

---

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

ISBN 978-5-8291-0997-4

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

## 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. Бергстрандом (Швеция) первого фазового дальномера, названного геодинетром [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 теллуrometer, 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. Геннике 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:

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

Здесь  $I(t)$  — закон колебания тока во времени;  $t$  — текущее время;  $I_0$  — амплитуда,  $\varphi_0$  — начальная фаза,  $\omega$  — круговая частота колебаний (рад/с),  $\omega = 2\pi f$ , где  $f$  — частота колебаний в Гц. Период таких колебаний:

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

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  $X$ :

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

где  $E_0$  — амплитуда колебаний,  $\omega$  — круговая частота;  $t$  — время;  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $\varphi_0$  — начальная фаза колебаний;  $\lambda$  — длина волны.

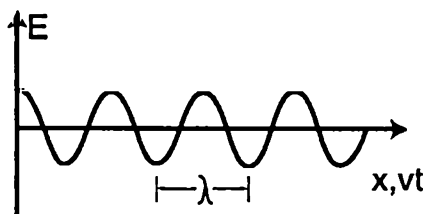


Рис. 1.1. Синусоидальная волна

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:

$$x = vt, \quad (1.4)$$

а длину волны  $\lambda$  — со скоростью распространения и частотой колебаний:

$$\lambda = \frac{2\pi v}{\omega}. \quad (1.5)$$



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

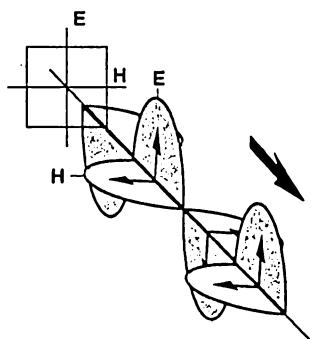


Рис. 1.3. Электромагнитная волна

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 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

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

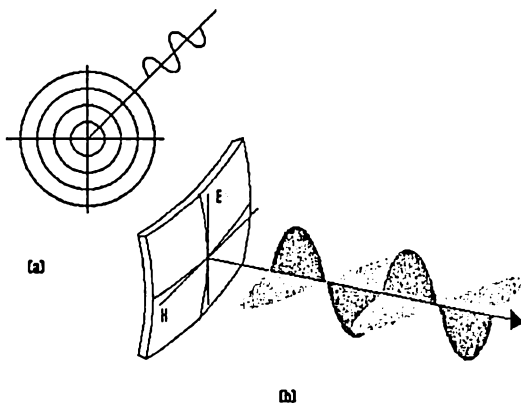


Рис. 1.4. Сферическая (а) и плоская волна (б) 9

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	$4 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{12}$
Видимый свет	0,4–0,75 мкм	$4 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$
Ультрафиолетовое излучение, УФ	0,1–0,4 мкм	$7,5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$
Рентгеновское излучение и гамма-излучение	менее 0,1 мкм	$3 \cdot 10^{15}$

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]:

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



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 Бутера—Ламберта—Бера. В этой формуле обычно фигурирует интенсивность излучения  $I$ , которая в итоге пропорциональна мощности  $P$  или энергии, то есть квадрату амплитуды:

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

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  $\lambda$ ;  $E$  — 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:

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

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  $2\pi$  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  $0-2\pi$ .

Ниже приведена одна из форм записи гармонического ряда Фурье (для периода  $0-2\pi$ ):

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

$$y = 0 \dots 2\pi, \quad (1.10)$$

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

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

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 12 электромагнитных волн такие гармоники имеют условно-физический