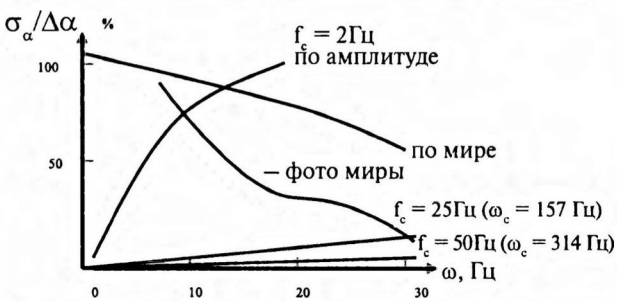


Рис. 8.38. Зависимость средней квадратической ошибки определения флуктуаций угла прихода, вызванной дискретностью измерений $\sigma_\alpha/\Delta\alpha$, от частоты флуктуаций показателя преломления атмосферы ω

измерений примерно равна определяемому значению угловой амплитуды колебаний изображения визирной цели.

При визуальных наблюдениях миры степень размытия ее изображения оценивается недостаточно точно ввиду отсутствия низкочастотных составляющих в регистрируемом процессе, т. е. низкочастотные колебания изображения, вызванные пульсациями показателя преломления при безразличной и устойчивой стратификации, с помощью миры не регистрируются. Согласно расчетам, относительная ошибка оценки флуктуаций угла прихода с помощью миры при неустойчивой температурной стратификации (при наблюдениях днем) составляет порядка 50 %, а при устойчивой и безразличной температурной стратификации – до 80 % (см. рис. 8.38). Это обстоятельство делает невозможным использования наблюдений миры для оценки величины вертикальной рефракции ночью, а также утром и вечером (при безразличной стратификации). При дневных наблюдениях при неустойчивой температурной стратификации с помощью миры можно оценивать рефракцию с погрешностью порядка 50 %.

Отметим, что в работе [8] было предложено определять C_n^2 путем фотографирования миры, а не на основе визуальных наблюдений. Благодаря этому при оценке C_n^2 можно учитывать как высокочастотные, так и низкочастотные составляющие колебаний изображения штрихов миры, если использовать длительную экспозицию. При исследованиях рефракции авторами работ [33–36] этот метод был несколько упрощен, так как размытие изображения миры оценивалось визуально. Как уже отмечалось, при визуальном методе оценки размытия изображения миры происходит потеря низкочастотных составляющих колебаний изображения, и поэтому результаты измерений в значительной степени оказываются искаженными, т.е точность метода ухудшилась. Средняя квадратическая шибка для дневных наблюдений выросла с 10 % до 50 %.

Результаты, полученные экспериментальным путем, также подтверждают, что при использовании различных визуальных методов измерений, информацию получают в различных частотных диапазонах: по амплитуде – в низкочастотном, а по размытию изображения миры – в более высокочастотном.

Необходимо отметить, что точность определения рефракции любым динамическим методом зависит не только от ошибок, вызываемых дискретностью измерений, но также и от точности определения параметров, влияющих на величину угла рефракции. Так, например, при определении рефракции на основании измерений угла прихода можно использовать следующее выражение (8.125):

$$r = r''_н \pm \frac{K \cdot L \cdot \bar{C}_n \langle T \rangle^2}{\langle P \rangle h^{2/3} a(Ri)} = r''_н \pm \frac{M \sigma_{\alpha\,(отр)} L^{1/2} \langle T \rangle^2 (2R)^{1/6}}{[\varphi(\alpha_R)]^{1/2} a(Ri) \langle P \rangle h^{2/3}},$$

где $r''_н = 2{,}5$ L. (Здесь L – длина трассы в км); $\sigma_{\alpha(отр)}$ – среднее квадратическое значение флуктуаций угла прихода, полученные при на-

блюдениях по отражателю, т. е. когда световой пучок проходит трассу в прямом и обратном направлениях; $K = 1{,}45 \cdot 10^3$ град$^{-2}$·угл. сек·мбар; $M = 0{,}44 \cdot 10^3$ град$^{-2}$ мбар. угл. сек.; $\overline{C}_n$ – структурная характеристика поля показателя преломления воздуха, см$^{-1/3}$; <T> – средняя температура воздуха, °K; 2R – диаметр приемного объектива; <P> – среднее давление, мбар; $h_э$ – эквивалентная высота луча, см, которая может быть определена из выражения (8.72); a(Ri) – универсальная функция, которая может быть найдена в табл. 8.9 по значениям числа Ri; значение a(Ri) и знак угла рефракции оцениваются по частотному спектру флуктуаций угла прихода (см. 8.9.):

$$\overline{C}_n^2 = 0{,}088\, \sigma_{\alpha\,(\text{отр})}^2\, \varphi(\alpha_R)^{-1} L^{-1} (2R)^{1/3}.$$

Средняя квадратическая ошибка определения угла рефракции σ_r зависит от точности измерения T, P и $\sigma_{\alpha(\text{отр.})}$, т. е.:

$$\sigma_r = \frac{M\sigma_{\alpha(\text{отр.})}\; L^{1/2} <T>^2 (2R)^{1/6}}{[\varphi(\alpha_R)]^{1/2} a\,(Ri) <P> h^{2/3}} \sqrt{\frac{m_\sigma^2}{\sigma_\alpha^2} + \frac{4m_T^2}{T^2} + \frac{m_P^2}{P^2}}. \quad (8.136)$$

Используя (8.136), оценим величины r″ и σ_r для трассы под Ашхабадом L = 2,5 км для одного ряда измерений угла прихода: <T> = 300 °K; $\sigma_{\alpha(\text{отр.})} = 50''/\rho''$; 2R = 10 см; $\varphi(\alpha_R) = 2$; a(Ri) = 1,5; <P> = 1000мб; h = 21 м. При использовании лазерного углоизмерительного устройства средняя квадратическая инструментальная ошибка измерений составляет 1″. Средние квадратические ошибки температуры и давления можно принять равными 1 °K и 1 мб соответственно. Согласно этим данным угол рефракции r = 6,2″ – 20,4″ = –14,2″, а ошибка определения угла рефракции $\sigma_r = 1{,}2''$.

Для вычисления полной погрешности определения угла рефракции тем или другим методом, необходимо также учитывать ошибку, вызванную дискретностью измерений, так как наблюдения ведутся в турбулентной среде, оптические свойства которой быстро изменяются.

На основании изложенного, можно сделать следующие выводы:

1. Метод определения рефракции, основанный на измерении амплитуды колебаний визирных целей, позволяет оценивать рефракцию в периоды слабовыраженной неустойчивой температурной стратификации атмосферы, т. е. в периоды, когда температурная стратификация атмосферы близка к безразличной. Однако в такие периоды колебания изображения визирной цели имеют очень малую амплитуду и низкую частоту, что затрудняет их визуальную фиксацию. При неустойчивой стратификации (днем), как правило, ошибки определения рефракции соизмеримы по величине с измеряемыми величинами (амплитудой колебаний изображения визирной цели).

2. Метод определения рефракции, основанный на визуальной оценке размытия изображения миры, позволяет выполнять измерения с относительной ошибкой ~50 % в периоды неустойчивой температурной стратификация атмосферы (днем), а в периоды устойчивой темпе-

ратурной стратификации им пользоваться нельзя, так как изображение миры не является размытым.

3. Визуальные методы оценки рефракции могут иметь ограниченное применение из-за малой точности и низкой чувствительности. К тому же при обработке результатов визуальных наблюдений не ясен знак рефракции. Вызывает неудобство и то обстоятельство, что, помимо основного геодезического оборудования, необходимо иметь дополнительно миру. Кроме того, оценка амплитуды колебаний либо наблюдения миры и сами геодезические измерения разнесены во времени, ибо выполняются, как правило, последовательно, т. е. не синхронно. Поэтому и значение рефракции, как правило, будет отличаться от истинного не только за счет погрешностей измерений, но и за счет сдвига наблюдений во времени, так как случайный процесс, описывающий рефракцию, не повторим. Методы определения рефракции на основе измерения амплитуды колебаний визирной цели и на основе оценки размытия изображения миры могут быть использованы только при хорошей освещенности, так как при плохих условиях освещенности нельзя оценить ни амплитуду колебаний, ни степень размытия изображения миры.

4. Выполненный анализ показывает, что наибольшую точность обеспечивает такой метод измерений, который характеризуется широким спектральным диапазоном измерений искажений световой волны в момент выполнения геодезических измерений. Например, если оценка структурной характеристики показателя преломления осуществляется путем фотографирования структур миры, то полученные результаты обладают большой достоверностью, так как в этом случае регистрируются не только высокочастотные составляющие спектра флуктуации угла прихода световой волны, но и низкочастотные составляющие, характеризуемые частотой в доли Гц, соответствующей периоду выдержки в несколько секунд при фотографировании.

5. Ошибку определения угла рефракции по флуктуациям угла прихода можно значительно уменьшить, если имеется высокоточное устройство, автоматически измеряющее направление на цель с большой частотой, а также регистрирующее и обрабатывающее результаты в реальном масштабе времени. Так, при частоте измерений порядка 50 Гц относительная погрешность, обусловленная дискретностью измерений, даже в условиях сильной турбулентности (ω_{max} = 30 Гц) составляет порядка 10 %.

Если повысить частоту измерений до 400 Гц, то ошибки, вызванные дискретностью измерений, могут быть существенно снижены и составлять не более 1 %.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1.2.
Технические характеристики газовых лазеров

Газовые лазеры, выпускаемые отечественной промышленностью

Наименование прибора	Длина волны, мкм	Режим работы	Мощность, мВт	Диаметр пучка, мм	Характер излучения	Средний ресурс, ч	Габариты излучателя, мм	Масса, кг
ЛГ-77	0,63	Одночастотный	5	0,6	Поляризован.	4000	300x125x95	5
ЛГН-207А	0,63	Одномодовый	1,5	1,4	»	5000	035 x 280	0,5
ЛГН-207Б	0,63	»	1	1,4	»	5000	035 x 280	0,5
ЛГН-208А	0,63	»	2	1,4	Неполяризов.	5000	035x280	0,5
ОКГ-13	0,63	Многомодовый	0,5	1,1	Поляризован.	5000	258 x 46 x 46	1
ЛГ-74	10, 6	—	2000	—	—	500	560x140x140	4
ЛГН-208Б	0,63	Одномодовый	1	1,4	Неполяризов.	5000	035x280	0,5
ЛГ-76	0,63	Многомодовый	2	2,5	Поляризован.	6000	035 x 330	0,7
ЛГН-105	0,63	»	2	2,5	»	10000	058x340	1
ЛГ-44	0,63	Одномодовый	3	1,7	»	2500	0100 x 570	5
ЛГ-126	0,63; 1,15; 3,39	Многомодовый	10	4	»	10000	0146x1155	14,5
ЛГ-75-1	0,63	Многомодовый	25	4	»	10000	0103x1080	10
ЛГ-38	0,63	Одномодовый	50	3	»	2000	290x300x 2005	70
ЛГН-104	0,63	Многомодовый	50	4	»	1500	0160x1540	40
ЛГ-70	0,44	Одномодовый	40	0,8	Неполяризов.	2000	290x290 x 1000	25
ЛГ-6	0,44	»	60	3	Поляризован.	2000	290x290x1910	40
ЛГ-62	0,44	»	120	3	Неполяризов.	2000	290x290x1910	
ЛГН-503	0,488	»	1000	2,5	Поляризован.	2000	228x330x1100	50
ЛГН-502	0,45...0,51	»	2000	2,5	Неполяризов.	2000	228x330x1100	50
ЛГН-402	0,45...0,51	Многомодовый	4000	2,5	»	2000	228x330x1100	50
ЛГН-406	0,45...0,51	»	5000	2,5	»	2000	260x310x1150	75
ЛГ-23	10,6	—	3500	—	—	500	250 x 50 x 50	10
ЛГ-22	10,6	—	30000	—	—	5000	1600x240x190	30

Таблица 1.3.
Технические характеристики полупроводниковых лазеров

Лазерные диоды непрерывного режима генерации
(T=25 °C)

Длина волны излучения, нм	Мощность излучения, мВт	Рабочий ток накачки, мА	Рабочее напряжение В	Пороговый ток, мА	Расходимость пучка, град.	Ширина линии излучения (FWHM), нм	Ширина полоска, мкм
Лазерные диоды видимого диапазона							
MOCVD AlGaInP квантоворазмерные структуры							
635...640	5	50	2.3	40	10 x 35	2.0	5
645...660	10	60	2.4	35	10 x 30	2.0	5
660...680	15	55	2.3	35	10 x 30	2.0	5
630...640	20	160	2.5	160	8 x 30	3.0	12
660...680	30	160	2.4	90	8 x 30	3.0	12
660...680	50	200	2.5	100	10 x 35	4.0	15
670...690	100	260	2.5	100	10 x 35	5.0	30
680...690	250	500	2.5	40	10 x 35	5.0	50
Одномодовые лазерные диоды ИК диапазона							
MOCVD GaAlAs квантоворазмерные структуры							
755...765	5	75	2.2	55	10 x 35	1.5	3
770...780	10	80	2.2	45	8 x 30	1.5	3
770...790	100	180	2.2	55	8 x 30	1.5	3
800...820	50	130	2.2	3	10 x 40	1.5	30
800...820	100	160	2.2	3	10 x 35	1.5	30
820...840	50	120	2.2	25	10 x 30	1.5	3
820...840	100	160	2.2	35	10 x 35	1.5	3
840...870	50	150	2.2	40	10 x 35	1.5	3
840...880	100	160	2.2	35	10 x 35	1.5	3
860...880	50	130	2.1	30	10 x 30	1.5	3
870...910	50	180	2.2	40	10 x 30	1.5	3
910...920	50	80	2.2	30	10 x 30	1.5	3
915...925	100	170	2.2	35	10 x 30	1.5	3
MOCVD InGaAs квантоворазмерные структуры							
960...990	50	130	2.3	35	10 x 30	3.0	3
960...990	100	210	2.4	40	10 x 30	3.0	3
MOCVD InGaAsP структуры							
1270...1330	5	50	1.5	30	20 x 35	3.0	2.5
1270...1330	10	75	1.8	30	20 x 35	3.0	2.5
1270...1330	15	100	2.0	30	20 x 35	3.0	2.5
1270...1330	20	95	1.6	20	20 x 35	3.0	3.5
1270...1330	30	120	1.75	20	20 x 35	3.0	3.5
1270...1330	40	180	2.1	25	20 x 35	3.0	4.0
1270...1330	50	200	2.3	25	20 x 35	3.0	4.0
1270...1330	100	350	3.5	50	20 x 35	3–5	6.0
1520...1580	30	150	2.0	25	20 x 35	3.0	4.0
1520...1580	100	400	2.4	50	20 x 35	3–5	6.0

Высокомощные лазерные диоды на основе AlGaAs и InGaAs

(T=25 °C)

Модель	Длина волны излучения, нм	Мощность излучения, мВт	Рабочий ток накачки, мА	Рабочее напряжение, В	Пороговый ток, мА	Расходимость пучка, град	Ширина линии излучения (FWHM), нм	Ширина полоска, мкм
IDL100M-808	805...811	100	300	2.2	180	8 x 30	3	100
IDL250M-808	805...811	250	450	2.0	180	12 x 35	3	80
IDL500M-808	805...811	500	900	2.0	230	12 x 35	3	120
IDL1000M-808	805...811	1000	1400	2.2	350	8 x 30	3	100
IDL200M-830	820...840	200	450	2.2	180	12 x 35	3	30
IDL250M-850	830...870	250	450	2.0	180	12 x 35	3	80
IDL500M-980	960...990	500	800	1.8	150	12 x 32	10	50
IDL1000M-980	960...990	1000	1500	1.9	200	12 x 32	10	100
IDL500M-1020	990...1040	500	900	1.9	200	12 x 32	10	100
IDL1000M-1020	990...1040	1000	1700	2.0	250	12 x 32	10	100

Импульсные лазерные диодные решетки

(T=25 °C)

Модель	Импульсная выходная мощность, Вт	Частота повторения импульсов, Гц	Длительность импульса, нс	Ток накачки, А	Напряжение на решетке, В	Расходимость, град.	Расходимость пучка, град	Габариты тела свечения, мм	Точность позиционирования, мкм
Многомодовые лазерные диоды серии IDLP-810 (800 – 820 нм)									
IDLP50M-810	50	10000	100	22	26	25x10	3	0,4x0,4	±500
IDLP100M-810	100	10000	100	40	20	25x10	3	0,8x0,3	±500
IDLP200M-810	200	5000	100	40	50	25x10	3	0,8x0,8	±500
IDLP500M-810	500	5000	100	60	50	25x10	3	1,4x1,4	±500
Многомодовые лазерные диоды серии IDLP-905 (900–905 нм)									
IDLP50M-905	50	10000	100	22	26	40x12	3	0,4x0,4	±500
IDLP100M-905	100	10000	100	40	20	40x12	3	0,8x0,3	±500
IDLP200M-905	200	5000	100	40	50	40x12	3	0,8x0,8	±500
IDLP500M-905	500	5000	100	60	50	40x12	3	1,4x1,4	±500

Импульсные полупроводниковые лазеры

(T=25 °C)

Модель	Импульсная выходная мощность, Вт	Частота повторения импульсов, Гц	Длительность импульса, нс	Ток потребления, А	Напряжение питания, В	Расходимость, град.	Расходимость пучка, град	Габариты тела свечения, мм	Точность позиционирования, мкм
Серия LPI-805 (800 – 810 нм)									
LPI-50M-805	50	1000 ... 5000	100	0,1	18	25x10	3	0,4x0,4	±500
LPI-100M-805	100	1000 ... 5000	100	0,2	18	25x10	3	0,4x0,4	±500
LPI-150M-805	150	1000 ... 5000	100	0,12	18	25x10	3	0,4x0,8	±500

Таблица 2.2.
Мерные ленты и рулетки



TL5M, 5м, стальная крашеная, широкая лента, 19мм



UM5, 5м, стальная крашеная лента



P10, 10м, тесьмяная лента



EX10, 10м, стальная крашеная лента



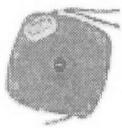
FT10, 10м, фиберглассовая лента



FT20, 20м, фиберглассовая лента



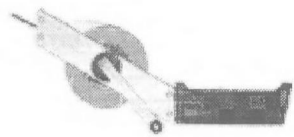
РИМ10, 10м, стальная крашеная лента



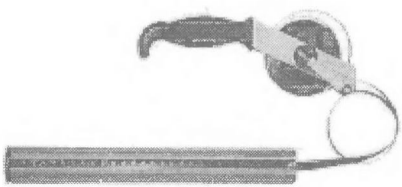
РИМ20, 20м, стальная крашеная лента



EX20, 20м, стальная крашеная лента



TR20, 20м, стальная крашеная лента



P20TЛ, 20м, стальная травленая лента с лотом 2кг



TS20, 20м, стальная нержавеющая лента



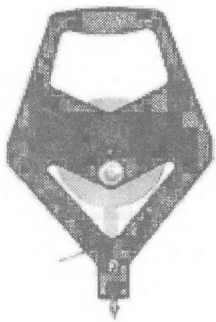
TR30, 30м, стальная крашеная лента



РИМ30, 30м стальная крашеная лента



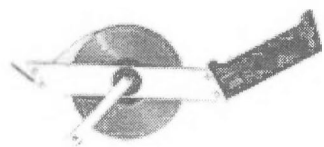
TS30, 30м, стальная нержавеющая лента



РИМ50, 50м, стальная крашеная лента



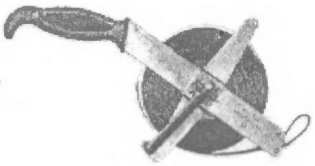
RN50, 50м, фиберглассовая лента



TS50, 50м, стальная нержавеющая лента



FT30, 30м,
фиберглассовая
лента



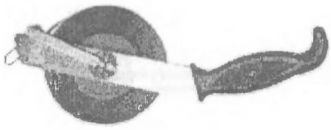
P50T, 50м,
стальная травленая
лента



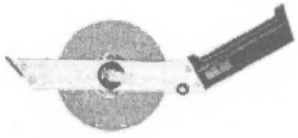
TC30, 30м,
стальная крашеная лента
с полиамидным покрытием



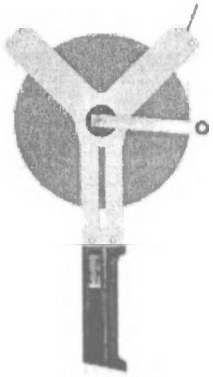
NL19-MB1302, 30м,
стальная крашеная лента
с полиамидным покрытием



P30T, 30м,
стальная травленая лента



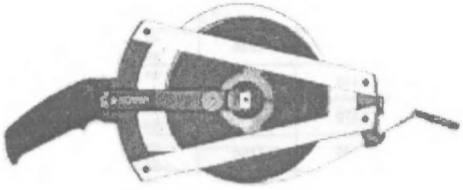
TR50, 50м,
стальная крашеная лента



YC50, 50м,
стальная крашеная лента
с полиамидным покрытием



NL19-MB1502, 50 м,
стальная крашеная лента
с полиамидным покрытием



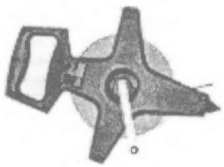
BM247440050A, 50м,
стальная крашеная лента с полиамидным покрытием



RN30, 30м,
фиберглассовая лента



Сменные ленты для TR30/5, YR30/5, TR50/5,
YR50/5, TC30/5, TC50/5, TS30/2, TS50/2,
PR100/5, SF10/9, FX10/9, RN10/9, SF20/9,
FX20/9, RN20/9, SF30/9, FX30/9, RN30/9, RN50



PR100, 100м
стальная крашеная лента

Таблица 2.8.
Технические характеристики цифровых теодолитов

Цифровые теодолиты совместного производства фирм Nikon (Япония) и Trimble (США)

Наименование	Точность угловых измерений, угл. сек	Наименьшее расстояние визирования, м	Увеличение	Диапазон работы компенсатора, мин.	Время работы от аккумуляторов, часов	Водозащищенность	Рабочая температура	Масса, кг
Nikon NE-203/202	5	0,7	30[x]	3′			от −20 °C до +45 °C	4,8
Nikon NE-20H/	7	1	26[x]				от −20 °C до +45 °C	4,0
Nikon NE-20S	10	1	26[x]				от −20 °C до +45 °C	3,8

Цифровые теодолиты фирмы South (Китай)

Наименование	Точность угловых измерений, угл. сек	Наименьшее расстояние визирования, м	Увеличение зрительной трубы, крат	Диапазон работы компенсатора, мин.	Время работы от аккумуляторов, час.	Водозащищенность	Рабочая температура	Масса, кг
ET-02	2	1,4	30[x]	3	10	IPX4	от −20 °C до +45 °C	5,2
ET-05	5	1,4	30[x]	3	10	IPX4	от −20 °C до +45 °C	5,2
ET-10	10	1,4	30[x]	3	10	IPX4	от −20 °C до +45 °C	5,2

Цифровые теодолиты фирмы Topcon (Япония)

Наименование	Угловая точность, сек(″)	Наименьшее расстояние визирования, м	Увеличение зрительной трубы, крат	Диапазон работы компенсатора, мин.(′)	Время работы от аккумуляторов, час.	Водозащищенность	Рабочая температура	Масса, кг
DT205	5	0,9	30[x]	3	140	IP66	от −20 °C до +50 °C	4,1
DT207	7	0,9	30[x]	нет	150	IP66	от −20 °C до +50 °C	4,1
DT209	9	0,9	26[x]	нет	170	IP66	от −20 °C до +50 °C	3,4
DT205L	5	1,0	30[x]	3	140	IP66	от −20 °C до +50 °C	4,2
DT207L	7	1,0	30[x]	нет	150	IP66	от −20 °C до +50 °C	4,2
DT209L	9	1,0	26[x]	нет	170	IP66	от −20 °C до +50 °C	3,6

Таблица 2.9.
Технические характеристики электронных тахеометров

Электронные тахеометры фирмы Pentax

Наименование характеристики	R-322NX	R-323NX	R-325NX R-325EX R-315NX	R-326EX
Увеличение зрительной трубы, крат, не менее	30			
Диаметр входного зрачка зрительной трубы, мм	не менее 45			
Предел разрешения зрительной трубы, ″	не более 3,0			
Угловое поле зрения зрительной трубы	не менее 1°30′			
Наименьшее расстояние визирования, м	не более 1,0			
Класс лазера	видимый лазер			
Цена деления круглого уровня, ′/2 мм	8±1,2			
Цена деления электронного уровня, ″	30±4,5			
Диапазон работы компенсатора, ′, не менее	±3			
Систематическая погрешность компенсатора во всем его диапазоне, ″, не более	±1,0	±1,5	±2,5	±3,0
Компенсатор	трехосевой		двухосевой	
Диапазон измерений				
углов, °	0–360			
расстояний, м, не менее				
– отражательный режим (1 призма)	1,5–4500	1,5–4000		1,5–2800
– отражательный режим (3 призмы)	200–5600		200–5000	200–3500
– безотражательный режим	1,5–200			–
Дискретность отсчитывания измерений				
– углов, ″	1; 5			
– расстояний, мм	0,1; 1; 10			
Допускаемое СКО измерений, не более				
– углов, ″	2	3	5	6
– расстояний, мм				
– отражательный режим (1 призма)	2 + 2x10^{-6}xD, где D – измеряемое расстояние, мм			3 + 2x10^{-6}xD
– безотражательный режим	5 + 2x10^{-6}xD	5 + 3x10^{-6}xD		–
Объем внутренней памяти, точек	20000	16000		12000
Наводящие винты	2 скорости		1 скорость	
Часы				
NX	да		да	–
EX	да		нет	нет
Источник электропитания	аккумулятор: 6,0 В; 4,3 Ач			
Продолжительность непрерывной работы, не менее				
режим измерения углов, ч	12			
режим измерения расстояний и углов, ч	5			
Диапазон рабочих температур, °С:	от –20 до +50			
Габаритные размеры, Д x Ш x В, мм, не более	177 x 177 x 343			
Масса, кг, не более	5,7	5,5		5,7

Электронные тахеометры фирмы Sokkia (Япония)

Серия		Sokkia 10			
Модель		SET210	SET310	SET510	SET610
Зрительная труба					
Увеличение		30x			26x
Минимальное расстояние фокусирования		1,3 м			
Угловые измерения					
Минимальная цена деления отсчета		1"			
Точность (СКО)		2"	3"	5"	6"
Диапазон измерения вертикального угла					
Компенсатор		двухосевой, ±3'			
Измерение расстояний		инфракрасный – 1 IEC			
Мощность излучения (макс.)	без отражателя				
	режим пленки/призмы				
Диапазон измерений при хороших условиях	без отражателя				
	пленка	до 70 м			до 60 м
	призма	до 2200 м			до 1800 м
	на три призмы				
Точность (СКО)	без отражателя				
	пленка	± (4 мм + 3 ppmxD) мм			
	призма	± (2 мм + 2 ppmxD) мм			
Время измерения	в одиночном точном режиме	1,6 с.			
	в непрерывном режиме				
Дальность самонаведения					
Диапазон самонаведения	горизонтально				
	вертикально				
Время самонаведения (с одной призмой, до 100 м)					
Светонавигатор					
Максимальное расстояние видимости					
Хранение и передача данных					
Внутренняя память, точек		10000 точек			
Дополнительная память		CF-карта – 8 Мб (72000)/16 Мб (144000)			
Общие характеристики					
Внутренний аккумулятор		ЛИ BDC46A, 7,2 В			
время работы при +25 °С		около 5 часов			
время зарядки		менее 2 часов			
Внешний аккумулятор					
время работы при +25 °С					
Диапазон рабочих температур		от –20 °С до +50 °С / от –30 °С для SET 510L			
Пыле- и влагозащищенность		по классу IP66			
Габаритные размеры, мм		165x170x341 мм			
Вес (с трегером, ручкой и аккумулятором), кг		5,2 кг			5,1 кг

Серия		Sokkia 30R			
Модель		SET 230 R/R3	SET 330 R/R3	SET530 R/R3	SET630R
Зрительная труба					
Увеличение		30x			26x
Минимальное расстояние фокусирования		1,3 м			
Угловые измерения					
Минимальная цена деления отсчета		1"			
Точность (СКО)		2"	3"	5"	6"
Диапазон измерения вертикального угла					
Компенсатор		двухосевой, ±3'			
Измерение расстояний		лазер			
Мощность излучения (макс.)	без отражателя	R3 – 5 мВт, R – 0,99 мВт			R – 0,99 мВт
	режим пленки/призмы	0,22 мВт			
Диапазон измерений при хороших условиях	без отражателя	R3 – 350 м R – 150 м	R3 – 350 м R – 100 м		R – 100 м
	пленка	до 500 м			
	призма	до 5000 м			до 4000 м
	на три призмы				
Точность (СКО)	без отражателя	± (3 мм + 2 ppmxD) мм			
	пленка	± (3 мм + 2 ppmxD) мм			
	призма	± (2 мм + 2 ppmxD) мм			
Время измерения	в одиночном точном режиме	1,3 с.			
	в непрерывном режиме				
Дальность самонаведения					
Диапазон самонаведения	горизонтально				
	вертикально				
Время самонаведения (с одной призмой, до 100 м)					
Светонавигатор					
Максимальное расстояние видимости					
Хранение и передача данных					
Внутренняя память, точек		10000 точек			
Дополнительная память		CF-карта – 8 Мб (72000)/16 Мб (144000)			
Общие характеристики					
Внутренний аккумулятор		ЛИ BDC46A, 7,2 В			
время работы при +25 °С		около 5 часов			
время зарядки		менее 2 часов			
Внешний аккумулятор					
время работы при +25 °С					
Диапазон рабочих температур		от –20 °С до +50 °С			
Пыле- и влагозащищенность		по классу IP66			
Габаритные размеры, мм		165x171x341 мм			
Вес (с трегером, ручкой и аккумулятором), кг		5,4 кг			5,3 кг

Серия		Sokkia 030R			Sokkia 110M	
Модель		SET 1030 R/R3	SET 2030 R/R3	SET 3030 R/R3	SET 3110M	SET 4110M
Зрительная труба		прямого изображения			прямого изображения	
Увеличение		30x			30x	
Минимальное расстояние фокусирования		1 м			1 м	
Угловые измерения						
Минимальная цена деления отсчета		0,5"		1"	1"	
Точность (СКО)		1"	2"	3"	3"	5"
Диапазон измерения вертикального угла						
Компенсатор		двухосевой, ±3'			двухосевой, ±3'	
Измерение расстояний		лазер			инфракрасный – 1 IE C	
Мощность излучения (макс.)	без отражателя	R3 – 5 мВт, R – 0,99 мВт				
	режим пленки/призмы	0,22 мВт				
Диапазон измерений при хороших условиях	без отражателя	R3 – от 0,3 до 350 м R – от 0,3 до 150 м				
	пленка	от 1,3 до 500 м			от 3 до 80 м	
	призма	от 1,3 до 5000 м			от 1,2 до 1600 м	
	на три призмы					
Точность (СКО)	без отражателя	± (3 + 2 ppmxD) мм /± (5 + 10 ppmxD)				
	пленка	± (3 + 2 ppmxD) мм			± (4 + 2 ppmxD) мм	
	призма	± (2 + 2 ppmxD) мм			± (2 + 2 ppmxD) мм	
Время измерения	в одиночном точном режиме	1,4 с.			2,0 с.	
	в непрерывном режиме					
Дальность самонаведения					от 2 м до 800 м	
Диапазон самонаведения	горизонтально				±2,5° (±4 м на 100 м)	
	вертикально				±2 (±3,5 м на 100 м)	
Время самонаведения (с одной призмой, до 100 м)					от 3 до 6 с.	
Светонавигатор		2 светодиода			2 светодиода	
Максимальное расстояние видимости		до 150 м			до 170 м	
Хранение и передача данных						
Внутренняя память, точек		10000			20000	
Дополнительная память		CF-карта памяти				
Общие характеристики						
Внутренний аккумулятор		NM BDC35A, 6 В			NM BDC45, 10,8 В	
время работы при +25° С		около 5 часов			4,5 часа	3 часа
время зарядки		около 70 мин.			около 130 мин.	
Внешний аккумулятор					NK BDC7, 12 В	
время работы при +25° С					около 7 часов	
Диапазон рабочих температур		от –20 °С до +50 °С			от –20 °С до +50 °С	
Пыле- и влагозащищенность		по классу IP66			по классу IPX2	
Габаритные размеры, мм		186x171x345 мм			202x165x380	202x165x354
Вес (с трегером, ручкой и аккумулятором), кг		5,9 кг			7,1 кг	

Серия		Sokkia 110R		Sokkia 130R			
Модель		SET 3110R	SET 4110R	SET 1130 R/R3	SET 2130 R/R3	SET 3130 R/R3	SET 4130 R/R3
Зрительная труба		прямого изображения		прямого изображения			
Увеличение		30x		30x			
Минимальное расстояние фокусирования		1 м		1 м			
Угловые измерения							
Минимальная цена деления отсчета		1"		0,5"			
Точность (СКО)		3"	5"	1"	2"	3"	5"
Диапазон измерения вертикального угла							
Компенсатор		двухосевой, ±3'		двухосевой, ±3'			
Измерение расстояний		лазер – 1 IEC, 830 нм		лазер			
Мощность излучения (макс.)	без отражателя			R – 0,99 мВт, R3 – 5 мВт			
	режим пленки/призмы			0,22 мВт			
Диапазон измерений при хороших условиях	без отражателя	1–85 м		R – от 0,3 до 150 м, R3 – от 0,3 до 350 м			
	пленка	1–500 м		от 1,3 до 500 м			
	призма	1–4000 м		от 1,3 до 5000 м			
	на три призмы						
Точность (СКО)	без отражателя	± (5 + 3 ppmxD) мм		± (3 + 2 ppmxD) мм / ± (5 + 10 ppmD) мм			
	пленка	± (5 + 3 ppmxD) мм		± (3 + 2 ppmD) мм			
	призма	± (3 + 3 ppmxD) мм		± (2 + 2 ppmD) мм			
Время измерения	в одиночном точном режиме	2,0 с.		2,6 с.			
	в непрерывном режиме						
Дальность самонаведения							
Диапазон самонаведения	горизонтально						
	вертикально						
Время самонаведения (с одной призмой, до 100 м)							
Светонавигатор				2 светодиода			
Максимальное расстояние видимости				до 170 м			
Хранение и передача данных							
Внутренняя память, точек		3000 или 24 файла		10000 или 10 файлов			
Дополнительная память				CF-карта памяти			
Общие характеристики							
Внутренний аккумулятор		НМ BDC35A, 6 В		НМ BDC35A, 6 В			
время работы при +25 °С		около 5,5 часов		около 6,5 часов			
время зарядки		около 70 мин		около 70 мин			
Внешний аккумулятор							
время работы при +25 °С							
Диапазон рабочих температур		от –20 °С до +50 °С		от –20 °С до +50 °С			
Пыле- и влагозащищенность		по классу IPX2		по классу IP64			
Габаритные размеры, мм		177x165x345 мм		175x171x345			
Вес (с трегером, ручкой и аккумулятором), кг		5,4 кг		5,8 кг			

Серия		Sokkia Monmos
Модель		NET 1200
Зрительная труба		прямого изображения
Увеличение		30x
Минимальное расстояние фокусирования		1,3 м
Угловые измерения		
Минимальная цена деления отсчета		0,5"/1"
Точность (СКО)		±1"
Диапазон измерения вертикального угла		
Компенсатор		двухосевой, ±3'
Измерение расстояний		лазер
Мощность излучения (макс.)	без отражателя	0,99 мВт
	режим пленки/призмы	0,22 мВт
Диапазон измерений при хороших условиях	без отражателя	1,3–40 м
	пленка	1,3–200 м
	призма	1,3–350 м
	на три призмы	
Точность (СКО)	без отражателя	± (1 + 2 ppmxD) мм
	пленка	± (0,6 + 2 ppmxD) мм
	призма	± (1 + 2 ppmxD) мм
Время измерения	в одиночном точном режиме	1,0 с
	в непрерывном режиме	
Дальность самонаведения		
Диапазон самонаведения	горизонтально	
	вертикально	
Время самонаведения (с одной призмой, до 100 м)		
Светонавигатор		
Максимальное расстояние видимости		
Хранение и передача данных		
Внутренняя память, точек		10000
Дополнительная память		
Общие характеристики		
Внутренний аккумулятор		ЛИ BDC46A, 7,2 В
время работы при +25 °С		около 6 часов
время зарядки		менее 2 часов
Внешний аккумулятор		HKBDC12, 6,0 В
время работы при +25 °С		до 22,5 часов
Диапазон рабочих температур		от –10 °С до +50 °С
Пыле- и влагозащищенность		по классу IP66
Габаритные размеры, мм		165x171x341 мм
Вес (с трегером, ручкой аккумулятором), кг		5,5 кг

Электронные тахеометры фирмы South (Китай)

Параметры	Модель					
	NTS322	NTS325	NTS327	NTS352	NTS355	NTS357
Увеличение, крат	30x	30x	30x	30x	30x	30x
Минимальное фокусное расстояние, м	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Точность измерения углов, сек. (")	2	5	10	2	5	10
Дальность	1-призма: 1800 м	1-призма: 1600 м	1-призма: 1600 м	1-призма: 1800 м	1-призма: 1600 м	1-призма: 1600 м
Точность измерения расстояний	3 мм + 2 мм/км	3 мм + 2 мм/км	3 мм + 2 мм/км	2 мм + 2 мм/км	2 мм + 2 мм/км	2 мм + 2 мм/км
Внутренняя память	8000 точек	8000 точек	8000 точек	8000 точек	8000 точек	8000 точек
Компенсатор	Жидкостной, ± 3'	Жидкостной, ± 3'	Жидкостной, ± 3'	Жидкостной, ± 3'	Жидкостной, ± 3'	Жидкостной, ± 3'
Рабочая температура	от –20 °С до +45 °С	от –20 °С до +45 °С	от –20 °С до +45 °С	от –20 °С до +45 °С	от –20 °С до +45 °С	от –20 °С до +45 °С
Время работы батареи, часов	3 малый / 8 большой аккумулятор	3 малый / 8 большой аккумулятор	3 малый / 8 большой аккумулятор	3 малый / 8 большой аккумулятор	3 малый / 8 большой аккумулятор	3 малый / 8 большой аккумулятор
Водозащищенность	IPX3	IPX3	IPX3	IPX3	IPX3	IPX3
Вес, кг	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0

Электронные тахеометры производства фирмы Trimble (совместно с фирмой Nikon)

Серия		Trimble (Nikon) DTM-302		Trimble (Nikon) DTM-502		
Модель		DTM-352	DTM-332	DTM-552	DTM-532	DTM-522
Зрительная труба						
Увеличение		33x		33x		
Минимальное расстояние фокусирования		1,3 м		1,3 м		
Угловые измерения						
Минимальная цена деления отсчета		1"/5"/10"		0,5"/1"/5"	0,5"/1"/10"	
Точность (СКО)		5 м		1"	2"	3"
Диапазон измерения вертикального угла						
Компенсатор		двухосевой, ±3'		двухосевой, ±3'		
Измерение расстояний						
Мощность излучения (макс.)	без отражателя					
	режим пленки/призмы					
Диапазон измерений при хороших условиях	без отражателя					
	пленка					
	призма	2000 м		2400 м		
	на три призмы	2600 м		3100 м		
Точность (СКО)	без отражателя					
	пленка					
	призма					
Время измерения	в одиночном точном режиме			1 с		
	в непрерывном режиме					
Дальность самонаведения						
Диапазон самонаведения	горизонтально					
	вертикально					
Время самонаведения (с одной призмой, до 100 м)						
Светонавигатор						
Максимальное расстояние видимости						
Хранение и передача данных						
Внутренняя память, точек		10000 строк		10000 строк		
Дополнительная память						
Общие характеристики						
Внутренний аккумулятор		Ni-MH, BC-65		Ni-MH аккумулятор BC-80		
время работы при +25 °C		16–30 часов		10,5–30 часов		
время зарядки		2 часа		2 часа		
Внешний аккумулятор						
время работы при +25 °C						
Диапазон рабочих температур		от –20 °C до +50 °C		от –20 °C до +50 °C		
Пыле- и влагозащищенность		IPX4		IPX4		
Габаритные размеры, мм						
Вес (с трегером, ручкой и аккумулятором), кг		5,3 кг		4,9 кг		

Серия		Trimble (Nikon) DTM-801			Trimble (Nikon) NPL-302	
Модель		DTM-851	DTM-831	DTM-821	NPL-352	NPL-332
Зрительная труба						
Увеличение		33x			26x	
Минимальное расстояние фокусирования		1,3 м			1,3 м	
Угловые измерения						
Минимальная цена деления отсчета		0,5"/1"	1"/5"		1"/5"/10"	
Точность (СКО)		1"	2"	3"	5"	
Диапазон измерения вертикального угла						
Компенсатор		двухосевой, ±3"			двухосевой, ±3"	
Измерение расстояний						
Мощность излучения (макс.)	без отражателя					
	режим пленки/ призмы					
Диапазон измерений при хороших условиях	без отражателя				>200 м	
	пленка				800 м	
	призма	2400 м	2200 м	1600 м	5000 м	
	на три призмы	3100 м	2900 м	2300 м		
Точность (СКО)	без отражателя					
	пленка					
	призма	± (2 мм + 2 мм/км)			± (3 мм + 2 мм/км)	
Время измерения	в одиночном точном режиме	1,2 с.			1,6 с.	
	в непрерывном режиме					
Дальность самонаведения						
Диапазон самонаведения	горизонтально					
	вертикально					
Время самонаведения (с одной призмой, до 100 м)						
Светонавигатор						
Максимальное расстояние видимости						
Хранение и передача данных						
Внутренняя память, точек		Ext MS-DOS, 128 Кб			10000 строк	
Дополнительная память		PCMCIA 512 Кб				
Общие характеристики						
Внутренний аккумулятор		Ni-MH аккумулятор BC-80			Ni-MH, BC-65	
время работы при +25 °C		до 7,5 часов			16–30 часов	
время зарядки		2 часа			2 часа	
Внешний аккумулятор						
время работы при +25 °C						
Диапазон рабочих температур		от –20 °C до +50 °C			от –20 °C до +50 °C	
Пыле- и влагозащищенность		IPX4			IPX4	
Габаритные размеры, мм						
Вес (с трегером, ручкой аккумулятором), кг		5,6 кг			5,3 кг	

Серия		Trimble (Nikon) NPL-821	Trimble Total Station 3300DR	
Модель		NPL-821	3303	3305/3306
Зрительная труба				
Увеличение		26x	26x	
Минимальное расстояние фокусирования		2,0 м	1,5 м	
Угловые измерения				
Минимальная цена деления отсчета		1"/5"	0,1"	
Точность (СКО)		3"	3"	5"
Диапазон измерения вертикального угла				
Компенсатор		двухосевой, ±3'	одноосевой, ±5'	
Измерение расстояний			лазер 660 нм	
Мощность излучения (макс.)	без отражателя			
	режим пленки/призмы			
Диапазон измерений при хороших условиях	без отражателя	> 100 м	до 100 м	
	пленка		2,5–800 м	
	призма	5000 м	1,5–3000 м	
	на три призмы		1,5–5000 м	
Точность (СКО)	без отражателя		± (3 мм + 2 мм/км)	
	пленка		± (3 мм + 2 мм/км)	
	призма	± (5 мм + 3 мм/км)	± (2 мм + 2 мм/км)	
Время измерения	в одиночном точном режиме	2,5 с	2 с	
	в непрерывном режиме			
Дальность самонаведения				
Диапазон самонаведения	горизонтально			
	вертикально			
Время самонаведения (с одной призмой, до 100 м)				
Светонавигатор				
Максимальное расстояние видимости				
Хранение и передача данных				
Внутренняя память, точек		Ext MS-DOS, 128 Кб	1900 (3306 без памяти)	
Дополнительная память		PCMCIA		
Общие характеристики				
Внутренний аккумулятор		Ni-MH, BC-80	Ni-MH, 6 В, 1,1 А/ч	
время работы при +25 °С		5–7,5 часов	8 часов	
время зарядки		2 часа	2 часа с LG20	
Внешний аккумулятор		Ni-MH, B4E		
время работы при +25 °С		8–12,5 часов		
Диапазон рабочих температур		от –20 °С до +50 °С	от –20 °С до +50 °С	
Пыле- и влагозащищенность		IPX4	IPX3	
Габаритные размеры, мм			173x268x193 мм	
Вес (с трегером, ручкой и аккумулятором), кг		5,9 кг	3,5 кг	

Электронные тахеометры производства фирмы Trimble

Серия		Trimble Total Station 3300X-theme	
Модель		3303	3305
Зрительная труба			
Увеличение		26x	
Минимальное расстояние фокусирования		1,5 м	
Угловые измерения			
Минимальная цена деления отсчета		0,1"	
Точность (СКО)		3"	5"
Диапазон измерения вертикального угла			
Компенсатор		одноосевой, ±5'	
Измерение расстояний			
Мощность излучения (макс.)	без отражателя		
	режим пленки/призмы		
Диапазон измерений при хороших условиях	без отражателя		
	пленка		
	призма	1500 м	1300 м
	на три призмы	2500 м	1600 м
Точность (СКО)	без отражателя		
	пленка		
	призма	± (3 мм + 3 ppm)	± (5 мм + 3 ppm)
Время измерения	в одиночном точном режиме	2 с	
	в непрерывном режиме		
Дальность самонаведения			
Диапазон самонаведения	горизонтально		
	вертикально		
Время самонаведения (с одной призмой, до 100 м)			
Светонавигатор			
Максимальное расстояние видимости			
Хранение и передача данных			
Внутренняя память, точек			
Дополнительная память			
Общие характеристики			
Внутренний аккумулятор		Ni-MH, 6 В, 1,3 Ач	
время работы при +25 °С		около 8 часов	
время зарядки		2 часа	
Внешний аккумулятор		NiCd, 6 В, 7 Ач	
время работы при +25 °С		около 8 часов	
Диапазон рабочих температур		от –35 °С до +50 °С	
Пыле- и влагозащищенность		IPX4	
Габаритные размеры, мм		173x268x193 мм	
Вес (с трегером, ручкой и аккумулятором), кг		3,5 кг	

Серия		Trimble Total Station 3600DR-theme					
Модель		3601DR	3602DR	3603DR	3603DR Arctic	3605DR	3605DR Arctic
Зрительная труба							
Увеличение		50x					
Минимальное расстояние фокусирования		1,5 м					
Угловые измерения							
Минимальная цена деления отсчета		0,1"					
Точность (СКО)		1,5"	2"	3"		5"	
Диапазон измерения вертикального угла							
Компенсатор		двухосевой, 5'					
Измерение расстояний		лазерный диод 660 нм					
Мощность излучения (макс.)	без отражателя						
	режим пленки/призмы						
Диапазон измерений при хороших условиях	без отражателя	120 м					
	пленка	800 м					
	призма	3000 м					
	на три призмы	5000 м					
Точность (СКО)	без отражателя	± (3 мм + 2 ppm)					
	пленка	± (3 мм + 2 ppm)					
	призма	± (2 мм + 1 ppm)					
Время измерения	в одиночном точном режиме	< 2 с.					
	в непрерывном режиме	<1,8 с.					
Дальность самонаведения							
Диапазон амонаведения	горизонтально						
	вертикально						
Время самонаведения (с одной призмой, до 100 м)							
Светонавигатор							
Максимальное расстояние видимости							
Хранение и передача данных							
Внутренняя память, точек		4 Мб (до 10000 точек)					
Дополнительная память		flash – 128 Мб					
Общие характеристики							
Внутренний аккумулятор		Ni-MH, 6 В, 3,5 А/ч					
время работы при +25 °С		8,5 часов					
время зарядки		1,5 часа					
Внешний аккумулятор		Ni-Cd, 6 В, 7,0 А/ч					
время работы при +25 °С		12 (время зарядки – 3,5 часа)					
Диапазон рабочих температур		от –20 °С до +50 °С / от –32 °С до +50 °С					
Пыле- и влагозащищенность		IPX4					
Габаритные размеры, мм		220x370x185 мм					
Вес (с трегером, ручкой и аккумулятором), кг		< 6,7 кг					

Серия		Trimble Total Station 5600DR				Trimble Total Station 5601DR200+			
Модель		5601	5602	5603	5605	5601	5602	5603	5605
Зрительная труба									
Увеличение		26x (30x как опция)				26x (30x как опция)			
Минимальное расстояние фокусирования		1,7 м				1,7 м			
Угловые измерения									
Минимальная цена деления отсчета		1"				1"			
Точность (СКО)		0,8"	2"	3"	5"	1"	2"	3"	5"
Диапазон измерения вертикального угла									
Компенсатор		двухосевой, ±6'				двухосевой, ±6'			
Измерение расстояний		лазерный, 660 нм				лазерный, 870 нм			
Мощность излучения (макс.)	без отражателя								
	режим пленки/призмы								
Диапазон измерений при хороших условиях	без отражателя	70 м				> 600 м			
	пленка	800 м				1600 м			
	призма	3000 м				5500 м			
	на три призмы	5000 м				7500 м			
Точность (СКО)	без отражателя	± (3 мм + 2 ppm)				± (3 мм + 3 ppm)			
	пленка	± (3 мм + 2 ppm)				± (3 мм + 3 ppm)			
	призма	± (2 мм + 1 ppm)				± (3 мм + 3 ppm)			
Время измерения	в одиночном точном режиме	2 с.				2 с.			
	в непрерывном режиме								
Дальность самонаведения									
Диапазон самонаведения	горизонтально								
	вертикально								
Время самонаведения (с одной призмой, до 100 м)									
Светонавигатор									
Максимальное расстояние видимости									
Хранение и передача данных									
Внутренняя память, точек		4 Мб (до 10000 точек)				4 Мб (до 10000 точек)			
Дополнительная память		flash – 128 Мб				flash – 128 Мб			
Общие характеристики									
Внутренний аккумулятор		Ni-MH, 128 В, 1,8 А/ч				Ni-MH, 128 В, 1,8 А/ч			
время работы при +25 °С		8,5 часов							
время зарядки		3 часа				3 часа			
Внешний аккумулятор		Ni-MH, 12 В, 3,8–11 А/ч				Ni-MH, 12 В, 3,8–11 А/ч			
время работы при +25 °С		11 ч. для Servo, 9 ч. для Robotic (11,4 А/ч)				11 ч. для Servo, 9 ч. для Robotic (11,4 А/ч)			
Диапазон рабочих температур		от –20 °С до +50 °С				от –20 °С до +50 °С			
Пыле- и влагозащищенность									
Габаритные размеры, мм		220x370x185 мм							
Вес (с трегером, ручкой и аккумулятором), кг		6,7 кг				6,7 кг			

Серия		Trimble Total Station 5600DR+			Trimble Total Station S6
Модель		5601	5602	5603	DR/DR200+/DR300+
Зрительная труба					
Увеличение		26x (30x как опция)			30x
Минимальное расстояние фокусирования		1,7 м			1,5 м
Угловые измерения					
Минимальная цена деления отсчета		1"			1"
Точность (СКО)		1"	2"	3"	1–5"
Диапазон измерения вертикального угла					
Компенсатор		двухосевой, ±6'			двухосевой (автомат. гориз.), ±6'
Измерение расстояний		лазерный, 870 нм			
Мощность излучения (макс.)	без отражателя				
	режим пленки/призмы				
Диапазон измерений при хороших условиях	без отражателя	> 800 м			> 800 м
	пленка	2400 м			1600 м
	призма	5500 м			5500 м
	на три призмы	7500 м			7500 м
Точность (СКО)	без отражателя	± (3 мм + 3 ppm)			± (2 мм + 3 ppm)
	пленка	± (3 мм + 3 ppm)			± (2 мм + 3 ppm)
	призма	± (3 мм + 3 ppm)			± (2 мм + 3 ppm)
Время измерения	в одиночном точном режиме	3 с.			1,2 с.
	в непрерывном режиме				
Дальность самонаведения					
Диапазон самонаведения	горизонтально				
	вертикально				
Время самонаведения (с одной призмой, до 100 м)					
Светонавигатор					
Максимальное расстояние видимости					
Хранение и передача данных					
Внутренняя память, точек		4 Мб (до 10000 точек)			256 Мб
Дополнительная память		flash – 128 Мб			
Общие характеристики					
Внутренний аккумулятор		Ni-MH, 128 В, 1,8 А/ч			Ni-MH
время работы при +25 °С					5–7,5 часов
время зарядки		3 часа			3 часа
Внешний аккумулятор					Ni-MH, B4E
время работы при +25 °С					8–12,5 часов
Диапазон рабочих температур		от –20 °С до +50 °С			от –20 °С до +50 °С
Пыле- и влагозащищенность		IPX5			IP55
Габаритные размеры, мм					
Вес (с трегером, ручкой и аккумулятором), кг		6,7 кг			5,65 кг

Электронные тахеометры производства фирмы Topcon

Серия		Topcon GPT-8200			
Модель		8201A	8202A	8203A	8205A
Зрительная труба					
Увеличение		30x			
Минимальное расстояние фокусирования		1,3 м			
Угловые измерения					
Минимальная цена деления отсчета		1"			
Точность (СКО)		1"	2"	3"	5"
Диапазон измерения вертикального угла					
Компенсатор		двухосевой, ±4'			
Измерение расстояний					
Мощность излучения (макс.)	без отражателя				
	режим пленки/призмы				
Диапазон измерений при хороших условиях	без отражателя	3–120 м			
	пленка				
	призма	1200 м			
	на три призмы	7000 м			
Точность (СКО)	без отражателя	± (3 мм + 2 мм/км)			
	пленка				
	призма	± (2 мм + 2 мм/км)			
Время измерения	в одиночном точном режиме	1,2 с.			
	в непрерывном режиме				
Дальность самонаведения					
Диапазон самонаведения	горизонтально				
	вертикально				
Время самонаведения (с одной призмой, до 100 м)					
Светонавигатор					
Максимальное расстояние видимости					
Хранение и передача данных					
Внутренняя память, точек		5000 точек			
Дополнительная память		ATA Flash 32Mб			
Общие характеристики					
Внутренний аккумулятор					
время работы при +25 °C					
время зарядки					
Внешний аккумулятор					
время работы при +25 °C					
Диапазон рабочих температур		от –20 °C до +50 °C			
Пыле- и влагозащищенность		по классу IP64			
Габаритные размеры, мм		325x229x211 мм			
Вес (с трегером, ручкой и аккумулятором), кг		8 кг			

Серия		Topcon GPT-7000				Topcon GPT-3000			
Модель		GPT-7001	GPT-7002	GPT-7003	GPT-7005	GPT-3001	GPT-3002	GPT-3003	GPT-3005
Зрительная труба									
Увеличение		30x				30x			
Минимальное расстояние фокусирования		1,3 м				1,3 м			
Угловые измерения									
Минимальная цена деления отсчета		1"				1"			
Точность (СКО)		1"	2"	3"	5"	2"	3"	5"	7"
Диапазон измерения вертикального угла									
Компенсатор		двухосевой, ±4'				двухосевой, ±3', одноосевой, ±3' для 3007			
Измерение расстояний									
Мощность излучения (макс.)	без отражателя								
	режим пленки/призмы								
Диапазон измерений при хороших условиях	без отражателя	1,5–250 м				1,5–250 м			
	пленка								
	призма	3500 м			2300 м	3500 м			
	на три призмы	4700 м			3100 м	3500 м			
Точность (СКО)	без отражателя	± (3 мм + 2 мм/км)				± (3 мм + 2 мм/км)			
	пленка								
	призма	± (2 мм + 2 мм/км)				± (2 мм + 2 мм/км)			
Время измерения	в одиночном точном режиме	1,2 с				1,2 с			
	в непрерывном режиме								
Дальность самонаведения									
Диапазон амонаведения	горизонтально								
	вертикально								
Время самонаведения (с одной призмой, до 100 м)									
Светонавигатор									
Максимальное расстояние видимости									
Хранение и передача данных									
Внутренняя память, точек		2 Мб + 64 Мб SDRAM				8000 точек			
Дополнительная память		карта памяти CF (> 1 млн. точек)							
Общие характеристики									
Внутренний аккумулятор						BT-52QA			
время работы при +25 °C						2,4–45 часов			
время зарядки						1,8 часа			
Внешний аккумулятор									
время работы при +25 °C									
Диапазон рабочих температур		от –20 °C до +50 °C				от –20 °C до +50 °C			
Пыле- и влагозащищенность		IP64				IP64			
Габаритные размеры, мм						336x184x174			
Вес (с трегером, ручкой и аккумулятором), кг						5,1 кг			

Серия		Topcon GPT-720				Topcon GPT-230			
Модель		GPT-721	GPT-722	GPT-723	GPT-725	GPT-233	GPT-235	GPT-236	GPT-239
Зрительная труба									
Увеличение		30x				30x			
Минимальное расстояние фокусирования		1,3 м							
Угловые измерения									
Минимальная цена деления отсчета		1"				1"			
Точность (СКО)		1"	2"	3"	5"	3"	5"	6"	9"
Диапазон измерения вертикального угла									
Компенсатор		двухосевой, ±4'				двухосевой, ±3', одноосевой, ±3' для 239			
Измерение расстояний									
Мощность излучения (макс.)	без отражателя								
	режим пленки/призмы								
Диапазон измерений при хороших условиях	без отражателя								
	пленка								
	призма	3500 м			2300 м	3500 м			2300 м
	на три призмы	4700 м			3100 м	4700 м			3100 м
Точность (СКО)	без отражателя								
	пленка								
	призма	± (2 мм + 2 мм/км)				± (2 мм + 2 мм/км)/ ± (3 мм + 2 мм/км) для 239			
Время измерения	в одиночном точном режиме	1,2 с.				1,2 с.			
	в непрерывном режиме								
Дальность самонаведения									
Диапазон самонаведения	горизонтально								
	вертикально								
Время самонаведения (с одной призмой, до 100 м)									
Светонавигатор									
Максимальное расстояние видимости									
Хранение и передача данных									
Внутренняя память, точек		2 Мб + 64 Мб SDRAM				8000 точек			
Дополнительная память		карта памяти CF (> 1 млн. точек)							
Общие характеристики									
Внутренний аккумулятор		BT-61Q, 7,2 В, 4,4 Ач				BT-52Q, 7,2 В, 2,7 Ач			
время работы при +25 °С		7,5–10 часов				2,4–45 часов			
время зарядки		4 часа				1,8 часа			
Внешний аккумулятор									
время работы при +25 °С									
Диапазон рабочих температур		от –20 °С до +50 °С				от –20 °С до + 50 °С			
Пыле- и влагозащищенность		IP54				IP66			
Габаритные размеры, мм		343x245x219/199 мм				336x184x174 мм			
Вес (с трегером, ручкой и аккумулятором), кг		6,2 кг				4,9 кг			

Серия		Topcon GPT-220			
Модель		GPT-223	GPT-225	GPT-226	GPT-229
Зрительная труба					
Увеличение		30x			
Минимальное расстояние фокусирования		1,3 м			
Угловые измерения					
Минимальная цена деления отсчета		1"			
Точность (СКО)		3"	5"	6"	9"
Диапазон измерения вертикального угла					
Компенсатор		двухосевой, ±3', одноосевой, ±3' для 229			
Измерение расстояний					
Мощность излучения (макс.)	без отражателя				
	режим пленки/призмы				
Диапазон измерений при хороших условиях	без отражателя				
	пленка				
	призма	3500 м			2300 м
	на три призмы	4700 м			3100 м
Точность (СКО)	без отражателя				
	пленка				
	призма	± (2 мм + 2 мм/км), ± (3 мм + 2 мм/км) для 229			
Время измерения	в одиночном точном режиме	1,2 с.			
	в непрерывном режиме				
Дальность самонаведения					
Диапазон самонаведения	горизонтально				
	вертикально				
Время самонаведения (с одной призмой, до 100 м)					
Светонавигатор					
Максимальное расстояние видимости					
Хранение и передача данных					
Внутренняя память, точек		8000 точек			
Дополнительная память					
Общие характеристики					
Внутренний аккумулятор		BT-52Q, 7,2 В, 2,7 Ач			
время работы при +25 °С		2,4–45 часов			
время зарядки		1,8 часа			
Внешний аккумулятор					
время работы при +25 °С					
Диапазон рабочих температур		от –20 °С до + 50 °С			
Пыле- и влагозащищенность		IP66			
Габаритные размеры, мм		336x184x174 мм			
Вес (с трегером, ручкой и аккумулятором), кг		4,9 кг			

Таблица 3.1.
Технические характеристики нивелиров
Нивелиры производства КНР

Технические характеристики	AL20	AL24	AL28
Средняя квадратическая погрешность измерения превышений на 1 км двойного хода	2,5 мм	2,0 мм	1,5 мм
Наименьшее расстояние визирования, м			
Увеличение зрительной трубы Х	20	24	28
Чувствительность пузырькового уровня	8′ на 2 мм	8′ на 2 мм	8′ на 2 мм
Диапазон работы компенсатора	15′	15′	15′
Диаметр лимба, мм			
Цена деления лимба			
Масса прибора	1,8 кг	1,8 кг	1,8 кг
Гарантийный срок			

Технические характеристики	NL 20	NL 24	NL 28	NL 32	AT-20D	AT-24D
(Фирма)	(South)	(South)	(South)	(South)	(SETL)	(SETL)
Средняя квадратическая ошибка измерения превышения: на 1 км двойного хода	2,5 мм	2,0 мм	1,5 мм	1,0 мм	2,0 мм	2,0 мм
Наименьшее расстояние визирования, м	0,5	0,5	0,5	0,5		
Увеличение зрительной трубы Х	20	24	28	32	20	24
Чувствительность пузырькового уровня	8′ на 2 мм	8′ на 2 мм	8′ на 2 мм	8′ на 2 мм	8′ на 2 мм	8′ на 2 мм
Диапазон работы компенсатора	15′	15′	15′	15′	15′	15′
Диаметр лимба, мм						
Цена деления лимба						
Масса прибора	1,6кг	1,6кг	1,6кг	1,6кг	1,2 кг	1,2 кг
Гарантийный срок						

Нивелиры производства фирмы Sokkia (Япония)

Технические характеристики	B1	B1C	B20	B21	C300	C310	C320	C330	C410
Средняя квадратическая погрешность измерения превышений на 1 км двойного хода:									
Без микрометренной насадки, мм	0,8	0,8	1,0	1,5	2	2	2	2	2,5
С микрометром-насадкой, мм	0,5	0,5	0,8	1,2					
Наименьшее расстояние визирования, м									
Увеличение зрительной трубы X^x	32	32	32	30	26	26	24	22	20
Рабочий диапазон работы компенсатора, угл. мин.	±10	±10	±15	±15	±15	±15	±15	±15	±12
Диаметр лимба, мм									
Цена деления лимба									
Вес, кг	3,0	3,2	1,85	1,85	1,83	1,83	1,80	1,80	1,0
Размер, мм	270 x 144 x 163		130 x 215 x 135		133 x 215 x 135				190 x 122 x 115
Гарантийный срок	25 лет								5 лет

Нивелиры производства фирмы Topcon (Япония)

	AT-G1	AT-G2	AT-G3	AT-G4	AT-G6	AT-G7
Зрительная труба						
Длина (мм)	229		230	192	193	204
Изображение	Прямое					
Увеличение	32x		30x	26x	24x	22x
Диаметр объектива (мм)	45		40	30		
Относительная яркость	1.98		1.78	1.33	1.56	1.86
Угол поля зрения	1°20′		1°30′			
Разрешающая способность	2.5″		3.0″	3.5″	4.0″	
Наименьшее расстояние фокусирования (м)	1.0		0.5			0.9
Коэффициент нитяного дальномера	100					
Чувствительность круглого уровня (′/2 мм)	8					10
Точность компенсатора	±0.3″					±0.5″
Диапазон работы компенсатора	±15′					±10′
Точность на 1 км двойного хода без оптич. микрометра, мм/км	±0.7		±1.5	±2		±2.5
с оптич. микрометром, мм/км	±0.4		±1.0	–		
Диаметр лимба, мм	90	117				102
Цена деления	10′	1°				
Масса прибора (кг)	2.1	1.8		1.6		1.2
трансформировочного ящика (кг)	1.3					1.2

Таблица 3.7.
Технические характеристики цифровых нивелиров

Цифровые нивелиры Sokkia(Япония) и Trimble(США)

	DINI® 12	DINI® 12T	DINI® 22	SDL 30M
	Trimble, США			Sokkia, Япония
Точность				
Ошибка на 1 км двойного хода, мм				
Электронные измерения: – инварная кодовая рейка – складная кодовая рейка	0,3 1,0	0,3 1,0	0,7 1,3	0,6
Визуальные измерения: – складная рейка, метрическая оцифровка	1,5	1,5	2,0	1,5
Наименьший электронный отсчет, мм	0,001			
Диапазон измерений, м				
Электронные измерения: -инварная кодовая рейка -складная кодовая рейка	1,5–100 1,5–100			
Визуальные измерения: -складная рейка, метрическая оцифровка	от 1,3			
Точность измерения расстояний				
Тахеометрический режим: -инварная кодовая рейка -складная кодовая рейка	0,5Dx0,001м 1,0Dx0,001м			
Электронные измерения (длина плеча 20м по отрезку рейки 0,3м): -инварная кодовая рейка, (мм) -складная кодовая рейка, (мм)	20 25	20 25	25 30	20 25
Визуальные измерения, мм: -складная рейка, метрическая оцифровка	0,2	0,2	0,3	0,2
Время электронного считывания по рейке, с.	3	3	2	<3
Время угловых измерений, с.		0,3		
Увеличение зрительной трубы	32x	32x	26x	32x
Компенсатор				
Диапазон компенсации	±15′			
Точность установки	±0.2″	±0.2″	±0.5″	0,3″
Продолжительность работы, час				
Продолжительность работы с полностью заряженным аккумулятором	72	72	168	>10
Масса прибора, кг	3.1	3.6	3.0	2.8

Технические характеристики цифровых нивелиров Topcon, США

Наименование	DL-101C	DL-102C	DL-103	DL-103AF
Средняя квадратическая погрешность измерения превышения на 1 км двойного хода, мм	1,0 0,4 с инварной рейкой	1,5 1,0 с инварной рейкой	2,0 1,8 с инварной рейкой	2,0 1,8 с инварной рейкой
Диапазон измерений, м	2,0 – 100	2,0 – 100	2,0 – 60	2,0 – 60
Точность измерения расстояний, см	1–5	1–5	1–5	1–5
Диапазон работы компенсатора, Мин. (')	12	15	10	10
Продолжительность работы с полностью заряженным аккумулятором, час.	10	10	20	8
Масса прибора, кг	2,8	2,8	2,3	2,4

Таблица 3.8.
Технические характеристики лазерных нивелиров
Лазерные нивелиры Geo-Fennel (Германия):

Параметры	FL-10	FL-20	SP-30	FL-1	FL-200 VA	FL 100 HA	FL-250 A	JP-300	FL-300 A
Точность, мм/м	3 мм/ 10 м	3 мм/ 10 м	1 мм/ 10 м	5 мм/ 10 м	1,5 мм/ 10 м	1 мм/ 10 м	1,5 мм/ 10 м	1 мм/ 10 м	2,4 мм/ 10 м
Дальность действия, м: – без приемника, – приемник FR 44, – приемник FMR 700	30 100	30	30 150	30 200	30 200	30 600 650	30 250	30 150	30 300
Дальность работы с пультом, м:	–	–	–	–	50	50	50	50	50
Диапазон работы компенсатора	–	–	± 10'	± 8'	± 3,5'	± 5'	± 5'	± 5'	± 5'
Длина волны излучения, nm	635	635	635	635	635	635	635	635	635
Скорость вращения, об./мин.	–	–	300	0–600	0–600	600	0–600	0–600	0–600
Продолжительность работы, час: – обычные батарейки, – аккумуляторы	24	18	10	15	10	30 60	24	20	20
Диапазон рабочих температур, °С	–10 – +40	–10 – +40	–10 – +40	–10 – +45	–10 – +40	–20 – +50	–20 – +50	–20 – +50	–20 – +50
Масса, кг.	0,9	1,2	2,5	2,6	2	2,5	2	2,1	3,5

Лазерные нивелиры Sokkia (Япония)

Параметры	LT60R	LS101	EL400HVC	LP31AC	LP30AC	MP400C
Точность, мм/м	10 мм / 30 м	3 мм / 9м	30" или 15мм / 100 м	9" или 4,8 мм / 100м	6" или 3,4 мм / 100м	30" или 15 мм / 100м
Дальность действия по горизонтали, м: без приемника/с приемником	60/–	10/–	–/150	–/120	–/150	–/150
Дальность действия по вертикали, м:	60	10	20	–	–	–
Дальность работы с пультом, м:	–	–	–	–	50	50
Диапазон работы компенсатора	–	±5' маятни-ковый	±4,5' элект-ронный	±10' маятни-ковый	±10' маятни-ковый	±4,5' элект-ронный
Длина волны излучения, nm	635, Кл. 3R	635	635	785	785	635
Скорость вращения, об./мин.	0/80/150/600		0–600			0–600
Продолжительность работы, час.: обычные батарейки/ аккумуляторы	36/–	25/–	160/40	50/17	50/20	160/40
Диапазон рабочих температур, °С	–10 –+40	–10 –+40	–10 –+40	–10 –+45	–10 –+40	–20 –+50
Масса, кг.	0,9	1,2	2,5	2,6	2	2,5
Гарантийный срок, лет	2	1	2	2	2	2
Углы развертки, град	2/8/25					
Габаритные размеры, мм	150x100x130		150x160x170			150x160x170

Лазерные нивелиры Topcon (Япония):
а) Лазерные нивелиры для внутренних работ

Параметры	RL-VH3G	RL-VH3A	RL-VH3B	RL-VH3D
Точность, сек.	15"/10"	15"/10"	15"/10"	20"/20"
Дальность действия, м:	50	50	50	30
Длина волны излучения, nm	532 (зеленый)	635 (красный)	635 (красный)	635 (красный)
Скорость вращения, об./мин.	30–300	30–600	30–600	10–290
Диапазон рабочих температур, °С	–20 °С – +50 °С	–20 °С – +50 °С	–20 °С – +50 °С	–20 °С – +50 °С
Масса, кг.	3	3	3	2,5
Габаритные размеры, мм	214x123x260	214x123x260	194x123x260	182x167x229

б) Лазерные нивелиры для внешних работ

Параметры	RL-H1Sa	RL-H2Sa	RT-5Sa	RT-5Sb
Точность задания опорной плоскости, сек.	5″	5″	5″	5″
Дальность действия, м:	до 350	до 350	до 800	до 800
Диапазон работы компенсатора	±5є	±5є	±5є	±5є
Длина волны излучения, nm	780 (невидимый	635 (красный)	635 (красный)	635 (красный)
Скорость вращения, об/мин	300/600	300/600/900	300/600/900/1200	300/600/900/1200
Диапазон рабочих температур, °С	–20 °С – +50 °С	–20 °С – +50 °С	–20 °С – +50 °С	–20 °С – +50 °С
Масса с батареей, кг.	2,7	2,7	2,3	2,3
Габаритные размеры, мм	169x169x250	169x169x250	215x133x240	215x133x240

Лазерные нивелиры Trimble-Spectra Precision (США)

Параметры	HV601	HV602	LL200	1452CG	LL600/800
Точность, мм/м;	±1,5 мм/30 м	±1,5 мм/30 м	±2,4мм/30 м	±4,0мм/30 м	±1,6мм/30 м
мм/км	±1,7 мм/1 км	±1,7 мм/1 км	±2,6 мм/1 км	±5,0 мм/1 км	±1,7 мм/1 км
Дальность действия, м:	300	300	от 3 до 150	200	400
Дальность работы с пультом, м:	Инфракрасный пульт, до 75 м	Радиоуправление, до 150 м			
Диапазон работы компенсатора	±5′	±5′	±30′	±5′	±11′
Длина волны излучения, nm	видимый, 635	видимый, 635	инфракрасный	видимый, 670 нм	видимый, 670 нм
Мощность лазера, мВт / класс:	5/3 класс	5/3 класс	1/3 класс	1/3 класс	2/3 класс
Продолжительность работы, час.:	50 час., аккумулятор NiMH	30 час., аккумулятор NiMH	100 час., 1 батарея тип D	10 час., 4 NiCd	45 час., 4 NiCd
Диапазон рабочих температур, °С	–20°С – +50°С	–20°С – +50°С	–20°С – +50°С	–20°С – +50°С	–20°С – +50°С
Масса, кг.	3,5	3,5	менее 2,0	2,1	3,6

Таблица 4.7.
Технические характеристики ручных навигаторов Magellan

Тип приемника	Базовая карта (MB)	Детализированная карта (MB)	Компас/Барометр/ Термометр	Размер экрана, мм	Экранное разрешение, пиксел	Подключение внешней антенны
Map 330/Map 330 Marine	8	8	нет	3,8x5,4	104x160	нет
SP24 XC/SP24XC FreeFlying	нет	нет	нет	5,3x3,5	100x64	нет
eXplorist 100	нет	нет	нет	4,6x3,6	160x120	нет
eXplorist 200	да	да	нет	4,6x3,6	160x120	нет
eXplorist 300	да	да	да/да/нет	4,6x3,6	160x120	нет
SporTrak Map	2	6	нет	3,6x5,8	104x160	нет
SporTrak Map Pro	9	23	нет	3,6x5,8	104x160	нет
SporTrak Topo	8	100 Topo	нет	3,6x5,8	104x160	нет
SporTrak Color	10	22	да/да/нет	3x5,8	160x240 color	нет
Meridian Green/Yellow	2	8–512/SD	нет	1,75x2,2	120x160	нет
Meridian Gold/Marine	16	8–512/SD	нет	1,75x2,2	120x160	нет
Meridian Platinum	16	8–512/SD	да/да/да	1,75x2,2	120x160	нет
Meridian Color	16	8–512/SD	нет	1,55x2,2	120x160 цветной	да

Таблица 4.10.
Технические характеристики спутниковых геодезических приемников
Спутниковые геодезические приемники фирмы «Javad» (США)

Модель		Maxor	Prego
Антена			
Число каналов		20 GPS L1 (20 GPS L1+L2 или GPS + GLONASS L1)	20 GPS L1+L2 (20 GPS + GLONASS L1 + L2)
Усиление			
Точность позиционирования			
Статика, быстрая статистика	В плане	3 mm + 1 ppm (L1+L2) 5 mm + 1,5 ppm (L1)	3 mm + 1 ppm (L1+L2) 5 mm + 1,5 ppm (L1)
	По высоте	5 mm + 1,5 ppm (L1+L2) 6 mm + 1,5 ppm (L1)	5 mm + 1,5 ppm (L1+L2) 6 mm + 1,5 ppm (L1)
Съемка в режиме реального времени (eRTK Wide Area)	В плане	10 mm + 1,5 ppm (L1+L2) 15 mm + 2 ppm (L1)	10 mm + 1,5 ppm (L1+L2) 15 mm + 2 ppm (L1)
	По высоте	15 mm + 1,5 ppm (L1+L2) 20 mm + 2 ppm (L1)	15 mm + 1,5 ppm (L1+L2) 20 mm + 2 ppm (L1)
Кинематика	В плане		
	По высоте		
Дифференциальная съемка в кодовом режиме	В плане		
	По высоте		
Дифференциальная GPS-съемка			
Навигация (WAAS, EGNOS)			

Радиус действия RTK (рекомендуемый)			
Минимальное время инициализации			< 60 с/ < 10 с
Встроенный радиомодем		GSM (900/2,4 ГГц), радиомодем УВЧ	GSM (900/2,4 ГГц), радиомодем УВЧ
Территория покрытия RTK			
Обычная RTK с одной базовой станцией			
eRTK одной базовой станцией			
eRTK с несколькими базовыми станциями			
VRS eRTK			
Работа с данными			
Процессор			
Частота обновления и записи координат			
Объем внутренней памяти		до 1024 Мб	до 96 Мб
Объем памяти контроллера			
Интервал записи и вывода координат		до 20 раз/с (20 Гц)	до 20 раз/с (20 Гц)
Время непрерывной работы без контроллера			
Время непрерывной работы с контроллером			
Интерфейс			MINTER
Формат данных	Вход		
	Выход		
Коммуникационные порты		4 RS232	4 RS232
Общие характеристики			
Внешний источник питания (постоянный ток)		6–28 В	9–28 В
Потребляемая мощность	Приемник	3 Вт	
	Комплект		
Внутреннее питание		2 Li-Ion	Li-Ion батарея
Время работы с внутренними аккумуляторами		25 часов	25 часов
Диапазон рабочих температур		от –40 °С до +55 °С	от –10 °С до +50 °С
Пыле- и влагозащищенность			
Вибрация			
Габаритные размеры		159 x 49 x 242 мм	159 x 49 x 242 мм
Вес приемника			1,9 кг

Модель		Lexon GD	Lexon GG	Lexon GGD
Антена				
Число каналов		20 GPS L1 (20 GPS L1+L2)	20 GPS L1 (20 GPS + GLONASS)	20 GPS L1 (20 GPS + GLONASS L1+L2)
Усиление				
Точность позиционирования				
Статика, быстрая статистика	В плане	3 mm + 1 ppm (L1+L2) 5 mm + 1,5 ppm (LI)		
	По высоте	5 mm + 1.5 ppm (L1+L2) 6 mm + 1,5 ppm (LI)		
Съемка в режиме реального времени (eRTK Wide Area)	В плане	10 mm + 1,5 ppm (L1+L2) 15 mm + 2 ppm (LI)		
	По высоте	15 mm + 1,5 ppm (L1+L2) 20 mm + 2 ppm (LI)		
Кинематика	В плане			
	По высоте			
Дифференциальная съемка в кодовом режиме	В плане			
	По высоте			
Дифференциальная GPS-съемка				
Навигация (WAAS, EGNOS)				
Радиус действия RTK (рекомендуемый)				
Минимальное время инициализации		< 60 с/ < 10 с		
Встроенный радиомодем				
Территория покрытия RTK				
Обычная RTK с одной базовой станцией				
eRTK одной базовой станцией				
eRTK с несколькими базовыми станциями				
VRS eRTK				
Работа с данными				
Процессор				
Частота обновления и записи координат				
Объем внутренней памяти		до 1024 Мб		
Объем памяти контроллера				
Интервал записи и вывода координат		до 20 раз/с (20 Гц)		

Время непрерывной работы без контроллера			
Время непрерывной работы с контроллером			
Интерфейс		MINTER	
Формат данных	Вход		
	Выход		
Коммуникационные порты		4x serial (RS232), USB, Internet	
Общие характеристики			
Внешний источник питания (постоянный ток)			
Потребляемая мощность	Приемник	< 3,3 Вт	
	Комплект		
Внутреннее питание			
Время работы с внутренними аккумуляторами			
Диапазон рабочих температур		от –40 °С до +50 °С	
Пыле- и влагозащищенность			
Вибрация			
Габаритные размеры		160 x 110 x 35 мм	
Вес приемника		0,4 кг	0,6
Вес полного мобильного комплекта			

Спутниковые геодезические приемники фирмы «Thales Navigation» (США)

Модель		ProMark2	Z-Xtreme
Антена		спиральная	Geodetic IV
Число каналов		12 L1 C/A-код (10 L1 по полной фазе несущей)	24 L1 C/A-код, L1/ L2 по полной фазе несущей)
Усиление		12 дБ	38 дБ ± 3 дБ
Точность позиционирования			
Статика, быстрая статистика	В плане	5 мм + 1 мм/км	5 мм + 1,0 мм/км
	По высоте	± 10 мм + 2 мм/км	5 мм + 1,0 мм/км
Съемка в режиме реального времени (eRTK Wide Area)	В плане		10 мм + 2 мм/км
	По высоте		17 мм + 2 мм/км
Кинематика	В плане	± 12 мм + 2,5 мм/км	10 мм + 1,0 мм/км
	По высоте	± 15 мм + 2,5 мм/км	10 мм + 1,0 мм/км

Дифференциальная съемка в кодовом режиме	В плане		
	По высоте		
Дифференциальная GPS-съемка			< 1 м
Навигация (WAAS, EGNOS)		± 3–5 м	
Радиус действия RTK (рекомендуемый)			10 км
Минимальное время инициализации			2 секунды
Встроенный радиомодем			
Территория покрытия RTK			
Обычная RTK с одной базовой станцией			
eRTK одной базовой станцией			
eRTK с несколькими базовыми станциями			
VRS eRTK			
Работа с данными			
Процессор			
Частота обновления и записи координат			
Объем внутренней памяти		8 Мб	ATA 2 PCMCIA 16 Мб
Объем памяти контроллера			
Интервал записи и вывода координат		1–30 с.	0,1–999 с.
Время непрерывной работы без контроллера		14 часов (L1, 10 спутников, 2 с.)	4 суток (8 спутников, 10 с.)
Время непрерывной работы с контроллером			
Интерфейс		RS-232	
Формат данных	Вход		RTCM 2,1
	Выход		NMEA-0183, RTCM 2,1
Коммуникационные порты			4 порта RS232
Общие характеристики			
Внешний источник питания (постоянный ток)			10–20 В
Потребляемая мощность	Приемник		4,8 Вт
	Комплект		не более 60 мВт
Внутреннее питание		2 батарейки типа AA (3 В)	Li-Ion (12 В, 5400 мАч)
Время работы с внутренними аккумуляторами		> 8 часов (при t = 20 °C)	
Диапазон рабочих температур		от –10 °C до +60 °C	от –40 °C до + 65 °C

Пыле- и влагозащищенность		IPX7
Вибрация	MIL-STD 810 E	MIL-STD 810 E
Габаритные размеры	185 x 51 x 33 мм	76 x 185 x 209 мм
Вес приемника	0,64 кг	2,0
Вес полного мобильного комплекта		

Модель		Z-Max
Антена		интегрированная
Число каналов		24 L1C/A-код , L1/L2 по полной фазе несущей
Усиление		
Точность позиционирования		
Статика, быстрая статистика	В плане	5 мм + 0,5 мм/км
	По высоте	10 мм + 0,5 мм/км
Съемка в режиме реального времени (eRTK Wide Area)	В плане	10 мм + 1,0 мм/км
	По высоте	20 мм + 1,0 мм/км
Кинематика	В плане	10 мм + 1,0 мм/км
	По высоте	20 мм + 1,0 мм/км
Дифференциальная съемка в кодовом режиме	В плане	
	По высоте	
Дифференциальная GPS-съемка		< 0,8 м
Навигация (WAAS, EGNOS)		
Радиус действия RTK (рекомендуемый)		1250 км^2
Минимальное время инициализации		2 секунды до 20 км
Встроенный радиомодем		
Территория покрытия RTK		
Обычная RTK с одной базовой станцией		
eRTK одной базовой станцией		
eRTK с несколькими базовыми станциями		
VRS eRTK		
Работа с данными		
Процессор		
Частота обновления и записи координат		
Объем внутренней памяти		SANDISK SD 64/128 Мб
Объем памяти контроллера		

Интервал записи и вывода координат		0,1—30 с.
Время непрерывной работы без контроллера		48 часов (L1/L2 GPS, 1 с., 64 Мб)
Время непрерывной работы с контроллером		
Интерфейс		
Формат данных	Вход	RTCM, DBEN, CMR, LRK
	Выход	NMEA
Коммуникационные порты		Bluetooth, RS232
Общие характеристики		
Внешний источник питания (постоянный ток)		9—24 В
Потребляемая мощность	Приемник	4,5 Вт
	Комплект	
Внутреннее питание		Li-Ion (MAX-RUN, MAX-LITE)
Время работы с внутренними аккумуляторами		7—14 часов (при t = 0 °С)
Диапазон рабочих температур		от –30 °С до +65 °С
Пыле- и влагозащищенность		
Вибрация		MIL-STD 810F
Габаритные размеры		76 x 185 x 209 мм
Вес приемника		1,4 кг
Вес полного мобильного комплекта		

Спутниковые геодезические приемники фирмы «Topcon» (Япония)

Модель		HiPer	HiPer GGD	HiPer +	HiPer Lite +
Антена					
Число каналов		40 L1 GPS (20 GPS L1/L2), (L1 Glonass, L1/L2/Glonass опционально)			
Усиление					
Точность позиционирования					
Статика, быстрая статистика	В плане	3 мм + 1 мм/км (L1+L2) 5 мм + 1,5 мм/км (L1)			
	По высоте				
Съемка в режиме реального времени (eRTK Wide Area)	В плане	10 мм + 1,5 мм/км (L1+L2) 15 мм + 2 мм/км (L1)			
	По высоте				
Кинематика	В плане				
	По высоте				

Дифференциальная съемка в кодовом режиме	В плане				
	По высоте				
Дифференциальная GPS-съемка					
Навигация (WAAS, EGNOS)					
Радиус действия RTK (рекомендуемый)					
Минимальное время инициализации		< 60 с/ < 10 с			
Встроенный радиомодем					
Территория покрытия RTK					
Обычная RTK с одной базовой станцией					
eRTK одной базовой станцией					
eRTK с несколькими базовыми станциями					
VRS eRTK					
Работа с данными					
Процессор					
Частота обновления и записи координат					
Объем внутренней памяти		до 96 Мб	до 96 Мб	до 1000 Мб	до 1000 Мб
Объем памяти контроллера					
Интервал записи и вывода координат		до 20 раз/с (20 Гц)			
Время непрерывной работы без контроллера					
Время непрерывной работы с контроллером					
Интерфейс		MINTER			
Формат данных	Вход				
	Выход				
Коммуникационные порты		4 RS-232			
Общие характеристики					
Внешний источник питания (постоянный ток)		6–28 Вт			
Потребляемая мощность	Приемник	< 3,0 Вт	< 4,2 Вт		
	Комплект				
Внутреннее питание		Li-Ion батареи			

Время работы с внутренними аккумуляторами			
Диапазон рабочих температур	от –40 °С до +55 °С	от –30 °С до + 60 °С	от –30 °С до +55 °С
Пыле- и влагозащищенность			
Вибрация			
Габаритные размеры			
Вес приемника	1,65		
Вес полного мобильного комплекта			

Модель		Odyssey-E	GB 500	GB 1000
Антена				
Число каналов		40 L1 GPS (20 GPS L1/L2), (L1 Glonass, L1/L2/Glonass опционально)	40 L1 GPS (20 GPS L1+L2 в дни Cinderella), (20 GPS L1+ L2, ГЛОНАСС опционально)	
Усиление				
Точность позиционирования				
Статика, быстрая статистика	В плане	3 mm + 1 ppm (L1+L2) 5 mm + 1,5 ppm (L1)	3 мм + 1 мм/км (L1+L2) 5 мм + 1,5 мм/км (L1)	
	По высоте	5 mm + 1 ppm (L1+L2) 6 mm + 1,5 ppm (L1)	5 мм + 1,5 мм/км (L1+L2) 6 мм + 1,5 мм/км (L1)	
Съемка в режиме реального времени (eRTK Wide Area)	В плане	10 mm + 1 ppm (L1+L2) 15 mm + 2 ppm (L1)		
	По высоте	15 mm + 1,5 ppm (L1+L2) 20 mm + 2 ppm (L1)		
Кинематика	В плане			
	По высоте			
Дифференциальная съемка в кодовом режиме	В плане			
	По высоте			
Дифференциальная GPS-съемка				
Навигация (WAAS, EGNOS)				
Радиус действия RTK (рекомендуемый)				
Минимальное время инициализации		< 60 с/ < 10 с	< 60 с/ < 10 с	
Встроенный радиомодем				
Территория покрытия RTK				
Обычная RTK с одной базовой станцией				

eRTK одной базовой станцией				
eRTK с несколькими базовыми станциями				
VRS eRTK				
Работа с данными				
Процессор				
Частота обновления и записи координат				
Объем внутренней памяти		до 96 Мб	Compact Flash до 1024 Мб	
Объем памяти контроллера				
Интервал записи и вывода координат		до 20 раз/с (20 Гц)	до 20 раз/с (20 Гц)	
Время непрерывной работы без контроллера				
Время непрерывной работы с контроллером				
Интерфейс		MINTER		
Формат данных	Вход			
	Выход			
Коммуникационные порты		4 RS-232	1 USB, 3 serial	1 USB, 3 serial, 1 Internet
Общие характеристики				
Внешний источник питания (постоянный ток)		6-28 Вт		
Потребляемая мощность	Приемник	< 4,3 Вт		
	Комплект			
Внутреннее питание		Li-Ion батарея	2 Li-Ion батареи	
Время работы с внутренними аккумуляторами				
Диапазон рабочих температур		от –10 °С до +50 °С	от –30 °С до +55 °С	от –20 °С до +55 °С
Пыле- и влагозащищенность			IP66	
Вибрация				
Габаритные размеры			150 x 257 x 63 мм	
Вес приемника		1,9 кг	1,2 кг	
Вес полного мобильного комплекта				

Спутниковые геодезические приемники фирмы «Trimble Navigation» (США)

Модель		NetRS	Trimble 4600 LS
Антена		Zephyr Geodetic, Choke Ring	интегрированная
Число каналов		24 L1/ C/A-код, L2C код, L1/L2 по полной фазе несущей, 3 WAAS/ EGNOS	12 каналов L1 по полной фазе несущей C/A-код
Усиление			
Точность позиционирования			
Статика, быстрая статистика	В плане	5 мм + 1,0 мм/км	5 мм + 1 мм/км 5 мм + 2 мм/км
	По высоте	10 мм + 1,0 мм/км	10 мм + 2,0 мм/км
Съемка в режиме реального времени (eRTK Wide Area)	В плане		
	По высоте		
Кинематика	В плане		± 10 мм + 1,0 мм/км
	По высоте		± 20 мм + 2,0 мм/км
Дифференциальная съемка в кодовом режиме	В плане		
	По высоте		
Дифференциальная GPS-съемка			< ± 1 м
Навигация (WAAS, EGNOS)			
Радиус действия RTK (рекомендуемый)			10 км
Минимальное время инициализации			
Встроенный радиомодем			
Территория покрытия RTK			
Обычная RTK с одной базовой станцией			
eRTK одной базовой станцией			
eRTK с несколькими базовыми станциями			
VRS eRTK			
Работа с данными			
Процессор		Maxwell 5	
Частота обновления и записи координат		1/2/5/10 Гц	1 Гц
Объем внутренней памяти		150 Мб	1 Мб
Объем памяти контроллера			
Интервал записи и вывода координат			
Время непрерывной работы без контроллера			

Время непрерывной работы с контроллером			
Интерфейс			
Формат данных	Вход	RT 17	RTCM SC-104
	Выход	RTCM 2,1, 2,3, CMR	NMEA-0183
Коммуникационные порты		1 – LAN, 1 – RJ45, 4 – RS232	2 RS232
Общие характеристики			
Внешний источник питания (постоянный ток)		11–28 В	5 В
Потребляемая мощность	Приемник	< 3 Вт	< 1 Вт
	Комплект	3,5–4,0 Вт	
Внутреннее питание			4 батарейки типа «С»
Время работы с внутренними аккумуляторами			> 32 часов (при t = 20° С)
Диапазон рабочих температур		от –40 °С до + 65 °С	от –40 °С до + 65 °С
Пыле- и влагозащищенность		IPX5	IPX7
Вибрация			
Габаритные размеры		228 x 65 x 140 мм	221 x 118 мм
Вес приемника		1,6 кг	1,7 кг
Вес полного мобильного комплекта			

Модель		Trimble 5800	R8
Антена		интегрированная	интегрированная
Число каналов		24 канала L1/ C/A-код, L1/L2 по полной фазе несущей	24 L1 C/A-код, L2C1, полной фазы несущей L1/L2, WAAS/EGNOS
Усиление			
Точность позиционирования			
Статика, быстрая статистика	В плане	5 мм + 0,5 мм/км	5 мм + 0,5 мм/км
	По высоте	5 мм + 1,0 мм/км	± 5 мм + 1,0 мм/км
Съемка в режиме реального времени (eRTK Wide Area)	В плане	10 мм + 1 мм/км	
	По высоте	20 мм + 2 мм/км	
Кинематика	В плане		± 10 мм + 1 мм/км
	По высоте		± 20 мм + 2 мм/км
Дифференциальная съемка в кодовом режиме	В плане	± 0,25 м + 1 мм/км	± 0,25 м + 1 мм/км
	По высоте	± 0,50 м + 1 мм/км	± 0,50 м + 1 мм/км
Дифференциальная GPS-съемка		< 5 м 3DRMS	< 5 м 3DRMS

Навигация (WAAS, EGNOS)			
Радиус действия RTK (рекомендуемый)			
Минимальное время инициализации			10 с + 0,5 x L км (до 30 км)
Встроенный радиомодем			GSM модуль (класс 10)
Территория покрытия RTK			
Обычная RTK с одной базовой станцией		до 300 кв.км	
eRTK одной базовой станцией		до 1250 кв.км	
eRTK с несколькими базовыми станциями		до 3750 кв.км	
VRS eRTK		более 8500 кв.км	
Работа с данными			
Процессор			Maxwell Custom Survey
Частота обновления и записи координат		1/2/5/10 Гц	1/2/5/10 Гц
Объем внутренней памяти			6 Мб
Объем памяти контроллера		ACU, 128 Мб	ACU, 128 Мб
Интервал записи и вывода координат			
Время непрерывной работы без контроллера			55 часов (6 спутников, 15 с.)
Время непрерывной работы с контроллером		3400 часов (L1/L2 GPS, 6 спутников, 15 с.)	3400 часов (6 спутников, 15 с.)
Интерфейс			
Формат данных	Вход	CMR II, CMR+, RTCM 2,1, RTCM 2,3	CMR II, CMR+, RTCM 2,1; 2,3; 3,0 SAPOS FKP
	Выход	NMEA	NMEA
Коммуникационные порты			Bluetooth, RS-232
Общие характеристики			
Внешний источник питания (постоянный ток)		11–28 В	11–28 В
Потребляемая мощность	Приемник	2,5 Вт (режим RTK, радиомодем)	2,5 Вт (режим RTK)
	Комплект	3,5–4,0 Вт	
Внутреннее питание		2 Li-Ion (7,4 В)	2 Li-Ion (7,4 В)
Время работы с внутренними аккумуляторами		5,5 часов в режиме RTK	3,8 часа
Диапазон рабочих температур		от –40 °С до + 65 °С	от –40 °С до + 65 °С
Пыле- и влагозащищенность		IPX7	IPX7
Вибрация			MIL-STD-810F

Габаритные размеры	190 x 100 мм	190 x 100 мм
Вес приемника	1,21 кг	1,31 кг
Вес полного мобильного комплекта	3,57 кг	3,67 кг

Модель		Trimble 5700 L1	R7
Антена		Zephyr Geodetic, Zephyr	Zephyr Geodetic, Zephyr
Число каналов		24 L1/ C/A-код, L1/L2 по полной фазе несущей, WAAS/EGNOS	24 L1 C/A-код, L2C8, полной фазы несущей L1/L2, WAAS/EGNOS
Усиление			
Точность позиционирования			
Статика, быстрая статистика	В плане	5 мм + 0,5 мм/км	5 мм + 0,5 мм/км
	По высоте	5 мм + 2,0 мм/км	± 5 мм + 1,0 мм/км
Съемка в режиме реального времени (eRTK Wide Area)	В плане	10 мм + 1 мм/км	10 мм + 1 мм/км
	По высоте	20 мм + 2 мм/км	20 мм + 2 мм/км
Кинематика	В плане		
	По высоте		
Дифференциальная съемка в кодовом режиме	В плане	0,25 м + 1 мм/км	0,25 м + 1 мм/км
	По высоте	0,50 м + 1 мм/км	0,50 м + 1 мм/км
Дифференциальная GPS-съемка			< 5 м 3CKO
Навигация (WAAS, EGNOS)			
Радиус действия RTK (рекомендуемый)			
Минимальное время инициализации		10 с + 0,5 с/км (до 30 км с RTK)	
Встроенный радиомодем			
Территория покрытия RTK			
Обычная RTK с одной базовой станцией		до 300 кв.км	
eRTK одной базовой станцией		до 1250 кв.км	
eRTK с несколькими базовыми станциями		до 3750 кв.км	
VRS eRTK		более 8500 кв.км	
Работа с данными			
Процессор		Trimble Maxwell 4 ASIC	Maxwell 5 Custom Survey
Частота обновления и записи координат		1/2/5/10 Гц	1/2/5/10 Гц
Объем внутренней памяти		Compact Flash 48/96 Мб	Compact Flash 64/128 Мб

Объем памяти контроллера		ACU, 128 Мб	ACU, 128 Мб
Интервал записи и вывода координат			
Время непрерывной работы без контроллера		2500 часов (L1/L2, GPS, 6 спутников, 15 с., 96 Мб)	3400 часов (L1+L2, 6 спутников, 15 с., 128 Мб)
Время непрерывной работы с контроллером			
Интерфейс			
Формат данных	Вход	CMR II, CMR+, RTCM 2,1	CMR II, CMR+, RTCM 2,1
	Выход	NMEA	NMEA
Коммуникационные порты			USB
Общие характеристики			
Внешний источник питания (постоянный ток)		10,5–28 В	10,5–28 В
Потребляемая мощность	Приемник	2,5 Вт	2,5 Вт
	Комплект	3,75 Вт	3,75 Вт
Внутреннее питание		2 Li-Ion (7,4 В)	2 Li-Ion, 1,8 Ач
Время работы с внутренними аккумуляторами		7–10 часов	7–10 часов
Диапазон рабочих температур		от –40 °С до + 65 °С	от –40 °С до + 65 °С
Пыле- и влагозащищенность		IPX7	IPX7
Вибрация			MIL-STD-810F
Габаритные размеры		230 x 130 x 80 мм	135 x 85 x 24 мм
Вес приемника		1,4 кг	1,4 кг
Вес полного мобильного комплекта		4 кг	4 кг

Таблица 5.5.
Технические характеристики уклонофиксаторов, используемых при укладке труб

Фирма производитель	Leica		Quante		Sokkia
Модель	6790	6770	QL 150 D	QL 150 HD	PL100
Длина волны излучения, nm	532	635	635	635	635
Максимальная мощность, mW		5	5	5	5
Класс лазера	IIIa / 3R	IIIa / 3R	II / 2M	IIIa / 3R	IIIa / 3R
Дальность действия, м	200	200	200	300	200
Автоматический поиск цели	есть	есть	есть	есть	есть
Диапазон работы компенсатора	± 10 %	± 10 %	–15 % до 35 %	–15 % до 35 %	± 10 %
Установка уклона	от –15 % до 50 %	от –15 % до 50 %	от –10 % до 30 %	от –10 % до 30 %	от –10 % до 40 %
Шаг установки уклона	нет данных	нет данных	0,002 %	0,002 %	0,002 %

ЛИТЕРАТУРА

1. *Акимов А.А., Кузьмин Г.В.* Исследование перспективы применения навигационных спутниковых терминалов для проведения высокоточных измерений на пересеченной местности и в городских условиях // Радиотехника. 1996. № 11. С. 124–125.
2. *Алексашин Е.П., Ширенин А.М.* Метод и алгоритмы определения параметров преобразования между различными системами координат применительно к задачам обработки спутниковых измерений // Геодезия и картография. 2002. № 6. С. 4–26.
3. *Алексашин Е.П., Ширенин А.М.* Алгоритм и программы расчета матриц преобразования координат // Реф. сб. тр. ЦНИИГАиК. 1976. № 46. С. 27–23.
4. *Алексашин Е.П., Ширенин А.М.* Алгоритм определения параметров преобразований между двумя системами прямоугольных координат и согласования координат одноименных физических точек, заданных своими векторами положения в этих системах // Международная научно-техническая конференция, посвященная 220-летию со дня основания Московского государственного университета геодезии и картографии. Тез. докл. 1999. С. 16–17.
5. *Алексеев А.В., Кабанов М.В., Куштин И.Ф.* Оптическая рефракция в атмосфере (наклонные трассы) // Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1988.
6. *Алексеев А.В., Кабанов М.В., Куштин М.Ф.* Оптическая рефракция в земной атмосфере (горизонтальные трассы) // Новосибирск, 1985.
7. Ангелова А.Н., Дементьев В.Е., Ранов И.И. Исследование точности ориентирования земснаряда с помощью лазера // Применение газовых лазеров в геодезии. Серия I. «Электроника СВЧ». ЦНИИ «Электроника». М., 1972. Выпуск 1(1) 7.
8. *Андреев Г.А., Кузнецов В.М., Цейтлин В.Э.* Размывание изображений в приземном слое атмосферы из-за флуктуаций угла прихода // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 7. 1971. С. 987–990.
9. *Андрианов В.А.* Распространение радиоволн в пограничном слое атмосферы // Радиотехника. Итоги науки и техники. Т. 44. М.: ВИНИТИ, 1994. С. 3–80; ЦНИИ «Электроника». М., 1972.
10. *Андрианов В.А., Горобец В.П., Кораблев Е.В., Смирнов В.М.* Методы коррекции атмосферной рефракции в космической геодезии и навигации // Геодезия и картография. 1993. № 12. С. 20–24.
11. *Антокольский Л.М., Пронин С.В., Шахов М.Н.* Разработка гидроакустического комплекса для обследования акваторий на основе гидролокатора бокового обзора // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 2. С. 323.
12. *Ацуковский В.А.* Общая эфиродинамика. Энергоатомиздат. 1990.
13. *Базлов Ю.А., Максимов В.Г., Рогозин В.П.* Определение точных эфемерид К.А. ГЛОНАСС в системе координат ПЗ-90 // Геодезия и картография. 2000. С. 16–17.

14. *Безматерных М.В., Буюкян С.П.* Цифровой видеоавтоколлиматор // Труды Международной научно-технической конференции, посвященной 225-летию МИИГАиК. Москва, 25–27 мая, 2004. С. 254–256.
15. *Безматерных М.В., Буюкян С.П.* Цифровой видеоавтоколлиматор // Труды Международной научно-технической конференции, посвященной 225-летию МИИГАиК. Москва, 25–27 мая, 2004. С. 254.
16. *Бин Б.П., Даттон Е.Д.* Радиометеорология. Л., 1971.
17. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970.
18. *Бурый А., Лада Клокова Л.* Сейсмоопасный бизнес. ЗАО «Независимое нефтяное обозрение "СКВАЖИНА"» (С) – skv@nefte.ru, 1999.
19. *Бутиков Е.И.* Оптика. М.: Высшая школа, 1986.
20. *Буюкян С.П., Рязанцев Г.Е.* Отсчетное устройство гидростатического нивелира. Патент РФ №2112922. Бюл. № 16. 1998.
21. *Буюкян С.П.* Видеоизмерение в инженерной геодезии // Известия вузов. Серия «Геодезия и аэрофотосъемка». № 6. 2002. С. 52–54.
22. *Буюкян С.П., Рязанцев Г.Е.* Отсчетное устройство гидростатического нивелира. Патент РФ №2112922. Бюлл. № 16. 1998.
23. *Буюкян С.П., Рязанцев Г.Е.* Инструментальный мониторинг объектов на основе видеоизмерений // www.videoscan.ru.
24. *Буюкян С.П., Рязанцев Г.Е.* Уровнемер. Патент РФ №2160430. Бюл. № 34. 2000.
25. *Буюкян С.П., Рязанцев Г.Е., Жидков А.А., Надолинец Л.Д.* Методы и средства автоматизации инструментального геомониторинга при строительстве и эксплуатации подземных сооружений // Геодезист. № 3. 2002.
26. *Буюкян С.П., Рязанцев Г.Е.* Методы и средства автоматизированного инструментального мониторинга при строительстве и эксплуатации тоннелей // Труды международной научно-практической конференции «Тоннельное строительство России и стран СНГ в начале века: опыт и перспективы». Москва, 28–31 октября 2002. С. 507.
27. *Буюкян С.П., Гинце А.С., Шекшня В.В., Колесников А.А., Рубинчик Э.Б., Никоноров В.Б., Рязанцев Г.Е.* Устройство автоматического контроля положения проходческого комплекса. Патент РФ № 21947616. Бюл. № 3. 2003.
28. *Буюкян С.П., Безматерных М.В., Бодунков П.В., Никитин П.А.* Автоматизация измерений планового положения струны обратного отвеса // Труды Международной научно-технической конференции, посвященной 225-летию МИИГАиК. Москва, 25–27 мая 2004. С. 251.
29. *Ванин С.А.* Кинематика в реальном времени с использованием услуги передачи дифференциальных поправок через GSM-сетию // НПП «Навгеоком», 2004.
30. *Васютинский И.Ю.* Гидростатическое нивелирование. М.: Недра, 1976.
31. *Величко В.А., Дементьев В.Е., Коротков С.А., Федоров А.С.* Автоматическое нивелирование с помощью лазера // Автомобильные дороги. 1970. № 7. С. 24–25.
32. *Визиров Ю.В.* Электронная съемка и обследование геометрии тоннеля // Геодезия и картография. 1999. № 10. С. 20–25.

33. *Виноградов В.В., Сухов Г.Н., Медовиков А.С., Шарапов В.В.* Определение рефракции при геодезическом нивелировании по размытию изображения регулярных структур // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1985. № 3. С. 15–18.
34. *Виноградов В.В., Локотко М.И.* Исследования рефракции на Камчатке // Геодезия и картография. № 6. 1988. С. 18–20.
35. *Виноградов В.В.* Об определении вертикальной рефракции // Геодезия и картография. 1986. № 7. С. 18–20.
36. *Виноградов В.В., Сухов Г.Н., Медовиков А.С., Шарапов В.В.* Определение рефракции по размытию изображения параллельной миры // Геодезия и картография. 1986. № 10. С. 23–25.
37. *Воловов В.И.* О комплексном подходе к решению навигационных и океанологических задач с использованием отраженных от дна сигналов // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 1. С. 142–144.
38. *Воронков Н.Н., Галазин В.Ф., Герасимов А.П., Масленников А.С.* К вопросу о переходе на автономные спутниковые методы определения координат // Геодезия и картография. 1997. № 5. С. 15–19.
39. *Генике А.А., Ларин Б.А., Назаров В.М.* Геодезические фазовые дальномеры. М.: Недра, 1974.
40. *Генике А.А., Побединский Г.Г.* Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применение в геодезии. М.: КГЦ, Геоиздат, 1999.
41. Гидролокатор бокового обзора Гео-СМ. Руководство пользователя. Центр «Геоматика». М., 2003.
42. ГКИНП 04-252-01. Инструкция по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России. Требования к высокоточным сетям. Абсолютные измерения ускорения силы тяжести баллистическими гравиметрами. М.: ЦНИИГАиК.
43. *Гордеев Е.И., Левин В.Е., Бахтияров В.Ф., Гусев А.А., Павлов В.М., Чебров В.Н., Касахара М.* Предварительный анализ перемещений станций GPS на Камчатке: скорости плит и геодезический предвестник землетрясения // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский, 2001.
44. Гост 10529-96. Теодолиты. Общие технические условия. Международный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск.
45. Гришаев А.А. О всемирном тяготении: все ли вещество оказывает притягивающее действие // Институт метрологии времени и пространства. Исследования в области измерений времени и частоты. ГП ВНИИФТРИ. Сб. научных трудов. М., 1990. С. 94–97.
46. *Гурвич А.С. Каллистратова М.А., Тиме Н.С.* Флуктуации световой волны от лазера при распространении в атмосфере // Изв. вузов СССР. – Серия «Радиофизика». 1968. Т. XI. № 9. С. 1360.
47. Гурвич А.С. Миронов В.Л. Оптические измерения параметров оптической турбулентности // Распространение оптических волн в неоднородных средах. Томск, 1976 .
48. *Гурвич А.С., Кон А.С., Миронов В.И., Хмелевцов С.С.* Лазерное излучение в турбулентной атмосфере / Под ред. В.И. Татарского. М., 1976.

49. *Гурвич А.С., Грачева М.Е.* Простая модель для расчета турбулентных помех в оптических системах // Известия АН СССР. Серия «Физика атмосферы и океана». 1980. Т. 16. № 10. С. 1107–1111.
50. *Гурвич А.С.* Известия АН СССР. Серия «Физика атмосферы и океана». 1968. № 2. С. 160–169.
51. *Гуфельд И.Л., Гусев Г.А., Похотелов О.А.* Прогноз даты сильных коровых землетрясений // Доклады РАН. 1992. Т. 338. № 6.
52. *Дементьев В.Е.* О применении лазеров для автоматизации угловых и линейных измерений // Геодезия и картография. 1974. № 1. С. 20–22.
53. *Дементьев В.Е.* Устройство для съемки местности. Патент на изобретение № 766226 от 3.10.78.
54. *Дементьев В.Е.* Измерительное геодезическое устройство. Патент на изобретение № 433 844 от 19.05.72.
55. *Дементьев В.Е.* Лазерный теодолит. Патент на изобретение № 680394 от 21.04.79.
56. *Дементьев В.Е., Фостиков А.А.* Использование GPS-аппаратуры при аэрофотосъемке // Геодезия и картография. 1997. № 4. С. 30–34.
57. *Дементьев В.Е.* Устройство для измерения смещения контролируемых точек по двум взаи мноперпендикулярным направлениям. Патент РФ № 331250 от 13.12.71.
58. *Дементьев В.Е.* Способ определения вертикальной рефракции. Заявка на изобретение № 1466296/18–10 от 10.08.70 .
59. *Дементьев В.Е.* Способ определения вертикальной рефракции. Заявка на изобретение № 1466297/18–10 от 10.08.70.
60. *Дементьев В.Е.* Способ определения вертикальной рефракции. Заявка на изобретение № 1466298/18–10 от 10.08.70.
61. *Дементьев В.Е.* Способ определения вертикальной рефракции. Заявка на изобретение № 1466299/18–10 от 10.08.70.
62. *Дементьев В.Е.* Способ определения вертикальной рефракции. Заявка на изобретение № 1466300/18–10 от 10.08.70.
63. *Дементьев В.Е.* Способ определения вертикальной рефракции. Заявка на изобретение № 1466301/18–10 от 10.08.70.
64. *Дементьев В.Е.* Об определении вертикальной рефракции // Изв. вузов. Серия «Геодезия и аэрофотосъемка». 1973. № 5. С. 29–31.
65. *Дементьев В.Е.* Способ учета погрешности за вертикальную рефракцию при угловых измерениях. Авторское свидетельство СССР № 700 026. Заявлено 23.05.77. Опубликовано 27.07.79.
66. *Дементьев В.Е.* Определение вертикальной рефракции по флуктуациям угла прихода светового пучка // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 4. С. 786–796.
67. *Дементьев В.Е.* Динамическое определение вертикальной рефракции // Тезисы докладов всесоюзного научно-практического совещания по проблемам совершенствования аппаратурных средств и таблиц для определения рефракции электромагнитных волн в атмосфере. Иркутск, 1984. С. 36.

68. *Дементьев В.Е.* Определение вертикальной рефракции путем измерения статистических характеристик светового пучка // Исследования по прикладной геодезии. Львов, 1988. № 1. С. 44–51.
69. *Дементьев В.Е.* О возможности применения лазерного сканирующего теодолита для определения вертикальной рефракции // Известия АНТ. Серия «Физико-техническая». 1988. № 6.
70. *Дементьев В.Е., Круглов Ю.С., Лежнев Н.Б., Морозов А.В, Сеидов А., Сосин О.М.* Измерение углов прихода пучка лазерного излучения с помощью лазерного сканирующего теодолита для определения вертикальной рефракции // Известия АНТ. Серия «Физико-техническая». 1989. №5.
71. *Дементьев В.Е., Лежнев Н.Б., Муратов Б.М.* Определение вертикальной рефракции по размытию изображения регулярных структур и амплитуде колебаний изображения // Известия АНТ. Серия «Физико-техническая». 1991. № 3.
72. *Дементьев В.Е., Лежнев Н.Б., Муратов Б.М.* Определение структурной характеристики показателя преломления различными методами на трассах различной протяженности // Известия АНТ. Серия «Физико-техническая». 1992. № 3.
73. *Дементьев В.Е.* Оценка ошибок, вызываемых дискретностью измерений // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1987. № 46. С. 23–28.
74. *Джуман Б.М.* Определение структурной характеристики флуктуаций показателя преломления по дрожанию изображения на конечных точках трассы в приземном слое атмосферы // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. Львов, 1988. № 48. С. 13–17.
75. *Джуман Б.М.* Зависимость амплитуды колебаний изображений от высоты визирного луча // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. Львов, 1983. №38.
76. *Джуман Б.М.* Редуцирование зенитных расстояний на период спокойных изображений по вертикальным колебаниям изображений визирных целей // В сб.: Геодезия, картография и аэрофотосъемка. Львов, 1978. Вып. 28. С. 17–28.
77. *Джуман Б.М., Павлив П.В., Стащишин И.И.* Метод определения нивелирной рефракции по колебаниям изображений // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1979. Вып. 30. С. 66–69.
78. *Жуков Б.Н.* Влияние температуры на точность измерений превышений гидростатическими нивелирами // Геодезия и картография. 1998. № 7. С. 18–20.
79. *Зуев В.В.* Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981.
80. *Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В.* Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1983.
81. *Изотов А.А., Пеллинен Л.П.* Исследование земной рефракции и методов геодезического нивелирования // Труды ЦНИИГАиК, 1952. Вып. 102.
82. *Иордан В., Эггерт О., Кнейсль Н.* Руководство по геодезии. М.: Недра, 1962.
83. *Ищенко Е.Ф., Климков Ю.М.* Оптические квантовые генераторы. М.: Советское радио, 1968.

84. *Каевицер В.И., Назаров Л.Е., Смольянинов В.М., Смольянинов И.В.* Алгоритм оценивания фазовых приращений // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40. № 1. С. 6–11.

85. *Каллистратова А.М, Покасов В.В.* Изв. вузов. Серия «Радиофизика». 1971, 14. № 8. С. 1200.

86. *Караванов М., Малибашев Б.* Кинематика в Реальном Времени – без использования радиомодемов и разрешений (или наш опыт RTK-наблюдений с использованием сотовых телефонов с технологией GPRS для передачи данных // Геопрофи. 2004. № 1.

87. *Карпик А.П., Скришиков В.А. Жуков Б.Н.* Применение спутниковых геодезических приемников для наблюдения за горизонтальными смещениями ГЭС // Сибирская Государственная геодезическая академия. УДК 528.4:629.783 // http://newfiz.i-connect.com.

88. *Кашников.Ю.А., Ашихмин О.Г., Одинцов С.Л., Постнов А.В.* Техногенные геодинамические процессы при разработке АГКМ // Газовая промышленность. 2002. №1. С. 81–83.

89. *Кашников.Ю.А., Ашихмин О.Г., Шабаров А.Н, Одинцов С.Л., Постнов А.В.* Основные положения концепции геодинамической и механической безопасности освоения АГКМ // Маркшейдерский вестник. 2003. № 2. С.13–17

90. *Кашников.Ю.А., Ашихмин О.Г., Одинцов С.Л., Постнов А.В.* Предварительный прогноз и контроль геодинамических процессов при разработке АГКМ // В сб.: «Геодинамическая и экологическая безопасность при освоении месторождений газа, его транспортировке и хранении». Санкт-Петербург, 2001. С. 79–86.

91. *Кашников.Ю.А., Маврычев Г.В., Одинцов С.Л., Постнов А.В.* Предварительная оценка возможности возникновения геодинамических процессов при разработке Астраханского газоконденсатного месторождения. УДК 528,481:629,783.

92. *Колосницин Н.И., Синенко Л.А., Юношев Л.С.* Оценка сезонных деформаций земной коры с учетом их влияний на определение параметров вращения Земли // Измерительная техника. 1994. № 3. С. 5–7.

93. *Колосницин Н.И., Синенко Л.А., Юношев Л.С.* Вертикальные смещения пункта Менделеево в результате атмосферных прогибов земной коры // Измерительная техника. 1994. № 5. С. 5–6.

94. *Колосницин Н.И., Синенко Л.А., Татаренков В.М., Юношев Л.С.* Проект исследования деформаций Сибирской платформы под действием динамических нагрузок // V Российский симпозиум «Метрология времени и пространства», 11–13 октября 1994 г., ИМВП ГП ВНИИФТРИ, Менделеево, Россия. Секция П 5. С. 362.

95. *Кузьмин Ю.О., Жуков В.С.* Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004.

96. *Кулаков И.Н.* Электронно-цифровой микробарометр – высотомер. Патент РФ № 2104487.

97. *Ламли Дж., Поновский Г.* Структура атмосферной турбулентности. М., 1966.

98. *Ланцош К.* Практические методы прикладного анализа. М.: Фазматлит., 1961. 562 с.
99. *Лемон Тим., Гунг Роберт* . Тахеометр Trimble S`6. Технологии MagDrive Servo www. /Trimble.com/
100. *Макаренко Н.Л., Демьянов Г.Л., Зубинский В.И.* Системы координат спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС // Геодезия и картография. 2000. № 6. С. 16–22.
101. *Макаренко Н.Л.* О переходе на автономные спутниковые методы определения координат. (В порядке обсуждения) // Геодезия и картография. – 1996. № 5. С. 4–7.
102. *Марин Милчев.* Цифровые фотоаппараты. М.–СПб.: Питер, 2004.
103. *Маслич Д.И.* Некоторые общие закономерности влияния вертикальной рефракции на точность геодезического нивелирования // Межведомственный республиканский научно-технический сборник «Геодезия, картография и аэрофотосъемка». Львов, 1969. Вып. 9. С. 33–41.
104. *Маслич Д.И.* Определение рефракции света в турбулентной атмосфере // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1987. № 45.
105. *Медведев Е.М., Мельников С.Р.* Картографирование в режиме реального времени? – С лазерным сканированием это возможно уже сегодня // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. 2002. № 4. С. 49–51.
106. *Миронов В.Л.* Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1981.
107. *Михайлов В.С.* Дисперсионный угловой рефрактометр // Тезисы докл. Всесоюзного совещания «Совр. методы учета и исключения влияния рефракции световых волн при геод. и астроном. измерениях». Львов, Полит. Инст. Львов, 1974. С. 34–35.
108. *Михелев Д.И., Рунов И.В., Голубцов А.Н.* Геодезические измерения при изучении деформаций крупных инженерных сооружений. М.: Недра, 1977.
109. *Монин А.С., Обухов А.М.* Основные закономерности турбулентного перемешивания в горизонтальном слое атмосферы // Труды геофизического института АН СССР. 1954. № 24. С. 163–182.
110. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая ггидромеханика. Т. 1. М.: Наука, 1967.
111. Новая геодезическая техника и ее применение в строительстве. Издание второе, переработанное и дополненное: Учебное пособие для вузов. Под общей редакцией В.Е. Дементьева, М.: Высшая школа, 1984. С. 280.
112. *Обухов А.М.* О влиянии слабых неоднородностей атмосферы на распространения звука и света // Изв. АН СССР. Геофизика. 1953. № 2. С. 155–165.
113. *Одинцов С.Л., Постнов А.В., Рамеева Д.Р., Ширягин О.А.* Перспективы геодинамических исследований Астраханского свода.
114. *Островский А.Л., Заболоцкий Ф.Л.* Геодезическая рефрактометрия при геодезических исследованиях // Тезисы доклада конференции «Изучение Земли как планеты». Полтава, 1986. С. 251–255.
115. *Островский А.П., Стащищин И.И., Терещук А.И.* Изыскание эффективных методов учета нивелирной рефракции // В сб.: Геодезия, картография и аэрофотосъемка. Львов, 1986. Вып. 30. С. 28–40.

116. *Островский А.П., Кравцов Н.И., Перий С.И.* Определение частных углов рефракции по дрожаниям центра лазерного пятна и угловым колебаниям цели // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1987. Вып. 45. С. 69–77.
117. *Островский А.П., Тлустяк Б.Т., Суюнов А.С.* Об учете вертикальной рефракции в условиях Средней Азии // Геодезия и картография. 1987. № 5. С. 19–21.
118. *Островский А.П., Суюнов А.С.* Турбулентный метод учета вертикальной рефракции в условиях Средней Азии // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1989. Вып. 49. С. 112–120.
119. *Панжин А.А.* Исследование короткопериодных деформаций разломных зон верхней части земной коры с применением систем спутниковой геодезии. Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, 2000 // panzhin@ural.ru включите поддержку java-скриптов. Работа выполнена при поддержке РФФИ.
120. *Панжин А.А.* Непрерывный мониторинг смещений и деформаций земной поверхности с применением комплексов спутниковой геодезии GPS // Институт горного дела УрО РАН. Екатеринбург, 2002.
121. *Платонов В.С.* Выверка осей вращающихся печей // Применение газовых лазеров в геодезии. Серия 1 «Электроника СВЧ». ЦНИИ «Электроника». М., 1992. С. 67–68.
122. *Подлипский С.Я.* О геодезических измерениях движений земной коры // Геодезия и картография. 2002. № 5. С. 17–21.
123. *Прилепин М.Т., Голубев А.Н.* Инструментальные методы геодезической рефрактометрии // Итоги науки и техники. Геодезия и аэрофотосъемка // ВИНИТИ. М., 1979. Т. 15. С. 92.
124. *Прилепин М.Т.* Концепция использования глобальных спутниковых систем для прогноза землетрясений // Научные сообщения. Объединенный институт физики Земли РАН. Москва, 2001.
125. *Прилепин М.Т.* Определение показателя преломления воздуха при измерении расстояний светомодуляционными дальномерами // Изв. вузов. Серия «Геодезия и аэрофотосъемка». 1957. № 2. 123–132.
126. Прилепин М.Т. Светомодуляционный способ определения среднего показателя преломления воздуха вдоль некоторой линии // Тр. ЦНИИ геод., аэросъемки и картографии. 1957. Вып. 114. 127–130.
127. *Прилепин М.Т.* Способ измерения расстояний. Авторсое свидетельство СССР № 155949. Заявл. 11.09.62.
128. *Пушкин С.Б., Абашеев Ю.Г., Альшина А.П., Гайгеров Б.А., Елкин Г.А., Кошелев Н.Б.* Эталонная база государственной службы времени и частоты СССР: состояние и направление развития // Сб. научн. трудов. «Исследования в области измерений времени и частоты». М.: Госком СССР по управлению качеством продукции и стандартам НПО «НИИФТРИ», 1990. С. 3–18.
129. *Рикитаке Т.* Предсказание землетрясений. М., Мир, 1979.
130. Руководство пользователя по эхолоту Hydrotrac. ODOM, USA, 1998.
131. Руководство пользователя ПО HydroPro. Trimble, 1998.
132. *Серапинас Б.Б.* Глобальные системы позиционирования. М., 2002.

133. *Сидоренков Н.С.* Нестабильности вращения Земли. М.: Гидрометцентр России, 2004. Август.
134. Система геодезических параметров земли «Параметры земли 1990 года» (ПЗ-90) (Справочный документ. Авт.: Н.Ф. Галазин, Б.Н. Каплан, М.Г. Лебедев, В.Г. Максимов, Н.В. Петров, Т.Л. Сидорова-Бирюкова / Под общей ред. В.В. Хвостова. М.: Координационный научно-информационный центр, 1998.
135. *Скловский С.А., Бабаянц П.С., Керцман В.М.* Дистанционный экологический мониторинг промышленных центров // Минеральные ресурсы России. Специальный выпуск «Аэрогеофизика». М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1997. С. 34–39.
136. Современный гидролокатор. *Захаров А.И., Кривцов А.П., Седов М.В., Скнаря А.В., Трусилов В.Т., Шаров В.С.* // Специальная техника. 2001. № 6.
137. *Старобинец И.А.* Изв. вузов. Серия «Радиофизика». 1972. 15. № 5. С. 738.
138. *Столяренко Д.* Применение гидролокатора бокового обзора для прокладки и контроля положения подводного трубопровода. М.: Недра, 1990.
139. *Студебеккер Р.Х.* Патент США Кл 42с 9/01/01с 9/06№280363. Заявл. 10.03.67. Опубл. 3.11.70.
140. *Суюнов А.С., Власенко С.Г., Колгунов В.М.* Закономерности действия вертикальной рефракции в условиях Средней Азии // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1988. Вып. 47. С. 112–120.
141. *Суюнов А.С.* Учет вертикальной рефракции в двустороннем тригонометрическом нивелировании в условиях Средней Азии // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1989. Вып. 50. С. 96–99.
142. *Суюнов А.С.* Проблема учета атмосферных влияний на геодезические измерения в условиях Центральной Азии // Диссертация. Киев, 1955.
143. *Съедин В.Я., Хмелевцов С.С.* Изв. вузов. Серия «Физика». 1972. № 3. С. 91.
144. *Татаринов В.Н., Татаринова В.А.* О надежности определения скоростей движений земной коры на платформенных территориях GPS-методами // Материалы международной конференции. Воронеж, 2001.
145. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967.
146. *Турбович И.Т.* Аналитическое представление функции с неограниченным спектром // Радиотехника. 1959. № 3. С. 22–27.
147. *Турбович И.Т.* К вопросу применения теоремы Котельникова к функциям времени с неограниченным спектром // Радиотехника. 1958. № 8. С. 11–12.
148. Учет атмосферных влияний на астрономо-геодезические измерения / Под редакцией А.Л. Островского. М.: Недра, 1990.
149. *Фалькович С.Е., Пономарев В.И., Шкварко Ю.В.* Оптимальный прием пространственно-временных сигналов в радиоканалах с рассеянием. М.: Радио и связь, 1989.
150. *Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* Геотектоника с основами геодинамики. М.: МГУ, 1995.
151. *Хвостиков И.А.* Метод определения рефакции при точных геодезических измерениях // ДАН СССР. 1946. Т. 54. № 6. С. 343.

152. *Хмелевской В.К.* Геофизические методы исследования земной коры // Международный университет природы, общества и человека «Дубна».
153. *Черемухин А.М.* Оптические методы измерения структурной характеристики поля показателя преломления в турбулентной атмосфере. Учебное пособие. Горький: Издат. ГГУ, 1982.
154. *Юношев Л.С.* Боковая рефракция света при измерении углов. М.: Недра, 1969.
155. *Яковлев Н.В.* К теории и практике учета суточного хода рефракции при угловых измерениях и азимутальных определениях в геодезических сетях // Геодезия и картография. 1969. № 3. С. 8–17.
156. *Ямбаев Х.К.* Высокоточные створные измерения. М.: Недра, 1978.
157. *Ямбаев Х.К., Голыгин Н.Х.* Практикум по геодезическому инструментоведению // МОРФ МИИГАиК. М., 2003.
158. *Ямбаев Х.К., Голыгин Н.Х.* Геодезическое инструментоведение Практикум. М.: ЮКИС, 2005. 309 с.
159. *Bahnert G.* Bildflimmer und terrstaishe refraction. Vermessungtechnik № 4, 1985.
160. *Balzani M., Pellegrinelli A., Perfetti N., Uccelli F.* A terrestrial 3D-laser scanner: Accuracy tests // Proc. 18th Int. Symp. CIPA 2001. PP. 445-453.
161. *Boehler W., Marbs A.* 3D-Scanning instruments // Proc. of the CIPA WG6 Int. Workshop on scanning for cultural heritage recording. 2002 (http://www.isprs.org/commis-sion5/workshop).
162. *Blewitt G.*, et al. Absolute Far-Field Displacements from the 28 June, 1992, Landers Earthquake Sequence // Nature. 1993. No. 361. P. 340–342.
163. *Brunner F.K.* Vertical refraction angle derived from the variance of the angle-arrival fluctuations // Conf. «Refraction influences in astrometry and geodesy». Kensington: Univers. New Yels, 1979.
164. *Brunner F.K.* Atmospheric turbulence and its effects on direction measure-ments Sun and Planet systems // 6th Eur.Reg. Meet Astron., Dubrovnik, 19–23 Okt., 1981; Dordrecht e.a., 1982.
165. *Brunner F.K.* Electromagnetic wave propagation and refraction in the atmosphere // Final report (1979-1983) «Trav. Assoc. inst. geo. Vol. 27. Rapp. gen. ef rapp. Tecn. 18 Assem gein., Hambourg, aout, 1983». Paris, 1984. Pp. 89–102 (англ).
166. *Bock Y.*, et al. Detection of Crustal Deformation from the Landers Earthquake Sequence Using Continuous Geodetic Measurements // Nature. 1993. No. 361. P. 337–340.
167. *Buck A.L.* Apll. Optics. 1967. 6. № 4. 703.
168. Dabberdt Walter F. Slant path scintillation in the planetary baupdary layer. Appl. Opt. 1973. №12.
169. *Denbigh P.N.* Swath bathymetry: Principles of operation and analysis of errors. // IEEE J.Oceanic Eng. 1989. 14. 289–298.
170. *Fadzean Mc., Ceri A.R.* An Automated Side Scan Sonar Pipeline Inspection System // Under Water Magazine. Vol.8. No.6. November/December 2000.
171. *Fish J.P., Carr H.A.* Sound Underwater Images: A guide to the generation and interpretation of side scan sonar data. Lower Cape Publishing, Orleans, USA. 1990.

172. *Gokhberg M, Morgunov V, Pokhotelov O.* Earthquake Prediction: Seismoelectromagnetic Phenomena. Reading-Philadelphia, Gordon and Breach Sci. Publ. 1995.
173. *Hofman-Wellenhof B., Lichtengger H., Collins J.* Global Positioning System. Theorie and Praxis. Springer; Wien; New York, 1993.
174. *Hoglund. R., Large P.* Technology autlook measurements DR for geodesists and engineers builders.. Trimble Survey, Westminster, Colorado, USA.
175. *Johansson M.* Explorations into the behavior of three different highresolution groundbased laser scanners in the built environment // Proc. of the CIPA WG6 Int. Workshop on scanning for cultural heritage recording. 2002 (http:// www.isprs.org/commission5/workshop).
176. *Kern F.* Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscannerdaten // Geodfltische Schriftenreihe der Technischen Universitflt Bra-unschweig, Nr. 19. ISBN 3-926146-14-1. 2003.
177. *Lichti D.D., Stewart M.P., Tsakiri M., Snow A.J.* Calibration and testing of a terrestrial laser scanner // Int. Arch. of Pho-togrammetry and Remote Sensing. 2000. Vol. XXXIII. Part B5. Pp. 485–492.
178. *Lichti D.D, Gordon S.J., Stewart M.P, Franke J, Tsakiri M.* Comparison of digital photogrammetry and lasers.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 5

ГЛАВА 1
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ
ИЗ ФИЗИКИ, РАДИОТЕХНИКИ, ОПТИКИ

1.1. Электромагнитные волны. Общие свойства. 7
1.2. Распространение радиоволн 19
1.3. Скорость света. Основные законы распространения света 24
1.4. Интерференция и дифракция света 27
1.5. Оптические детали, фотоприемники и устройства памяти, применяемые в геодезических приборах. 30
1.6. Лазеры 44
1.7. Свойства лазерного излучения. Моды оптического резонатора 57
1.8. Техника безопасности при работе с лазерными приборами 70

ГЛАВА 2
ПРИБОРЫ ДЛЯ
ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Механические мерные приборы. Оптические дальномеры. 75
2.2. Электромагнитные способы измерения расстояний 78
2.3. Импульсный и фазовый способы измерения расстояний. Основные элементы светодальномеров. 81
2.4. Современные импульсные и фазовые дальномеры. 96
2.5. Лазерные интерферометры 111
2.6. Измерение разностей расстояний на основе эффекта Доплера 125
2.7. Оптические теодолиты 127
2.8. Цифровые (электронные) теодолиты 141
2.9. Применение лазеров для угловых измерений 146
2.10. Электронные тахеометры. 151
2.11. Сканеры 162
2.12. Сканеры для выполнения аэросъемочных работ. 170

ГЛАВА 3
ПРИБОРЫ ДЛЯ НИВЕЛИРОВАНИЯ

3.1. Общие сведения. Способы автоматической компенсации угла наклона оси вращения нивелира 184
3.2. Точные и технические нивелиры 189
3.3. Цифровые и лазерные нивелиры 203
3.4. Гидростатические нивелиры 217
3.5. Баронивелир и его применение для съемок рельефа при скоростных изысканиях 229

ГЛАВА 4
СПУТНИКОВОЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

4.1. Общие сведения об определении положения точек по спутникам. . . 237
4.2. Спутниковые системы навигации ГЛОНАСС, Navstar, Galileo 243
4.3. Оборудование и методы измерений, используемые в спутниковой геодезии 257

4.4. Способы спутниковых измерений 285
4.5. Обработка спутниковых измерений 297
4.6. Применение спутниковых геодезических систем для измерения современных движений земной коры 300

ГЛАВА 5
ПРИБОРЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

5.1. Приборы для геодезического контроля вертикальности сооружений 310
5.2. Применение лазерных приборов при разбивочных работах, планово-высотном контроле и задании направления 319
5.3. Лазерные приборы для автоматизации геодезического контроля 334
5.4. Современные геодезические приборы для измерения деформаций сооружений и установки в створ технологического оборудования 365
5.5. Подземные и подводные съемки с помощью современных приборов 384

ГЛАВА 6
ПРИБОРЫ ДЛЯ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

6.1. Общие сведения 413
6.2. Гравиметры для относительных измерений силы тяжести 415
6.3. Гравиметры для абсолютных измерений ускорения свободного падения 419

ГЛАВА 7
ОРИЕНТИРОВАНИЕ

7.1. Основные сведения об использовании компаса 426
7.2. Современные электронные компасы 429
7.3. Элементарная теория гироскопа 431
7.4. Принципиальная схема гироскопического теодолита и геодезическая сущность гироскопического азимута 435

ГЛАВА 8
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕФРАКЦИИ

8.1. Общие сведения из физики атмосферы как передающей среды 438
8.2. Эффекты, возникающие при распространении света в атмосфере 445
8.3. Рефракция. Общие сведения 461
8.4. Метеорологический метод определения рефракции 469
8.5. Геодезические методы определения вертикальной рефракции 471
8.6. Измерение рефракции дисперсионным методом 478
8.7. Основы теории определения вертикальной рефракции по статистическим характеристикам оптического излучения, прошедшего слой турбулентной атмосферы 482
8.8. Методы определения структурной характеристики поля показателя преломления воздуха 489
8.9. Определение знака угла вертикальной рефракции 505
8.10. Экспериментальное определение вертикальной рефракции по флуктуациям угла прихода с помощью лазерного углоизмерительного устройства 515

8.11. Экспериментальные определения вертикальной рефракции визуальными методами по колебаниям изображений визирных целей и размытию изображения миры 520
8.12. Точность определения угла вертикальной рефракции при использовании динамических методов измерений 525

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1.2. Технические характеристики газовых лазеров 533
Таблица 1.3. Технические характеристики полупроводниковых лазеров 534
Таблица 2.2. Мерные ленты и рулетки 536
Таблица 2.8. Технические характеристики цифровых теодолитов 538
Таблица 2.9. Технические характеристики электронных тахеометров 539
Таблица 3.1. Технические характеристики нивелиров 557
Таблица 3.7. Технические характеристики цифровых нивелиров 559
Таблица 3.8. Технические характеристики лазерных нивелиров 560
Таблица 4.7. Технические характеристики ручных навигаторов Magellan 563
Таблица 4.10. Технические характеристики спутниковых геодезических приемников 563
Таблица 5.5. Технические характеристики уклонофиксаторов, используемых при укладке труб 577

Литература 578

Учебное издание

Дементьев Виктор Евлампиевич

СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Компьютерная верстка
И. Петров

Корректор
Е. Тюрин

ООО «Академический Проект»
Изд. лиц. № 04050 от 20.02.01.
111399, Москва, ул. Мартеновская, 3.
Санитарно-эпидемиологическое заключение
Федеральной службы по надзору в сфере защиты
прав потребителей и благополучия человека
№ 77.99.60.953.Д.002432.03.07 от 09.03.07.

По вопросам приобретения книги просим обращаться
в ООО «Трикста»:
111399, Москва, ул. Мартеновская, 3
Тел.: (495) 305 3702; 305 6092; факс: 305 6088
E-mail: info@aprogect.ru
www.aprogect.ru

Налоговая льгота — общероссийский классификатор
продукции ОК-005-093, том 2; 953000 — книги, брошюры.

Подписано в печать с готовых диапозитивов 06.03.08.
Формат 70×100 1/16. Гарнитура NewtonC. Бумага писчая.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 48,1. Тираж 2000 экз.
Заказ № 217.

ISBN 978-5-8291-0997-4



Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленных диапозитивов
в ОАО «ИПП «Уральский рабочий».
620041, ГСП-148, Екатеринбург, ул. Тургенева, 13.
http://www.uralprint.ru e-mail: book@uralprint.ru