

**А.Е. Мандель, В.А. Замотринский**

# **Распространение радиоволн**

## **Учебное пособие**

Рекомендовано  
Сибирским региональным отделением  
учебно-методического объединения высших учебных заведений РФ  
по образованию в области радиотехники, электроники,  
биомедицинской техники и автоматизации  
для межвузовского использования в качестве учебного пособия  
для студентов, обучающихся по направлениям подготовки  
Радиотехника –210300 и Телекоммуникации – 210400

2012

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники**

**А.Е. Мандель, В.А. Замотринский**

# **Распространение радиоволн**

Учебное пособие  
по дисциплинам «Распространение радиоволн»  
для направлений подготовки Радиотехника –210300 и  
Телекоммуникации – 210400

2012

УДК 621.371(075.8)

Рецензенты:

доктор физ.-мат. наук, профессор Научного исследовательского Томского государственного университета

Якубов В.П.

Доктор техн. наук, профессор института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

Тихомиров А.А.

кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой Радиотехники ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Саломатов Ю.П.

**Мандель А.Е., Замотринский В.А.,**

Распространение радиоволн: Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 163 с.

Рассматриваются вопросы распространения радиоволн в свободном пространстве, вблизи земной поверхности, в тропосфере и ионосфере. Приведены необходимые сведения из теории антенн. Значительное внимание уделено физике рассматриваемых явлений, а также расчетным формулам и графикам, позволяющих определить напряженность поля в точке приема в различных условиях

Учебное пособие по дисциплинам «Электродинамика и распространение радиоволн» и «Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн» предназначено для студентов технических вузов, обучающихся по направлениям подготовки Радиотехника – 210300, Телекоммуникации – 210400 и по специальностям Радиотехника – 210302, Бытовая радиоэлектронная аппаратура – 210303, Радиоэлектронные системы - 210304, Аудиовизуальная техника – 210312, Защищенные системы связи – 210403, очной, заочной, очно-заочной форм обучения.

© Мандель А.Е.,

©Замотринский В.А.,

2012

© Томский гос. университет систем

управления и радиоэлектроники, 2012

Учебное издание

## Оглавление

Предисловие .....	5
Список основных сокращений и обозначений .....	6
1. Распространение радиоволн в свободном пространстве .....	8
1.1. Классификация радиоволн по диапазонам .....	8
1.2. Распространение радиоволн в свободном пространстве. Некоторые сведения из теории антенн .....	10
1.3. Область пространства, существенная при распространении радиоволн .....	14
1.4. Классификация радиоволн по способу распространения ...	24
1.5. Понятие о функции ослабления .....	26
Контрольные вопросы .....	28
2. Распространение земных радиоволн при поднятых антеннах ...	29
2.1. Электрические параметры различных типов земной поверхности .....	29
2.2. Расстояние прямой видимости .....	32
2.3. Распространение радиоволн при поднятых антеннах и плоской Земле .....	34
2.4. Отражение радиоволн от неровной земной поверхности. Критерий Релея .....	46
2.5. Учет сферичности Земли в интерференционных формулах	48
2.6. Распространение радиоволн в зоне тени и полутени .....	51
Контрольные вопросы .....	59
3. Распространение земных радиоволн при низко расположенных антеннах .....	61
3.1. Формула идеальной радиопередачи .....	61
3.2. Структура поля над поглощающей поверхностью Земли ..	63
3.3. Расчет вертикальной составляющей напряженности электрического поля. Формула Шулейкина — Ван-дер-Поля .....	67
3.4. Распространение радиоволн при низко расположенных антеннах над неоднородной трассой .....	72
Контрольные вопросы .....	76
4. Тропосфера и ее влияние на распространение радиоволн .....	77
4.1. Электрические параметры тропосферы .....	78
4.2. Рефракция радиоволн .....	80
4.3. Распространение радиоволн путем рассеяния на неоднородностях тропосферы .....	90

4.4. Инженерный метод расчета радиорелейных линий на основе ДТР .....	95
4.5. Ослабление радиоволн в тропосфере .....	101
Контрольные вопросы .....	104
5. Ионосфера и ее влияние на распространение радиоволн .....	105
5.1. Состав и строение ионосферы .....	105
5.2. Электрические параметры ионосферы .....	108
5.3. Отражение и преломление радиоволн в ионосфере .....	112
5.4. Поглощение радиоволн в ионосфере .....	121
5.5. Влияние постоянного магнитного поля Земли на распространение радиоволн в ионосфере .....	123
Контрольные вопросы .....	128
6. Диапазонные особенности распространения радиоволн .....	129
6.1. Особенности распространения сверхдлинных и длинных волн .....	129
6.2. Особенности распространения средних волн .....	131
6.3. Распространение коротких волн .....	133
6.4. Распространение ультракоротких волн .....	136
Контрольные вопросы .....	146
7. Помехи радиоприему .....	148
7.1. Атмосферные помехи .....	152
7.2. Промышленные помехи .....	152
7.3. Космические помехи .....	153
7.4. Шумы, созданные тепловым излучением Земли и атмосферы .....	154
Контрольные вопросы .....	157
Литература .....	158
Приложение. Краткие сведения из теории случайных процессов .....	160

## Предисловие

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по образовательным направлениям «Радиотехника» и «Телекоммуникации».

Государственный Образовательный Стандарт 2000 года для студентов, обучающихся по образовательному направлению «Радиотехника» объединяет две учебные дисциплины «Электродинамика» и «Распространение радиоволн» в одну — «Электродинамика и распространение радиоволн». Для некоторых специальностей направления «Телекоммуникации» дисциплина «Распространение радиоволн» объединена с дисциплиной «Антенно-фидерные устройства». Данное учебное пособие предназначено в первую очередь студентам этих направлений.

Методология учебной дисциплины «Распространение радиоволн» давно сформирована, по ней издано большое количество литературы, в том числе и учебной, но в основном до 1991 года [1–5]. В связи с этим издание новых учебных пособий является не только желательным, но и необходимым.

В данном пособии рассмотрены физические процессы, происходящие при распространении радиоволн в свободном пространстве, вблизи земной поверхности, в тропосфере и ионосфере. Приведены данные о строении атмосферы. Рассмотрены особенности распространения радиоволн различных диапазонов. В первый раздел включены также некоторые определения и формулы для основных параметров антенн. Это позволяет выполнять энергетический расчет линии связи по найденной напряженности поля в точке приема. Изложение сопровождается рисунками и графиками, облегчающими понимание физической сущности рассматриваемых явлений и выполнение численных расчетов. Временная зависимость в методе комплексных амплитуд принята в виде  $e^{j\omega t}$ .

Приводимый список литературы позволит желающим глубже изучить интересующие их вопросы.

## Список основных сокращений и обозначений

ДВ	— длинные волны
ДН	— диаграмма направленности антенны
КВ	— короткие волны
П	— вектор Пойнтинга
РЛС	— радиолокационная станция
РРЛ	— радиорелейная линия
СДВ	— сверхдлинные волны
СВ	— средние волны
$T_{ш}$	— шумовая температура
ТВ	— телевидение
УКВ	— ультракороткие волны
$D$	— коэффициент направленного действия антенны
$D, E, F_1, F_2$	— ионосферные слои
$E, H$	— напряженности электрического и магнитного полей
$H_0$	— напряженность постоянного магнитного поля Земли
$G$	— коэффициент усиления антенны
$F(\theta)$	— диаграмма направленности антенны
$F_{\Sigma}(\theta)$	— диаграмма направленности антенны с учетом влияния Земли
$N$	— индекс преломления в тропосфере
$N_e$	— электронная концентрация в ионосфере
$L$	— потери в линии связи (коэффициент ослабления)
$P$	— мощность, излучаемая антенной
$R$	— расстояние, коэффициент отражения
$R_0$	— радиус Земли (6370 км)
$R_{\text{э}}$	— эквивалентный радиус Земли
$S_{\text{эфф}}$	— эффективная поверхность приемной антенны
$Z$	— характеристическое сопротивление среды
$V, W$	— функция (множитель) ослабления
$c$	— скорость распространения света в вакууме ( $c = 3 \cdot 10^8$ м/с)
$f$	— частота радиоволны
$j$	— мнимая единица ( $j = \sqrt{-1}$ )

---

---

$h$	— высота антенн над Землей
$h'$	— приведенная высота антенны
$h_{\partial}$	— действующая высота отражения в ионосфере
$k = 2 \cdot \pi / \lambda$	— волновое число в среде
$n$	— показатель преломления среды
$r_0$	— расстояние прямой видимости
$v$ и $v_{\text{гр}}$	— фазовая и групповая скорости волны
$\Gamma''$	— коэффициент затухания в среде
$\varepsilon_0$	— диэлектрическая проницаемость вакуума ( $8,85 \cdot 10^{-12}$ ф/м)
$\varepsilon_r$	— относительная диэлектрическая проницаемость среды
$\hat{\varepsilon}_r$	— тензор диэлектрической проницаемости ионосферы
$\rho$	— численное расстояние
$\lambda$	— длина волны в среде
$\omega$	— круговая частота
$\sigma$	— удельная проводимость среды
$\Delta$	— угол потерь в поглощающей среде



# **1. Распространение радиоволн в свободном пространстве**

## **1.1. Классификация радиоволн по диапазонам**

Радиоволнами принято называть электромагнитные волны в диапазоне частот  $3 \cdot 10^3$ – $3 \cdot 10^{12}$  Гц, т.е. от единиц килогерц до тысяч гигагерц.

Мы рассмотрим вопросы, связанные с процессами свободно-го распространения радиоволн. Под свободным распространением радиоволн будем понимать распространение радиоволн в атмосфере, вдоль поверхности земли, в толще земли, в космическом пространстве. Из рассмотрения исключим случаи передачи электромагнитных волн по искусственным линиям связи — проводным линиям, волноводам, световодам, полосковым линиям передачи и т.п.

Свободно распространяющиеся радиоволны находят в современной науке и технике обширное и многообразное применение. Прежде всего, отметим использование радиоволн для передачи разного рода информации (телеграфия, телефония, телевидение, радиовещание), определения координат различных объектов (радиолокация, радионавигация), для управления на расстоянии различными устройствами и механизмами (радио- и телеуправление). Свободно распространяющиеся радиоволны широко используются в метеорологии при наблюдении за различными атмосферными образованиями (прогнозирование погоды), в геофизике, при изучении верхних слоев атмосферы, в радиоастрономии, при изучении строения планет, звезд, туманностей, находящихся как в пределах нашей галактики, так и вне ее.

Во всех перечисленных применениях общим является наличие передающего устройства, среды, в которой распространяются радиоволны, и приемного устройства. Все вместе эти элементы образуют радиолинию (рис. 1.1).

В радиолиниях связующим элементом является природная среда, окружающая земной шар, например, атмосфера и

космическое пространство, если радиоприемная антенна расположена между Землей и космическим аппаратом. На земных радиоприемных линиях, типа земля-земля, среда включает в себя атмосферу и поверхность Земли. Земная атмосфера и поверхность Земли являются поглощающими, электрически неоднородными средами. Их проводимость и диэлектрическая проницаемость непостоянны и изменяются во времени и пространстве, зависят от частоты распространяющихся волн.

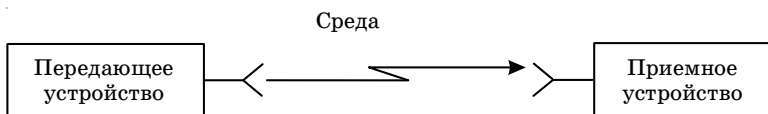


Рис.1.1. Схематическое изображение радиоприемной линии

В зависимости от частоты распространяющихся радиоволн влияние одной и той же среды проявляется в большей или меньшей степени. Резко выраженная зависимость законов распространения радиоволн от их частоты приводит к необходимости разделить радиоволны на диапазоны, в пределах которых условия распространения радиоволн примерно одинаковы. Сведения об этих диапазонах в соответствии с Регламентом радиосвязи, принятым Международным Консультативным Комитетом по Радио (МККР), приведены в табл. 1.1.

Диапазоны 8÷12 часто объединяют в один диапазон УКВ (ультракоротких волн). В последние годы для радиосвязи находят применение и волны оптического диапазона. Их разделяют на инфракрасные (частоты  $3 \cdot 10^{12} \div 4 \cdot 10^{14}$  Гц, длины волн  $10^{-3} \div 7,5 \cdot 10^{-7}$  м), видимые (частоты  $4 \cdot 10^{14} \div 7,5 \cdot 10^{14}$  Гц, длины волн  $7,5 \cdot 10^{-7} \div 4 \cdot 10^{-7}$  м), ультрафиолетовые (частоты  $7,5 \cdot 10^{14} \div 1,5 \cdot 10^{17}$  Гц, длины волн  $4 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-9}$  м).

Диапазон радиоволн ограничен и представляет собой ресурс, который, как и другие природные ресурсы, требует рационального использования.

Таблица 1.1

## Распределение радиоволн по диапазонам

№ диапазона	Частота	Название по частоте	Длина волны	Название по длине волны
4	3÷30 кГц	Очень низкие частоты (ОНЧ)	100÷10 км	Сверхдлинные волны (СДВ)
5	30÷300 кГц	Низкие частоты (НЧ)	10÷1 км	Длинные волны (ДВ)
6	300 кГц÷3 МГц	Средние частоты (СЧ)	1000÷100 м	Средние волны (СВ)
7	3÷30 МГц	Высокие частоты (ВЧ)	100÷10 м	Короткие волны (КВ)
8	30÷300 МГц	Очень высокие частоты (ОВЧ)	10÷1 м	Метровые волны
9	300 МГц÷3 ГГц	Ультравысокие частоты (УВЧ)	100÷10 см	Дециметровые волны
10	3÷30 ГГц	Сверхвысокие частоты (СВЧ)	10÷1 см	Сантиметровые волны
11	30÷300 ГГц	Крайне высокие частоты (КВЧ)	10÷1 мм	Миллиметровые волны
12	300÷3000 ГГц	Гипервысокие частоты (ГВЧ)	1÷0,1 мм	Децимиллиметровые волны

## 1.2. Распространение радиоволн в свободном пространстве. Некоторые сведения из теории антенн

Свободное пространство представляет собой однородную, изотропную, не поглощающую среду, у которой относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости ( $\epsilon_r$  и  $\mu_r$ ) равны единице. Такой средой был бы идеальный вакуум. Реально к свободному пространству можно отнести космическое пространство и в некоторых случаях, на небольших расстояниях, воздух,

окружающий Землю. Основной задачей дисциплины «Распространение радиоволн» является определение напряженности электрического поля в точке приема при заданных мощности передатчика или тока в антенне, частоте и параметрах трассы (расстоянии, высотах антенн и т.п.). Решение этой задачи обычно представляют в виде формулы для свободного пространства и множителя ослабления, учитывающего влияние реальных факторов.

Пусть в свободном пространстве расположена антенна, имеющая максимальный размер излучающей области  $L$ . В зависимости от расстояния до точки наблюдения пространство вокруг антенны может быть разделено на три области: ближнюю, промежуточную и дальнюю. Поля в этих областях имеют различную структуру и определяются по различным формулам. Нас в дальнейшем будет интересовать, как правило, дальняя область, или зона Фраунгофера, поскольку этот случай обычно имеет место в реальных линиях радиосвязи. Область дальней зоны определяется соотношением

$$r \geq \frac{2L^2}{\lambda}, \quad (1.1)$$

где  $\lambda$  — длина волны.

В дальней зоне электромагнитное поле, созданное антенной, имеет характер электромагнитной волны со сферическим фазовым фронтом и взаимно ортогональными векторами  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ , ортогональными и к направлению на антенну. В дальней зоне свободного пространства векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  синфазны, и их модули связаны соотношением

$$W = \frac{E_m}{H_m} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = Z_0 = 120\pi = 377 \text{ Ом}. \quad (1.2)$$

Величина  $W$  имеет размерность сопротивления и называется характеристическим (иногда волновым) сопротивлением свободного пространства.

Пусть в свободном пространстве вместо реальной антенны расположена антенна, излучающая мощность  $P$  равномерно во всех направлениях. Такая воображаемая антенна называется изотропной. На расстоянии  $r$  от нее величина вектора Пойнтинга будет равна

$$\Pi = \frac{P}{4\pi r^2} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right],$$

где  $4\pi r^2$  — поверхность сферы, проходящая через точку наблюдения и с центром в точке расположения антенны.

Реальная антенна излучает ту же мощность неравномерно по разным направлениям. За счет этого в направлении максимального излучения вектор Пойнтинга увеличится в  $D$  раз:

$$\Pi = \frac{PD}{4\pi r^2}. \quad (1.3)$$

Параметр  $D$  называется коэффициентом направленного действия антенны (КНД) и является одним из ее основных параметров.

В дальней зоне амплитуды полей  $E$  и  $H$  связаны со средним по времени значением вектора Пойнтинга соотношением

$$\Pi = \frac{1}{2} E_m H_m.$$

Исключая из этого соотношения  $H_m$  с помощью (1.2), получим выражение для амплитуды напряженности электрического поля в дальней зоне антенны в свободном пространстве:

$$E_m = \frac{\sqrt{60PD}}{r}. \quad (1.4)$$

Таким образом, использование направленных антенн позволяет в  $\sqrt{D}$  раз увеличить напряженность поля в направлении максимального излучения при той же излучаемой мощности. Напряженность поля в других направлениях определяется через диаграмму направленности антенны  $F(\theta, \alpha)$ , где углы  $\theta$  и  $\alpha$  характеризуют направление на точку наблюдения в сферической системе координат  $(r, \theta, \alpha)$ :

$$E_m(\theta, \alpha) = \frac{\sqrt{60PD}}{r} F(\theta, \alpha). \quad (1.5)$$

В некоторых случаях бывает задан не КНД, а коэффициент усиления антенны  $G = D\eta$ , где  $\eta$  — коэффициент полезного действия антенны (КПД). В диапазоне УКВ коэффициент полезного действия антенны часто принимают равным 1.

Если в передающей антенне задана не излучаемая мощность, а амплитуда входного тока  $I_0$ , то аналогом формулы (1.5) является соотношение

$$E_m(\theta, \alpha) = \frac{60\pi I_0 l_d}{\lambda r} F(\theta, \alpha), \quad (1.6)$$

где  $l_d$  — действующая длина антенны. Этот параметр легко определяется для вибраторных антенн, если известно распределение тока по длине антенны. Он связан с КНД антенны соотношением

$$l_d = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{R_\Sigma D}{120}}, \quad (1.7)$$

где  $R_\Sigma$  — сопротивление излучения антенны.

При энергетическом расчете линии связи представляет интерес не сама напряженность поля в точке приема, а мощность в нагрузке приемной антенны или ЭДС на ее выходе. В теории антенн доказывается, что эти параметры определяются соотношениями

$$e_{\max} = l_d E, \quad P_{\text{н max}} = \Pi S_{\text{эфф}}, \quad (1.8)$$

где  $e_{\max}$  и  $P_{\text{н max}}$  — максимальные значения ЭДС на выходе приемной антенны и мощности в ее нагрузке,  $l_d$  и  $S_{\text{эфф}}$  — действующая длина и эффективная поверхность приемной антенны, определяемая через ее КНД:

$$S_{\text{эфф}} = \frac{\lambda^2 D}{4\pi}. \quad (1.9)$$

Формулы (1.8), (1.9) предполагают, что прием осуществляется в направлении максимума диаграммы направленности приемной антенны, что она согласована с падающей волной по поляризации и что ее КПД равен единице, а также что антенна согласована с нагрузкой по сопротивлению (для  $P_{\text{н max}}$ ).

Из формул (1.3), (1.8) и (1.9) следует формула радиосвязи в свободном пространстве

$$P_2 = P_1 \frac{D_1 D_2 \lambda^2}{(4\pi r)^2}, \quad (1.10)$$

где  $P_2$  — максимальная мощность в нагрузке приемной антенны;  $P_1$  — излучаемая мощность;  $D_1, D_2$  — КНД передающей и приемной антенн.

Отношение  $L_0 = P_2/P_1$  при  $D_1 = D_2 = 1$ , т.е. при ненаправленных (изотропных) антеннах, называют основными потерями радиолинии и обычно выражают в децибелах:

$$L_0 = 10 \lg L_0 = 20 \lg \frac{c}{4\pi r f}, \quad (1.11)$$

где  $f$  — частота излучаемого сигнала;  $c$  — скорость света.

Если измерять  $r$  в километрах, а  $f$  — в мегагерцах, то получим удобное для расчетов выражение

$$L_0 = -[33 + 20(\lg r + \lg f)]. \quad (1.12)$$

Измерение потерь в радиолинии в децибелах удобно, так как абсолютное значение основных потерь может изменяться в больших пределах. Применение направленных антенн эквивалентно увеличению мощности передатчика в  $D_1 D_2$  раз или на  $(D_1 + D_2)$  децибел.

### 1.3. Область пространства, существенная при распространении радиоволн

При распространении радиоволн в свободном пространстве различные области пространства неодинаково влияют на формирование поля на некотором расстоянии от излучателя. Область пространства, в которой распространяется основная часть передаваемой мощности, называют областью пространства, существенной при распространении радиоволн.

Очевидно, что эта область охватывает пространство вблизи прямой, соединяющей точки расположения излучателя и приёмной антенны. Размеры и конфигурацию области, существенной при распространении радиоволн, определяют исходя из принципа Гюйгенса.

Согласно принципу Гюйгенса каждая точка фронта распространяющейся волны является источником новой вторичной сферической волны. Полное поле определяется путем суммирования элементарных полей, созданных вторичными источниками, которые находятся на некоторой поверхности, окружающей первичный источник. Математическую формулировку принципу Гюйгенса дал Кирхгоф в виде формулы, носящей его имя:

$$\varphi(P) = \frac{j}{4\pi} \oint_S \left\{ \varphi_S \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{e^{-jkR}}{R} \right) - \frac{e^{-jkR}}{R} \frac{\partial \varphi_S}{\partial n} \right\} dS, \quad (1.13)$$

где  $\varphi(P)$  — поле в точке наблюдения  $P$ ;  $S$  — замкнутая поверхность, окружающая источник;  $n$  — внешняя нормаль к поверхности  $S$ ;  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $\lambda$  — длина волны;  $\varphi_S$  — поле на поверхности  $S$ ;  $R$  — расстояние от точки  $P$  до точек поверхности  $S$ .

Формула Кирхгофа не учитывает векторный характер электромагнитного поля и поэтому является приближенной. Позднее были получены векторные аналоги формулы Кирхгофа [3, 6, 7]. Однако и в таком виде она находит широкое применение, так как позволяет объяснить и рассчитать многие эффекты, связанные с распространением радиоволн.

Построение, предложенное Френелем, позволяет наглядно истолковать принцип Гюйгенса, определить размеры и конфигурацию области, существенной для распространения радиоволн, не прибегая к вычислению интеграла в (1.13) [1–3].

Пусть в точке  $A$  помещен источник, а в точке  $B$  — приемная антенна. Причем расстояние  $AB$  много больше длины волны. Пусть на некотором расстоянии  $\rho_0$  от точки  $A$  помещена бесконечная плоскость  $S$ , перпендикулярная к линии  $AB$  (рис. 1.2), а  $r_0$  — расстояние от плоскости  $S$  до приемника (точки  $B$ ).

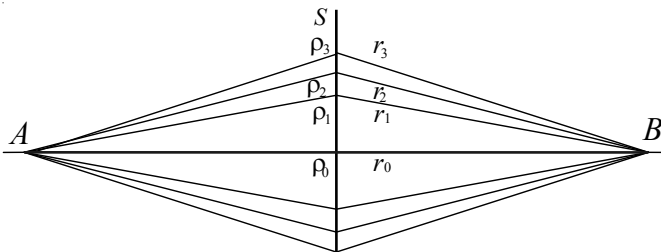


Рис. 1.2. Построение зон Френеля на плоскости

Эту плоскость выберем в качестве поверхности, на которой рассматриваются вторичные источники. Разобьем плоскость  $S$  на зоны Френеля. Границы зон Френеля определяются равенствами





Аналогично внешний радиус зоны любого номера будет

$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda r_0 \rho_0}{r_0 + \rho_0}}. \quad (1.19)$$

Площадь первой зоны

$$S_1 = \pi R_1^2 = \frac{\pi\lambda r_0 \rho_0}{r_0 + \rho_0}.$$

Площадь  $n$ -й зоны

$$S_n - S_{n-1} = \frac{\pi\lambda r_0 \rho_0}{r_0 + \rho_0} n - \frac{\pi\lambda r_0 \rho_0}{r_0 + \rho_0} (n-1) = \frac{\pi\lambda r_0 \rho_0}{r_0 + \rho_0}. \quad (1.20)$$

Таким образом, площади всех зон Френеля одинаковы и равны

$$S_\Phi = \frac{\pi\lambda r_0 \rho_0}{r_0 + \rho_0}.$$

Построим границы зон Френеля в плоскости распространения волн. Для этого будем перемещать плоскость  $S$  вдоль линии  $AB$  (рис. 1.4).

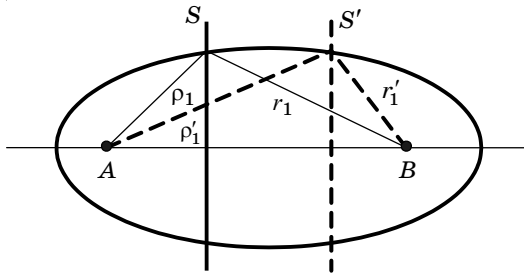


Рис. 1.4. Пространственные зоны Френеля

Для любого положения этой плоскости будут справедливы равенства, описывающие границу данной зоны Френеля:

$$\rho_1 + r_1 = \rho'_1 + r'_1 = AB + \lambda/2 = \text{const}. \quad (1.21)$$

Равенства (1.21) описывают эллипсы с полюсами в точках  $A$  и  $B$ , где расположены излучатель и приёмник. Следовательно, в пространстве первая зона Френеля представляет собой эллипсоид вращения с осью вращения — линией  $AB$ . Зоны высших номеров — часть пространства между соседними

эллипсоидами вращения. Таким образом, если мы ограничимся конечным числом зон, конфигурация области, существенной при распространении радиоволн, — это эллипсоид вращения с полюсами в точках расположения излучателя и приёмника.

Посмотрим теперь, все ли зоны Френеля необходимо учитывать в результирующем поле. Вернемся к системе уравнений (1.14). Согласно этим равенствам вторичные источники, расположенные на границах двух соседних зон, излучают волны, приходящие в точку наблюдения в противофазе. Найдём суммарное поле, обусловленное всеми зонами Френеля.

В практике распространения радиоволн расстояние между излучателем и точкой наблюдения всегда велико по сравнению с длиной волны, т.е. всегда интересуются полем в дальней зоне. Следовательно, всегда выполняется условие  $\rho_0 + r_0 \gg 1$ . Будем считать, что также выполняется условие  $\rho_0 \gg 1$ ;  $r_0 \gg 1$ .

При этих условиях, при переходе от одной зоны к другой, амплитуда колебаний каждого элемента площади  $S_n$  меняется незначительно. Ещё меньше меняется амплитуда колебаний при перемещениях в пределах одной зоны. Разделим каждую зону Френеля на некоторое число равных по площади колец. При этом волны, создаваемые каждым кольцом, почти не будут отличаться по амплитуде друг от друга, но будут отличаться по фазе. Например, при делении первой зоны на четыре кольца фазы колебаний источников двух соседних колец будут отличаться на  $45^\circ$ . Суммирование векторов напряженностей поля в пределах первой зоны для этого случая можно изобразить так, как они изображены на рис. 1.5,а.

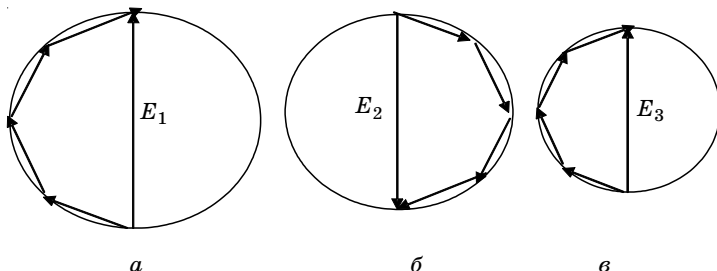


Рис. 1.5. Суммирование векторов напряженности электрического поля

Результирующий вектор волны от вторичных источников второй зоны  $\vec{E}_2$  будет направлен противоположно вектору  $\vec{E}_1$  (рис. 1.5,б). Он будет короче вследствие увеличения расстояния  $\rho$  и  $r$  (см. рис. 1.2). Результирующий вектор  $\vec{E}_3$  (рис. 1.5,в) будет меньше по длине  $\vec{E}_2$  и направлен противоположно последнему. Таким образом, результирующую напряженность поля, создаваемого всеми  $n$  зонами Френеля, можно представить в виде знакопеременного ряда

$$E_{\Sigma} = E_1 - E_2 + E_3 - E_4 + \dots (-1)^{n-1} \cdot E_n.$$

Поскольку соседние члены ряда мало отличаются друг от друга, каждый член ряда можно считать равным среднему арифметическому из двух соседних:

$$\begin{aligned} E_{\Sigma} = \frac{E_1}{2} + \left( \frac{E_1}{2} - E_2 + \frac{E_3}{2} \right) + \left( \frac{E_3}{2} - E_4 + \frac{E_5}{2} \right) + \dots \\ \dots + \left( \frac{E_{n-2}}{2} - E_{n-1} + \frac{E_n}{2} \right) + \frac{E_n}{2}. \end{aligned} \quad (1.22)$$

Ряд (1.22) сходящийся. При  $n \rightarrow \infty$  величины в каждой из скобок близки к нулю и результирующая напряженность поля стремится к половине значения напряженности поля, создаваемого первой зоной:

$$E_{\Sigma} \longrightarrow \frac{E_1}{2}.$$

Такой результат обусловлен тем, что поля, создаваемые зонами высших номеров, взаимно компенсируются.

Таким образом, получаем важный вывод: результирующее поле в точке наблюдения в основном создаётся волнами вторичных излучателей, расположенных в пределах первых нескольких зон Френеля. Вклад остальных зон Френеля в силу быстрой сходимости ряда пренебрежимо мал.

Из проведенного анализа можно сделать вывод о том, что существует область пространства, существенно участвующая в распространении радиоволн. Эта область ограничена эллипсоидом вращения, соответствующим внешней границе пространственной зоны Френеля с небольшим номером.

Эллипсоид существенной области тем больше вытянут, чем меньше длина радиоволны  $\lambda$ . При  $\lambda \rightarrow 0$  эллипсоид превращается в линию, соединяющую источник и точку наблюдения, называемую лучом. Так, в оптике существует раздел геометрическая оптика, в которой волны заменяют лучами. В общем случае такая замена справедлива и для радиоволн других диапазонов, но только при отсутствии препятствий с конечными размерами. При падении волны на тело с конечными размерами геометрическая оптика дает принципиально неверные результаты. Например, полное отсутствие поля в области тени (за препятствием). Заметим, что подход, основанный на принципе Кирхгофа и зонах Френеля, называется физической или волновой оптикой.

Применим полученные результаты к рассмотрению вопроса о дифракции радиоволн. Рассмотрим два вида препятствий: непрозрачный экран с круглым отверстием и непрозрачную полуплоскость.

Пусть на пути радиоволны расположен экран с отверстием, центр которого совпадает с линией  $AB$  (рис. 1.6).

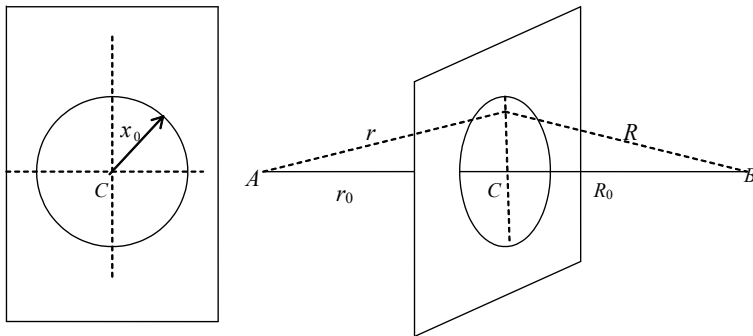


Рис. 1.6. Дифракция радиоволн на круглом отверстии в плоском экране

Для расчета поля в точке наблюдения применим формулу Кирхгофа (1.13). Пусть в качестве передающей антенны используется точечный ненаправленный (изотропный) излучатель, поле которого можно представить как

$$\varphi(r) = A \frac{e^{-jkr}}{r}, \quad (1.23)$$

где  $A$  — постоянная, зависящая от мощности источника.

Тогда формуле Кирхгофа можно придать вид

$$\varphi(x_0) = -\frac{jAk}{2} \int_0^{x_0} \frac{e^{-jk(r+R)}}{rR} \left( \frac{r_0}{r} + \frac{R_0}{R} \right) x dx, \quad (1.24)$$

где  $x$  — текущий радиус на отверстии;  $r_0$  — расстояние от точки  $A$  до центра отверстия;  $R_0$  — расстояние от центра отверстия до точки приема  $B$ ;  $x_0$  — радиус отверстия;  $r = \sqrt{r_0^2 + x^2}$ ;  $R = \sqrt{R_0^2 + x^2}$ .

Если поле, определяемое формулой (1.24), нормировать по отношению к полю в свободном пространстве и перейти к безразмерным расстояниям  $kr$ , сохраняя прежние обозначения, то формуле (1.24) можно придать вид

$$\begin{aligned} \varphi(kx_0) &= \frac{k(r_0 + R_0)}{2} e^{jk(r_0 + R_0)} \times \\ &\times \int_0^{kx_0} \frac{e^{-jk[r(x) + R(x)]}}{r(x)R(x)} \left[ \frac{r_0}{r(x)} + \frac{R_0}{R(x)} \right] x dx. \end{aligned} \quad (1.25)$$

В качестве иллюстрации на рис. 1.7 приведена функция  $|\varphi(kx_0)|$ , построенная по формуле (1.25). В расчетах принималось, что  $R_0 = r_0 = 10\pi$ , что соответствует реальным расстояниям  $5\lambda$ .

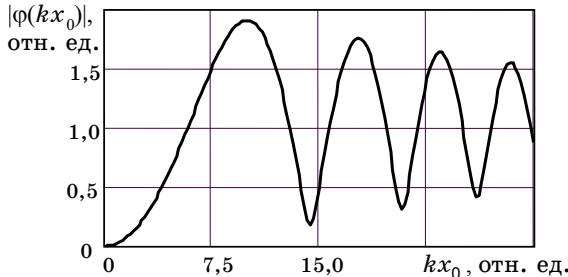


Рис. 1.7. Дифракция радиоволн на круглом отверстии в плоском экране

Если радиус отверстия плавно увеличивать от  $x_0 = 0$ , то напряженность поля за экраном в точке приема  $B$  будет возрастать и достигнет максимума при  $x_0 = R_1$ , т. е. при  $x_0$ , равном радиусу первой зоны Френеля. В дальнейшем изменение величины напряженности поля носит осциллирующий характер: возрастает при  $x_0$ , равном радиусу нечетной зоны Френеля, и уменьшается при  $x_0$ , равном радиусу четной зоны. Причем с увеличением номера зоны амплитуда осцилляций уменьшается и напряженность поля стремится к величине поля в свободном пространстве. Значения максимумов и минимумов функции соответствуют открытым нечетным и четным зонам Френеля. Если закрыть все четные зоны специальным экраном и оставить открытыми только нечетные зоны — получим зонную пластинку. Она будет действовать как собирающая линза, поскольку волны от нечетных зон приходят в фазе в точку наблюдения.

Рассмотрим второй пример — дифракцию волны на краю непрозрачного экрана. Для упрощения вычислений ограничимся случаем, когда экран находится в дальней зоне источника. В этом случае волну, падающую на экран, можно считать плоской, т.е.  $\varphi_S = \text{const}$ , и формуле (1.24) можно придать вид [8]

$$\varphi(P) = \frac{j\varphi_S}{R_0\lambda} \int_{x_0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{\frac{-jk}{2R_0}(x^2+y^2)} dx dy. \quad (1.26)$$

Интегралы в (1.26) вычисляются после замены переменных

$$u = x \sqrt{\frac{k}{\pi R_0}}, \quad v = y \sqrt{\frac{k}{\pi R_0}}$$

через специальные функции — интегралы Френеля.

$$C(u_0) = \int_0^{u_0} \cos \frac{\kappa u^2}{2} du, \quad S(u_0) = \int_0^{u_0} \sin \frac{\kappa u^2}{2} du,$$

$$\varphi(u_0) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \frac{1-j}{2} - C(u_0) + jS(u_0) \right]. \quad (1.27)$$

Интегралы Френеля хорошо табулированы [9]. Результаты вычислений функции  $\varphi(u_0)$  представлены на рис. 1.8.

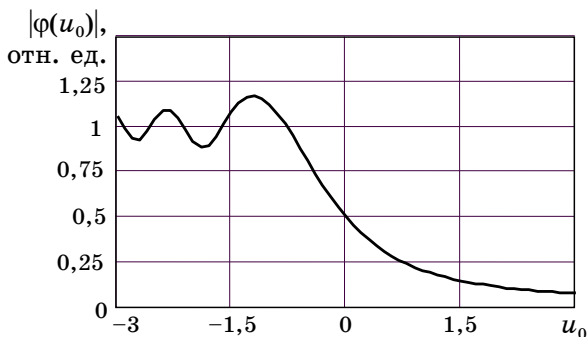


Рис. 1.8. Дифракция радиоволн на краю экрана

При больших положительных  $x_0$  (или  $u_0$ ) экран перекрывает линию  $AB$  и поле в точке  $P$  практически отсутствует. По мере опускания экрана поле монотонно возрастает. Когда экран достигает линии  $AB$ , поле составляет половину от поля при отсутствии экрана. При дальнейшем опускании экрана поле в точке  $P$  осциллирует. Глубина осцилляций здесь не так велика, как в случае круглого отверстия, так как основная площадь зон Френеля уже открыта.

Понятие зон Френеля широко используется на практике при распространении радиоволн при наличии каких-либо препятствий. Например, при расчете радиорелейных линий высоты подвеса антенн выбирают так, чтобы местные предметы на трассе (деревья, возвышенности, строения) не перекрывали существенной области распространения радиоволн, которая включает несколько первых зон Френеля. Дифракция на краю непрозрачного экрана является моделью распространения радиоволн в условиях гористой местности. Зонные пластинки используются на вершинах горных хребтов как ретрансляторы телевизионных сигналов. Радиолокационные станции, работающие на метровых волнах, используют отражение от Земли для формирования диаграммы направленности антенн. Определение размеров площадки, которую необходимо очистить около антенны, также проводят на основе понятия «зона Френеля» [3].



### 1.4. Классификация радиоволн по способу распространения

В предыдущих разделах мы рассчитывали величину поля радиоволн в свободном пространстве. Хотя реально такого пространства в природе не существует, однако космическому пространству, в первом приближении, можно приписать свойства однородной изотропной среды, т.е. свободного пространства. Можно считать, что распространение радиоволн в космосе происходит по прямолинейным траекториям и с постоянной скоростью.

В большинстве случаев мы имеем дело с такими линиями радиосвязи, которые находятся в непосредственной близости от Земли. В этом случае нельзя пренебречь ни близостью Земли, ни влиянием окружающей её атмосферы на процессы распространения радиоволн. Основными факторами, воздействующими в данном случае на распространение радиоволн, являются:

- 1) близость Земли и сферичность её поверхности;
- 2) воздействие неоднородностей тропосферы — нижней, прилегающей к Земле части атмосферы. Её высота составляет 10–15 км над уровнем земной поверхности;
- 3) влияние ионосферы — верхних ионизированных слоёв атмосферы, расположенных в интервале высот от 60–80 км до 1000 км над поверхностью Земли.

Кратко рассмотрим влияние этих факторов. Влияние Земли в основном сводится к следующему. При распространении радиоволн вдоль линии связи имеет место отражение радиоволн от земной поверхности. В этом случае поле в точке приема  $B$  над поверхностью Земли будет представлять собой интерференционную картину полей двух волн — прямой и отраженной от поверхности Земли (рис. 1.9).

При низко расположенных антеннах выделить по отдельности прямую и отраженную волны не представляется возможным, и волна распространяется вдоль поверхности Земли, испытывая при этом поглощение и некоторое изменение фазовой скорости.

На характер распространения радиоволн над поверхностью Земли влияет и сферичность Земли (рис. 1.10). Вопрос о том, как велико поле в области тени, создаваемой выпуклостью Земли, в какой степени радиоволны способны за счет дифракции преодолеть эту выпуклость, зависит от длины волны. Как известно, явление дифракции заметно проявляется, когда размер препятствия сравним с длиной волны, поэтому наиболее ярко дифракция проявляется на длинных волнах.

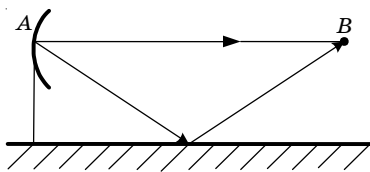


Рис. 1.9. Схема распространения радиоволн при поднятых антеннах

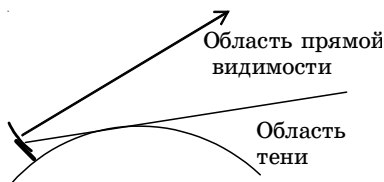


Рис. 1.10. Влияние сферичности Земли на распространение радиоволн

На распространение радиоволн значительное влияние оказывает и рельеф земной поверхности. Причем чем короче длина волны, тем это влияние сильнее. Радиоволны, распространяющиеся в непосредственной близости от поверхности Земли и частично огибающие её выпуклость вследствие явления дифракции, получили название земных радиоволн.

Тропосфера представляет собой неоднородную среду. Свойства её под действием метеоусловий меняются во времени. Тропосфера характеризуется постепенным уменьшением показателя преломления воздуха с высотой и обладает локальными неоднородностями показателя преломления.

Плавное изменение показателя преломления с высотой приводит к искривлению траектории радиоволн (рефракции) и способствует, как правило, повышению дальности распространения радиоволн из-за огибания ими земного шара.

Локальные неоднородности тропосферы вызывают рассеяние радиоволн (рис. 1.11). Влияние рассеяния проявляется только на волнах короче 1 метра. При более длинных волнах поле в области тени обусловлено дифракцией. Рассеянные радиоволны могут достигать точек на поверхности Земли, отстоящих от передатчика на расстояние до тысячи километров.

Радиоволны, распространяющиеся на значительные расстояния за счет рассеяния в тропосфере и волноводного действия тропосферы (рефракции), получили название тропосферных радиоволн.

Ионизированная часть атмосферы — ионосфера — содержит значительное количество положительно заряженных ионов и свободных электронов. Радиоволны с длиной волны более 10 метров отражаются от ионосферы и не могут покинуть пределы земной атмосферы. Для более коротких волн (в том числе оптических) ионосфера является прозрачной.

Отраженные ионосферой радиоволны, падая на полупроводящую поверхность Земли и также отражаясь от неё, могут вновь отразиться от ионосферы. В результате подобного многократного отражения радиоволны могут попасть в сколь угодно удаленные точки земной поверхности и даже несколько раз обогнуть земной шар (рис. 1.12).

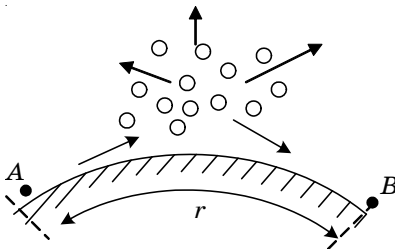


Рис. 1.11. Тропосферная линия связи за счёт рассеяния на неоднородностях тропосферы

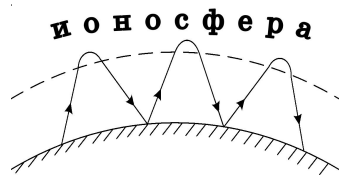


Рис. 1.12. Распространение радиоволн за счет отражения от ионосферы

Радиоволны, распространяющиеся на большие расстояния в результате однократного или многократного отражения от ионосферы, а также радиоволны, рассеивающиеся на неоднородностях ионосферы, называются ионосферными радиоволнами.

## 1.5. Понятие о функции ослабления

В предыдущих разделах мы отметили существенное влияние близости Земли и окружающей её атмосферы на процессы распространения радиоволн. Наличие этих факторов приводит

к тому, что поле на приёмном конце радиолинии, находящейся в земных условиях, будет отлично от поля в свободном пространстве. Для учета этих факторов вводится функция или коэффициент ослабления

$$E_m = E_{0m} V(r) = \frac{\sqrt{60PD}}{r} V(r), \quad (1.28)$$

где  $E_{0m}$  — амплитуда напряженности электрического поля в свободном пространстве;  $D$  — коэффициент направленного действия;  $P$  — мощность, излучаемая антенной.

Из последней формулы следует выражение для функции ослабления:

$$V(r) = \frac{E_m}{E_{0m}},$$

или в децибелах

$$V(r) = 20 \lg \frac{E_m}{E_{0m}}. \quad (1.29)$$

Представление функции ослабления в децибелах удобно тем, что общие потери на линии связи теперь могут быть определены как

$$L_\Sigma = L_0 + D_1 + D_2 + V(r), \quad (1.30)$$

где  $L_0$  — основные потери в радиолинии, определяются по формуле (1.11);  $D_1$  и  $D_2$  — коэффициенты направленного действия передающей и приемной антенн, выраженные в децибелах;  $V(r)$  — функция ослабления в децибелах.

Плотность потока мощности, излучаемого передающей антенной, с учетом функции ослабления имеет вид

$$\Pi = \frac{P \cdot D}{4\pi r^2} V^2(r). \quad (1.31)$$

Эти формулы показывают, что с точки зрения распространения радиоволн основной задачей расчета линии связи является определение функции ослабления в различных условиях распространения земных, тропосферных, ионосферных волн. К определению функции ослабления  $V(r)$  при различных встречающихся на практике случаях распространения радиоволн и сводится, по существу, основное содержание дальнейших разделов пособия.

## Контрольные вопросы

1. Объясните физическую причину ослабления напряженности поля в свободном пространстве.
2. Как зависит амплитуда напряженности поля и величина вектора Пойнтинга от расстояния в свободном пространстве?
3. Получите формулу идеальной радиосвязи в свободном пространстве.
4. Поясните физический смысл коэффициента направленного действия антенны. Как зависит напряженность поля в точке приема от КНД передающей антенны?
5. В чем состоит принцип Гюйгенса?
6. Как строятся зоны Френеля?
7. Как определяется область пространства, существенная для распространения радиоволн? Как изменяться эта область при увеличении частоты радиоволны?
8. Опишите влияние Земли, тропосферы и ионосферы на распространение радиоволн.
9. Между тропосферой и ионосферой на высоте от 10 до 80 километров находится область атмосферы — стратосфера. Почему существование стратосферы не учитывается при распространении радиоволн?

## **2. Распространение земных радиоволн при поднятых антеннах**

Строгое решение задачи о распространении земных радиоволн над реальной поверхностью Земли в общем случае весьма сложно. Поэтому при теоретическом изучении и расчете земных радиотрасс пользуются некоторыми упрощенными моделями. Во-первых, полагают, что атмосфера — однородная, не поглощающая среда; во-вторых, полагают, что поверхность Земли гладкая и однородная на протяжении всей трассы, в-третьих, все случаи распространения земных радиоволн условно делят на три категории:

- а) распространение при поднятых антеннах в зоне освещенности;
- б) распространение при низко расположенных антеннах над плоской поверхностью Земли;
- в) распространение в области тени и полутени.

Во всех этих случаях важную роль играют электрические параметры земной поверхности:  $\epsilon_r$  — относительная диэлектрическая проницаемость и  $\sigma$  — удельная проводимость. Относительную магнитную проницаемость  $\mu_r$  для практически всех типов земной поверхности можно считать равной единице.

### **2.1. Электрические параметры различных типов земной поверхности**

Параметры реальной поверхности Земли отличаются большим разнообразием даже в пределах одной местности. Кроме того, эти параметры зависят от частоты (или длины волны), на которой они определяются. В табл. 2.1 приведены некоторые усредненные значения электрических параметров реальных почв или диапазон изменения этих значений с указанием использованной при измерениях длины волны [2].

Известно, что в любой немагнитной среде такие параметры электромагнитной волны, как фазовая скорость, длина волны в среде, коэффициент затухания определяются через  $\epsilon_r$  и  $\sigma$  [7, 10, 11]. Нас в дальнейшем будут интересовать коэффициенты отражения плоских волн с различной поляризацией от

границы раздела воздух — данная среда. Параметры воздуха при этом принимаются такие же, как и у вакуума. Напомним, что у вертикально поляризованной волны вектор  $\vec{E}$  лежит в плоскости падения, а у горизонтально поляризованной — перпендикулярен ей. Плоскость падения — плоскость, проходящая через направление распространения волны и нормаль к поверхности. При записи коэффициентов отражения удобно пользоваться понятием относительной комплексной диэлектрической проницаемости

$$\dot{\epsilon}_r = \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} = \epsilon_r - j60\lambda\sigma. \quad (2.1)$$

Комплексные коэффициенты отражения волн с вертикальной  $\dot{R}_B$  и горизонтальной  $\dot{R}_T$  поляризацией можно записать в виде [10,11]

$$\dot{R}_B = \frac{\dot{\epsilon}_r \cos \varphi - \sqrt{\dot{\epsilon}_r - \sin^2 \varphi}}{\dot{\epsilon}_r \cos \varphi + \sqrt{\dot{\epsilon}_r - \sin^2 \varphi}}, \quad \dot{R}_T = \frac{\cos \varphi - \sqrt{\dot{\epsilon}_r - \sin^2 \varphi}}{\cos \varphi + \sqrt{\dot{\epsilon}_r - \sin^2 \varphi}}, \quad (2.2)$$

где  $\varphi$  — угол падения, отсчитываемый от нормали к поверхности. Формулы (2.2) носят название формул Френеля.

В реальных условиях распространения радиоволн, когда высота антенн много меньше расстояния между ними, угол падения близок к  $90^\circ$  и удобно ввести угол скольжения  $\gamma = 90^\circ - \varphi$ . Угол  $\gamma$  отсчитывается от горизонтальной плоскости.

Известно, что коэффициенты отражения определяются как  $\dot{R} = \dot{E}_{\text{отр}} / \dot{E}_{\text{пад}}$ , где  $\dot{E}_{\text{отр}}$  и  $\dot{E}_{\text{пад}}$  — комплексные амплитуды напряженности электрического поля отраженной и падающей волн в точке отражения. При этом модуль коэффициента отражения характеризует изменение амплитуды волны при отражении, а его фаза — изменение фазы волны.

На рис. 2.1 показана зависимость модуля и фазы коэффициентов отражения от угла  $\varphi$  для сухой почвы с параметрами  $\epsilon_k = 6$ ,  $\sigma = 0,02$  при длине волны  $\lambda = 6$  м.

Из рис. 2.1 видно, что коэффициент отражения при горизонтальной поляризации по модулю больше, чем при вертикальной. Фаза коэффициента  $R_T$  близка к  $\pi$  ( $180^\circ$ ), фаза коэффициента  $R_B$  меняется от  $0^\circ$  при вертикальном падении волны до  $180^\circ$  при пологом падении. Такое поведение коэффициентов

отражения характерно для большинства реальных поверхностей Земли. При отражении от идеального диэлектрика минимальный модуль коэффициента отражения  $R_B$  становится равным нулю и угол, при котором это происходит, называется углом Брюстера [7,10]. Если поверхность Земли можно считать идеально проводящей ( $\sigma \rightarrow \infty$ ), то  $R_B = 1$ ,  $R_T = -1$ . Изменения, происходящие при этом с кривыми рис. 2.1, условно показаны стрелками.

Таблица 2.1  
Электрические параметры различных типов  
земной поверхности на разных длинах волн

Тип поверхности	$\lambda$	$\varepsilon_r$	$\sigma$ [1/Ом·м]
Морская вода	>1 м	75	1÷6
	10 см	70	1÷6
	3 см	65	10÷20
Пресная вода водоемов	>1 м	80	0,01÷0
	10 см	75	1÷2
	3 см	65	10÷20
Влажная почва	>1 м	20÷30	0,02÷0,3
	10 см	20÷30	0,5÷1
	3 см	10÷20	1÷3
Сухая почва	>1 м	3÷6	$10^{-5} \div 10^{-3}$
	10 см	3÷6	0,01÷0,07
	3 см	3÷6	0,1÷0,2
Снег ( $t = -10^\circ\text{C}$ )	>1 м	1,2	$10^{-6}$
	10 см	1,2	$10^{-5}$
	3 см	1,2	$10^{-5}$
Лес	>10 м	1,004	$10^{-6} \div 10^{-5}$
	10 см	1,04÷1,4	$10^{-5} \div 10^{-3}$



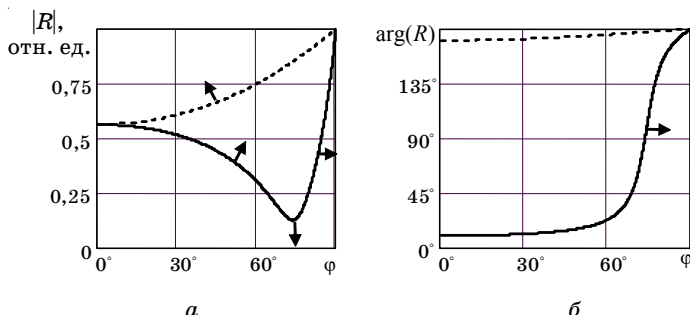


Рис. 2.1. Зависимость модуля  $|R|$  (а) и фазы  $\arg(R)$  (б) коэффициентов отражения от угла падения  $\varphi$  для сухой почвы

( $\varepsilon_r = 10$ ,  $\sigma = 0,1$ ) и  $\lambda = 6$  м:

— вертикальная поляризация  
 ..... горизонтальная поляризация

## 2.2. Расстояние прямой видимости

Уточним термин «поднятая антенна». «Поднятая антенна» — антенна, поднятая на высоту, по крайней мере в несколько раз большую длины волны излучения. Практически с поднятыми антеннами встречаются только в диапазоне УКВ и в редких случаях — КВ. Типичные примеры поднятых антенн — антенны телецентров, радиолокационных станций, радиорелейных линий.

Пусть передающая и приемная поднятые антенны расположены в точках  $A$  и  $B$  на высотах соответственно  $h_1$  и  $h_2$  над поверхностью Земли (рис. 2.2). Поверхность Земли — гладкая сфера радиуса  $R_0$ ; расстояние между антеннами равно  $r$ . Для наглядности реальные масштабы на рис. 2.2 сильно искажены. Область, существенно участвующая в распространении радиоволн, ограничена эллипсоидом вращения, приближенно совпадающим с первой пространственной зоной Френеля.

Из рисунка 2.2 видно, что если соотношение между  $r$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  такое, что первая зона Френеля не достигает выпуклости Земли, то возможно прямолинейное распространение радиоволн между точками  $A$  и  $B_1$  или  $A$  и  $B_2$ . В противном случае Земля будет препятствием, за которое радиоволны могут попасть только путём дифракции. Поле в этом случае оказывается сильно

ослабленным, так как в распространении радиоволн участвуют лишь часть первой зоны Френеля и зоны высших порядков, также искажённые Землёй.

Расстоянием прямой видимости называется такое расстояние между двумя точками, расположенными над поверхностью Земли, при котором прямая, их соединяющая, касается поверхности Земли. На рис. 2.3 точки  $A$  и  $B$  находятся на расстоянии прямой видимости. Обозначим его  $r_0$ .

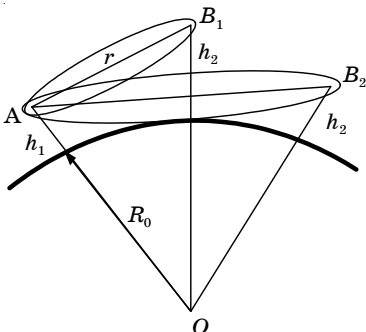


Рис. 2.2. Влияние сферичности Земли на распространение радиоволн при поднятых антеннах

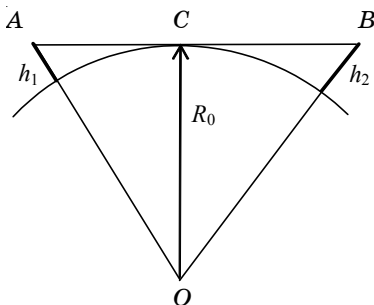


Рис. 2.3. Определение расстояния прямой видимости

Тогда из рис. 2.3 следует:

$$\left. \begin{aligned} r_0 &= AC + CB; \\ AC &= \sqrt{(R_0 + h_1)^2 - R_0^2} \approx \sqrt{2R_0 h_1}; \\ CB &= \sqrt{(R_0 + h_2)^2 - R_0^2} \approx \sqrt{2R_0 h_2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Следовательно, расстояние прямой видимости будет

$$r_0 = \sqrt{2R_0} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}). \quad (2.4)$$

Подставляя величину  $R_0 = 6370$  км и  $h_1$  и  $h_2$  в метрах, получим значение для  $r_0$  в километрах:

$$r_0 = 3,57 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}). \quad (2.5)$$

Принято считать, что если протяженность трассы  $r < 0,2 r_0$ , то поверхность Земли можно считать плоской. При  $r < 0,8 r_0$  нужно учитывать сферичность Земли, хотя еще можно

разделить прямую и отраженную волны в точке приема. Это нельзя сделать в области полутени ( $0,8r_0 \leq r < 1,2r_0$ ) и тем более тени ( $r \geq 1,2r_0$ ). В эти области поле проникает за счет дифракции.

С наиболее простого случая поднятых над плоской землей антенн мы и начнем изучать распространение земных радиоволн.

## 2.3. Распространение радиоволн при поднятых антеннах и плоской Земле

### 2.3.1. Интерференционная формула

Рассмотрим схему распространения радиоволн, когда приёмная и передающая антенны подняты над плоской поверхностью Земли (рис. 2.4). Пусть  $r$  — длина линии связи, а приёмная и передающая антенны подняты над землёй на высоту  $h_1 \geq \lambda$  и  $h \geq \lambda$  соответственно.

В данном случае поле в точке приёма является результатом интерференции прямой волны ( $AB$ ) и отраженной ( $ACB$ ). Для определения положения точки отражения на поверхности Земли следует построить зеркальное изображение точки  $A$  (точка  $A_1$ ) и соединить ее с точкой  $B$ . При таком построении в точке  $C$  будет выполняться закон отражения — угол отражения равен углу падения и  $ACB = A_1CB$ . На рис. 2.4 изображена также диаграмма направленности антенны  $F(\theta)$  в свободном пространстве. Очевидно, что поле в точке наблюдения  $B$  будет векторной суммой полей прямой и отраженной волн:

$$\vec{E}(B) = \vec{E}_1(B) + \vec{E}_2(B), \quad (2.6)$$

где поля  $E_1$  и  $E_2$  могут быть определены как поля в свободном пространстве.

С учетом коэффициента отражения в точке  $C$  величины полей  $E_1$  и  $E_2$  в точке  $B$  будут определяться соотношениями

$$\left. \begin{aligned} E_1(B) &= AF(\theta_1) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1}; \\ E_2(B) &= AF(\theta_2) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \dot{R}(\varphi), \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

где  $A = \sqrt{60PD}$ ;  $\varphi$  — угол падения отраженной волны в точке  $C$ ;  $F(\theta_1)$  и  $F(\theta_2)$  — значения диаграммы направленности антенны в направлении прямой и отраженной от поверхности волн, угол  $\theta$  отсчитывается от горизонтальной плоскости;  $r_1 = AB$ ,  $r_2 = ACB = A_1B$ .

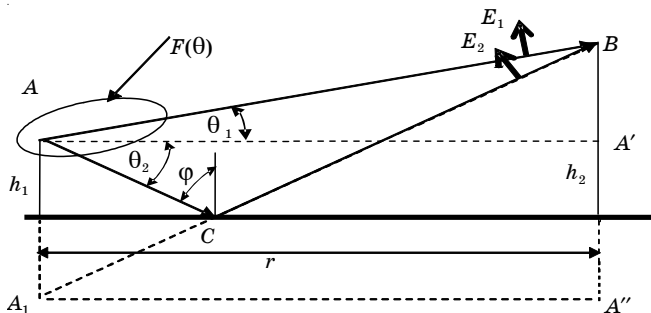


Рис. 2.4. Поднятые антенны над плоской поверхностью Земли

Формула (2.6), описывающая поле в точке наблюдения как сумму полей падающей и отраженной волн, является общим выражением интерференционной формулы.

В большинстве реальных случаев расстояние между антеннами много больше их высот, т.е.

$$r \gg h_1 \text{ и } r \gg h_2. \quad (2.8)$$

При выполнении этих условий в интерференционной формуле можно сделать следующие допущения:

- 1) вектора  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  в точке  $B$  можно считать параллельными. Это позволяет векторную сумму заменить алгебраической;
- 2) расстояния  $r_1$  и  $r_2$  в знаменателях формул (2.6), определяющие амплитуды полей в точке наблюдения, можно считать одинаковыми и равными  $r$  — расстоянию по поверхности Земли;

3) коэффициент отражения можно определять по формулам Френеля для плоских волн (2.2), хотя реально отраженная волна в точке  $C$  является сферической.

В результате формуле (2.6) можно придать вид

$$E(B) = AF(\theta_1) \frac{e^{-jkr_1}}{r} \left[ 1 + \frac{F(\theta_2)}{F(\theta_1)} \dot{R}(\varphi) e^{-jk\Delta r} \right], \quad (2.9)$$

где  $\Delta r = r_2 - r_1$  — разность хода отраженной и прямой волн.

Выражение в квадратных скобках формулы (2.9) является коэффициентом ослабления  $V(r)$  и называется в данном случае интерференционным множителем или множителем Земли.

На практике обычно представляет интерес только амплитуда поля в точке наблюдения, т.е. модуль выражения (2.9)

$$E(B) = |\dot{E}(B)| = \frac{A}{r} |V(r)| F(\theta_1), \quad (2.10)$$

где

$$|\dot{V}(r)| = V(r) = \sqrt{1 + \left( \frac{F(\theta_2)}{F(\theta_1)} |R| \right)^2 + \frac{F(\theta_2)}{F(\theta_1)} |R| \cos(k\Delta r + \Phi)}, \quad (2.11)$$

где  $|R|$  и  $\Phi$  — модуль и фаза коэффициента ослабления, зависящие от угла падения  $\varphi$ .

В случае слабонаправленных антенн  $F(\theta_1) \cong F(\theta_2)$  и выражение для  $V(r)$  упрощается:

$$V(r) = \sqrt{1 + |R|^2 + 2|R| \cos(k\Delta r + \Phi)}. \quad (2.12)$$

Если антенна имеет узкую диаграмму направленности и направлена под углом к горизонту, то  $F(\theta_2) \approx 0$  и  $V(r) \approx 1$ . Физически это означает, что поле антенны не попадает на Землю, отраженная волна практически отсутствует и в точке приема имеется только прямая волна. Такой случай характерен для радиолокационных станций УКВ-диапазона, антенны которых направлены под углом к горизонту.

Выразим разность хода  $\Delta r$  через высоты антенн и расстояние между ними. Обратимся к рис. 2.4. Из треугольников  $AA'B$  и  $A_1A''B$  найдем

$$r_1 = \sqrt{r^2 + (h_2 - h_1)^2} \approx r + \frac{(h_2 - h_1)^2}{2r}; \quad (2.13)$$

$$r_2 = \sqrt{r^2 + (h_2 + h_1)^2} \approx r + \frac{(h_2 + h_1)^2}{2r}, \quad (2.13a)$$

отсюда

$$r_2 - r_1 \approx \frac{2h_1 h_2}{r}. \quad (2.14)$$

Следовательно, функцию ослабления можно записать в виде

$$V(r) = \sqrt{1 + |R|^2 + 2|R| \cos\left(\frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r} + \Phi\right)}. \quad (2.15)$$

При изменении длины радиолинии  $r$  функция ослабления  $V(r)$  проходит через ряд максимумов и минимумов.

$$\text{Максимумы — при } \cos\left(\frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r} + \Phi\right) = 1.$$

$$\text{Минимумы — при } \cos\left(\frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r} + \Phi\right) = -1.$$

Значения  $V(r)$  в максимумах равны  $(1 + |R|)$ , в минимумах равны  $(1 - |R|)$ .

Рассмотрим пространственную интерференционную структуру поля, создаваемую излучателем в зависимости от длины линии связи  $r$  при постоянных высотах передающей  $h_1$  и приёмной  $h_2$  антенн.

При распространении УКВ вдоль поверхности Земли ( $\varphi \rightarrow 90^\circ$ ) формула (2.15) может быть упрощена. При малых углах скольжения  $\gamma = 90^\circ - \varphi$ , для большинства встречаемых на практике видов поверхностей Земли (море, сухая и влажная суша) модуль коэффициента отражения близок к 1, а угол потери фазы  $\Phi$  — к  $180^\circ$  (см. рис. 2.1 и объяснение к нему).

Подставляя эти величины в формулу (2.15), получим множитель ослабления в виде

$$V(r) = 2 \left| \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{h_1 h_2}{r}\right) \right|. \quad (2.16)$$

Эта формула характеризует интерференционную структуру поля, при которой множитель ослабления проходит ряд максимумов и минимумов при изменении расстояния  $r$ . Расстояния, которым соответствуют максимумы напряженности поля, можно найти из условия

$$\frac{2\pi}{\lambda} \frac{h_1 h_2}{r} = \frac{\pi}{2} (2n + 1),$$

где  $n = 0, 1, 2, \dots$  и т.д.

Отсюда следует, что первый максимум напряженности поля излучения удален от передатчика на расстояние

$$r_{\max 1} = \frac{4h_1 h_2}{\lambda}.$$

Расстояние от передатчика до первого минимума можно найти из условия

$$r_{\min 1} = \frac{2h_1 h_2}{\lambda}.$$

### 2.3.2. Диаграммы направленности поднятых антенн

Рассмотрим частный случай интерференционной формулы, когда точка приема находится в дальней зоне передающей антенны (рис 2.5).

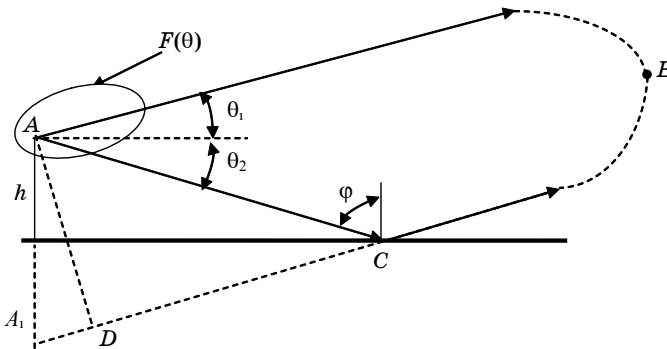


Рис. 2.5. Определение диаграммы направленности поднятой антенны

Этот случай соответствует определению диаграммы направленности передающей антенны, расположенной над поверхностью Земли. Поскольку точка  $B$  находится на бесконечном удалении, то:

- 1) лучи  $AB$  и  $A_1B$  будут параллельны;
- 2) углы  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  и  $\varphi$  связаны соотношениями  $\theta_2 = -\theta_1$ ,  $\varphi = 90^\circ - \theta_1$ . Будем в дальнейшем обозначать угол  $\theta_1$  как  $\theta$ ;
- 3) разность хода  $\Delta r = A_1D$  можно определить, опуская перпендикуляр  $AD$  из точки  $A$  на прямую  $A_1CB$ :

$$\Delta r = 2h \cos(\theta). \quad (2.17)$$

Как известно, диаграмма направленности характеризует зависимость поля в точке наблюдения от угловых координат. В данном случае в вертикальной плоскости эта зависимость будет иметь вид

$$F_{\Sigma}(\theta) = F(\theta)V(\theta), \quad (2.18)$$

поскольку разность хода  $\Delta r$  в данном случае не зависит от  $r$ , а только от угла  $\theta$ .

Для дальнейшего анализа рассмотрим случай слабонаправленных антенн ( $F(\theta_1) \approx F(\theta_2)$ ), когда интерференционный множитель представляется формулой (2.12). Заменяем в ней угол  $\theta_1$  на  $\theta$  и  $h_1$  на  $h$ :

$$V(\theta) = \sqrt{1 + |R|^2 + 2|R| \cos[2kh \cos(\theta) + \Phi]}. \quad (2.19)$$

В зависимости от поляризации поля передающей антенны рассмотрим два случая.

1. Горизонтальная поляризация.

Примером таких антенн является горизонтальный вибратор. Пусть вначале Земля считается идеально проводящей ( $\sigma = \infty$ ). Тогда согласно формулам (2.1) и (2.2)  $|R| = 1$ ,  $\Phi = \pi$  и формула (2.19) приобретает вид

$$V(\theta) = 2 \left| \sin[kh \cos(\theta)] \right|. \quad (2.20)$$

Поскольку диаграмма направленности самого вибратора в его экваториальной плоскости представляет окружность ( $F_1(\theta) = 1$ ), то  $F(\theta) = V(\theta)$ , т.е. диаграмма направленности определяется только множителем Земли  $V(\theta)$ . Графики функции  $F(\theta)$  представлены на рис. 2.6 для различных отношений  $h/\lambda$ .

Из рисунка можно сделать следующие выводы:

1) диаграмма направленности при  $h/\lambda > 0,5$  носит лепестковый характер;

2) число лепестков увеличивается с увеличением  $h/\lambda$  и в одном квадранте равно числу полуволн, укладываемых на высоте антенны;

3) первый лепесток всегда оторван от Земли и наклоняется к Земле при увеличении  $h/\lambda$ .

Для реальных почв, как следует из рис. 2.1, значения коэффициента отражения близки к  $|R| = 1$ ,  $\Phi = \pi$ , особенно при



больших углах падения, характерных в практике распространения радиоволн. Поэтому сделанные выводы можно распространить и на реальные трассы. Отличие заключается в том, что для реальных почв лепестки диаграммы направленности как бы «заплывают», т.е. значения поля между ними не будут строго равны нулю. Это объясняется тем, что реально модуль коэффициента отражения всегда меньше единицы и полной компенсации полей прямой и отраженной волн в этих направлениях не происходит.

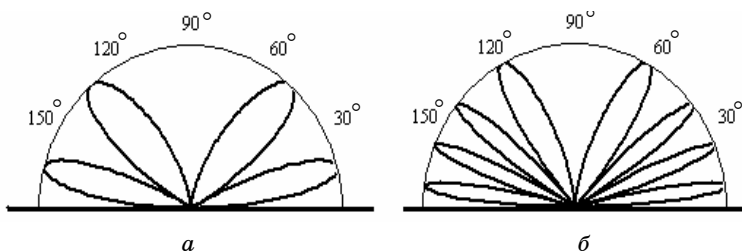


Рис. 2.6. Диаграммы направленности горизонтального вибратора над идеально проводящей Землей при  $h/\lambda = 1$  (а),  $h/\lambda = 2$  (б)

На рис. 2.7 представлены диаграммы направленности горизонтального вибратора над некоторыми почвами. Известно [7, 10], что характер среды определяется значением тангенса угла потерь

$$\operatorname{tg} \Delta = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} = \frac{60\lambda\sigma}{\varepsilon_r}. \quad (2.21)$$

Если  $\operatorname{tg} \Delta > 1$ , то среда близка к проводящей, если  $\operatorname{tg} \Delta < 1$  — к диэлектрической. На рис. 2.7 хорошо видно «заплывание» нулей диаграмм направленности. В случае, представленном на рис. 2.7,а, почва ведет себя как проводящая среда ( $60\lambda\sigma > \varepsilon_r$ ), а в случае, представленном на рис. 2.7,б, — как диэлектрическая ( $60\lambda\sigma < \varepsilon_r$ ).

Направления лепестков диаграмм направленности горизонтального вибратора можно определить из выражения (2.20), соответствующего идеально проводящей Земле, поскольку у реальных почв и горизонтальной поляризации модуль коэффициента отражения близок к 1, а фаза — к  $180^\circ$ .

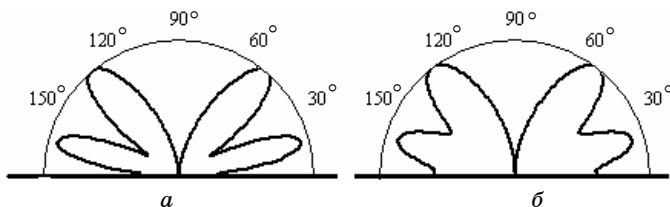


Рис. 2.7. Диаграммы направленности горизонтального вибратора над различными почвами при  $h = 2\lambda$ :  $a$  — влажная почва ( $\epsilon_r = 10$ ,  $\sigma = 1$ ,  $\lambda = 1$  м);  $b$  — сухая почва ( $\epsilon_r = 4$ ,  $\sigma = 0,01$ ,  $\lambda = 1$  м)

Заменяем в формуле (2.20) угол падения  $\theta$  на угол скольжения  $\gamma = 90^\circ - \theta$ , поскольку на практике представляют интерес лепестки, близкие к Земле, и нормируем диаграмму направленности так, чтобы ее максимальное значение было равно единице. Тогда

$$F(\gamma) = \left| \sin(kh \sin(\gamma)) \right|. \quad (2.22)$$

Из этой формулы следует, что максимумы диаграммы направленности будут соответствовать углам скольжения  $\gamma$ , при которых  $kh \cdot \sin(\gamma) = n\pi/2$ , где  $n$  определяет номер лепестка, отсчитываемый от поверхности Земли. В результате получим, что первый лепесток наклонен к горизонту на угол, определяемый соотношением

$$\sin(\gamma_{1,\max}) = \frac{\lambda}{4h}. \quad (2.23)$$

## II. Вертикальная поляризация.

Рассмотрим вначале случай идеально проводящей Земли. Коэффициент отражения равен 1, т.е.  $|R| = 1$  и  $\Phi = 0$ . Формула (2.19) приводится к виду

$$V(\theta) = 2 \left| \cos(kh \cos(\theta)) \right| = 2 \left| \cos(kh \sin(\gamma)) \right|. \quad (2.24)$$

Очевидно, что по сравнению с горизонтальной поляризацией характер поведения множителя Земли изменится на противоположный — там, где были максимумы, будут нули и наоборот. В качестве реальной антенны возьмем вертикальный вибратор. В отличие от горизонтального вибратора, собственная диаграмма направленности в вертикальной плоскости в этом случае определяется выражением  $F_1(\theta) = \cos(\theta)$  и имеет

вид, приведенный на рис. 2.8,б. На рис. 2.8 показаны множитель Земли (а), диаграмма  $F_1(\theta)$  (б) и их произведение (в), т.е. полная диаграмма направленности  $F_2(\theta) = F_1(\theta)V(\theta)$ .

У реальных почв зависимость коэффициента отражения от угла падения носит сложный характер (см. рис. 2.1). Существует как бы «неполный» угол Брюстера ( $\varphi_B$ ), при котором модуль коэффициента отражения имеет минимум, а фаза изменяется от значений, близких к  $0^\circ$ , до значений, близких к  $180^\circ$ . Поэтому диаграммы направленности от  $\varphi = 0^\circ$  до  $\varphi_B$  имеют вид, соответствующий вертикальному вибратору над идеально проводящей землей, а при  $\varphi > \varphi_B$  — горизонтальному вибратору. В частности, первый от Земли лепесток оторван от Земли, как у горизонтального вибратора.

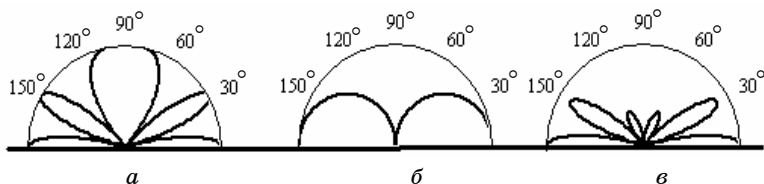


Рис. 2.8. Диаграммы направленности  $V(\theta)$  (а),  $F_1(\theta)$  (б) и  $F_2(\theta)$  (в) для вертикального вибратора и идеально проводящей почвы при  $h = \lambda$

Примеры таких диаграмм приведены на рис. 2.9 для почв с параметрами  $\varepsilon_r = 10$ ,  $\sigma = 0,1$  и  $\varepsilon_r = 10$ ,  $\sigma = 1$  при  $h = \lambda$ .

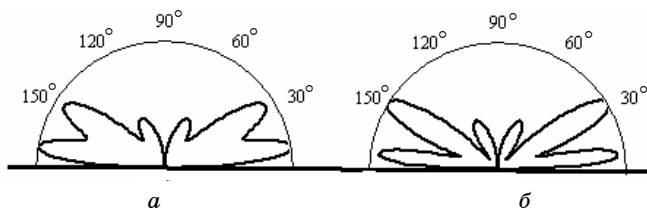


Рис. 2.9. Диаграммы направленности вертикального вибратора над почвами с параметрами:  
а —  $\varepsilon_r = 10$ ,  $\sigma = 0,1$ ; б —  $\varepsilon_r = 10$ ,  $\sigma = 1$  при  $h = \lambda$

Из рисунка видно, что увеличение проводимости почвы делает диаграмму направленности более изрезанной и первый лепесток диаграммы направленности оторван от Земли.

### 2.3.3. Условия применимости отражательной трактовки

В основе интерференционных формул лежит так называемая отражательная трактовка, согласно которой присутствие Земли учитывается введением отраженной от нее волны. Коэффициент отражения при этом определяется по формулам Френеля (2.2), справедливым для плоских волн, для геометрической точки отражения (точка  $C$  на рис. 2.4, 2.5). Такой подход характерен для геометрической оптики, когда из-за малости длины волны область, существенная для распространения радиоволн, превращается в линию и распространение волны рассматривается как распространение луча. В действительности, как следует из подразд. 1.3, наличие конечной области, существенной при распространении радиоволн, приводит к образованию подобной области на поверхности Земли для отраженной волны. Углы падения волн на различные точки этой области будут отличаться от угла падения в точку  $C$ , и поэтому коэффициенты отражения в пределах области, существенной для отражения радиоволн, будут различными. Если этим различием можно пренебречь, то падающую и отраженную волны можно считать плоскими и отражательная трактовка будет справедлива, поскольку формулы Френеля являются точными для плоских волн. Таким образом, условие применимости отражательной трактовки сводится к условию малости изменения коэффициента отражения  $|\Delta R|$  в пределах области, существенной для отражения радиоволн. Очевидно, оно может быть записано как  $|\Delta R| \ll |R|$ .

Это условие может быть приведено к виду [3]

$$2 \frac{(h_1 + h_2)^2}{\lambda r} \gg |1 - R^2|, \quad (2.25)$$

где  $h_1, h_2$  — высоты антенн;  $r$  — расстояние между антеннами;  $R$  — коэффициент отражения в точке  $C$ .

Из условия (2.25) следует важный для практики вывод: чем ближе по модулю коэффициент отражения к единице, тем при меньших высотах антенн выполняются условия отражательной трактовки. В частности, для идеально проводящей Земли отражательная трактовка справедлива при любых высотах расположения антенн.

### 2.3.4. Квадратичная формула Введенского

Диаграмма направленности антенны над Землей хотя и дает представление о распределении поля в различных направлениях, но не позволяет найти величину этого поля, поскольку определяется для бесконечно удаленных точек, где амплитуда поля стремится к нулю. Чтобы определить величину поля в точке наблюдения нужно вернуться к интерференционным формулам п. 2.3.1. В нем было показано, что в случае длинных трасс интерференционный множитель может быть представлен в виде

$$V(r) = 2 \left| \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} \frac{h_1 h_2}{r} \right) \right|. \quad (2.26)$$

Если расстояние настолько велико, что

$$\frac{2\pi}{\lambda} \frac{h_1 h_2}{r} \leq \frac{\pi}{9}, \quad (2.27)$$

то синус в формуле (2.26) можно заменить его аргументом. Совершаемая при этом ошибка не превышает 0,01. В результате получим

$$V(r) = \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r}. \quad (2.28)$$

Формула для расчета напряженности поля в этом случае принимает вид

$$E_m = \frac{\sqrt{60PD}}{r^2} \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda}. \quad (2.29)$$

Обозначение  $E_m$  в данной формуле подчеркивает, что она определяет амплитудное значение вектора  $\vec{E}$ . Иногда в инженерных расчетах используют другую форму записи формулы (2.29) [1, 2]

$$E_d = \frac{2,18\sqrt{PD}h_1 h_2}{r^2 \lambda}, \quad (2.29a)$$

где  $P$  подставляется в киловаттах;  $h_1, h_2, \lambda$  — в метрах;  $r$  — в километрах.

В этом случае действующее значение напряженности поля  $E_d$  получается в милливольтгах на метр.

Формула (2.29) была получена в 1928 году академиком Б.А. Введенским. Она характеризует зависимость напряженности электрического поля от длины линии связи, длины волны и высот расположения антенн. Следует отметить, что напряженность поля в этом случае обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r^2$ . В свободном пространстве эта зависимость более слабая и определяется как  $1/r$ . Поэтому формулу Введенского часто называют квадратичной.

Причина такой квадратичной зависимости в том, что в условиях применимости формулы Введенского оба луча — прямой и отраженный — в месте приема имеют практически одинаковые амплитуды, но фазы их сдвинуты на величину, почти равную  $180^\circ$ . Это «почти» — потеря фазы за счет разности хода

лучей  $\Delta r = \frac{2h_1 h_2}{r}$ . Результирующее поле двух лучей можно представить с помощью векторной диаграммы (рис. 2.10).

В рассматриваемых условиях отраженный луч является вредным, так как ослабляет поле прямой волны. Результирующее поле прямо пропорционально дополнительному к  $180^\circ$  углу сдвига по фазе. Этот угол  $\alpha$  мал и обратно пропорционален длине трассы  $r$ :

$$\alpha = k \Delta r = \frac{4h_1 h_2}{\lambda r}.$$

Поскольку поле в свободном пространстве само обратно пропорционально длине трассы  $r$ , то, в целом, результирующее поле обратно пропорционально квадрату расстояния. При этом, чем больше расстояние  $r$ , тем меньше разность хода  $\Delta r$  прямого и отраженного лучей, и тем больше ослабляется поле вдоль земной поверхности за счет второго, отраженного луча.

Сформулируем ограничения для использования формулы Введенского:

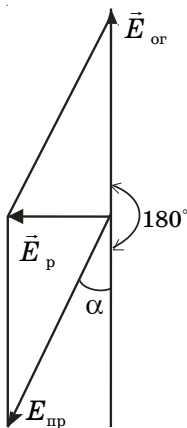


Рис. 2.10. Векторная диаграмма результирующего поля в точке приема

- 1) должны выполняться условия  $|R| > 0,95$  и  $175^\circ < \Phi < 180^\circ$ ;  
 2) формула применима при высотах подъёма антенны и расстояниях, для которых выполняется условие

$$18h_1h_2 \leq \lambda r, \quad (2.30)$$

следующее из формулы (2.27);

3) формула даёт правильные результаты только в условиях применимости отражательной трактовки;

4) формула применима для высот подъёма точки наблюдения (приёмной антенны) не выше первого максимума диаграммы направленности, определяемого формулой (2.23). При дальнейшем подъёме приёмной антенны согласно формуле Введенского напряженность электрического поля должна увеличиваться. Однако в действительности она уменьшается в соответствии с диаграммой направленности.

Несмотря на ряд допущений, сделанных при выводе формулы Введенского, расчеты по ней хорошо совпадают с экспериментом. Она имеет фундаментальное значение для расчета напряженности поля УКВ-линий связи, например в телевидении.

## 2.4. Отражение радиоволн от неровной земной поверхности. Критерий Релея

При падении волны на совершенно ровную плоскую поверхность направление отраженной волны подчиняется законам геометрической оптики. Такое отражение называется зеркальным. Если отражающая поверхность неровная, то радиоволны отражаются от неё одновременно в различных направлениях. Это — «диффузное», или рассеянное, отражение (рис. 2.11).

При этом напряженность поля отраженной волны в зеркальном направлении меньше, чем в случае ровной поверхности. В этом случае говорят об эффективном коэффициенте отражения в зеркальном направлении.

Отметим, что понятие степени неровности применительно к задачам распространения радиоволн носит относительный характер. Решающим здесь является соотношение между длиной волны и высотой неровности. Например, холмистая местность с высотой холмов порядка сотен метров по отношению к сверхдлинным волнам может быть отнесена к категории глад-

ких, но в диапазоне сантиметровых волн ровное поле, покрытое травой высотой до 10 см, должно быть отнесено к классу шероховатых поверхностей.

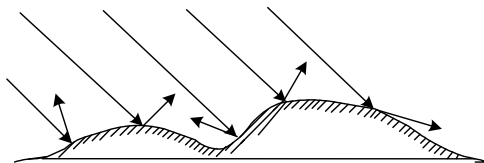


Рис. 2.11. Рассеяние радиоволн при отражении от неровной земной поверхности

Для оценки степени шероховатости поверхности используется критерий Релея.

Пусть плоская волна отражается от поверхности с неровностями, наибольшая высота которых равна  $h$  (рис. 2.12). Часть мощности падающей волны отражается на нижнем уровне  $b - b_1$ , часть — на верхнем  $a - a_1$ . Плоскость  $m - m_1$  перпендикулярна направлению распространения падающей волны. Она является плоскостью равных фаз (фазовым фронтом) падающей волны.

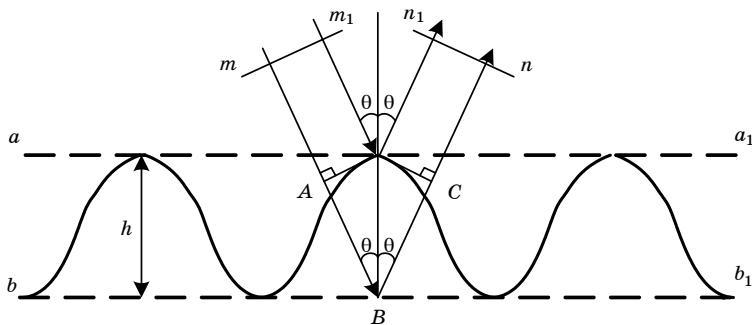


Рис. 2.12. Искажение фазового фронта волны при отражении от неровной поверхности

Определим фазовые соотношения на плоскости  $n - n_1$ , перпендикулярной направлению распространения отраженной волны.



Очевидно, что наибольшая разность фаз окажется между волнами, отраженными от верхнего и нижнего уровней неровностей. Разность хода лучей  $mn$  и  $m_1n_1$  составляет величину  $ABC = 2h \cos \theta$ . Это приводит к сдвигу фаз между лучами:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2h \cos \theta.$$

Принято считать, что если фазовые искажения на плоскости  $n - n_1$  не превышают  $\pi/4$ , то отраженную волну можно считать плоской и влиянием неровностей на отражение можно пренебречь [3].

Из этого условия можно определить допустимую высоту неровностей, т.е. высоту неровностей, при которых отражение можно считать зеркальным:

$$\Delta\varphi_{\text{доп}} = \frac{2\pi}{\lambda} 2h_{\text{доп}} \cos \theta \leq \frac{\pi}{4}.$$

Отсюда

$$h_{\text{доп}} \leq \frac{\lambda}{16 \cos \theta}. \quad (2.31)$$

Соотношение (2.31) называют критерием Релея. Этот критерий показывает, что при данной высоте неровностей отражение ближе к зеркальному для пологих лучей. Влияние неровностей земной поверхности тем сильнее, чем короче длина волны.

## 2.5. Учет сферичности Земли в интерференционных формулах

Полученные ранее формулы справедливы для плоской поверхности Земли. Землю принято считать плоской, если длина линий радиосвязи удовлетворяет соотношению  $r < 0,2r_0$ , где  $r_0$  — расстояние прямой видимости.

Пусть условие применимости отражательной трактовки выполняется, тогда схема распространения прямого и отраженного лучей над поверхностью земли будет иметь вид, приведенный на рис. 2.13.

Проведем через точку  $C$  плоскость  $MN$ , касательную к земному шару. Высоты антенн будем отсчитывать от этой плос-

кости. Точка  $C$  — точка отражения радиоволны. В этом случае картина распространения радиоволн над сферической землей будет аналогична картине распространения радиоволн над плоской поверхностью  $MN$ . Очевидно, что все рассмотренные ранее методы расчета напряженности поля над плоской Землей могут быть распространены на сферическую Землю при замене действительных высот антенн  $h_1$  и  $h_2$  на приведенные  $h'_1$  и  $h'_2$ .

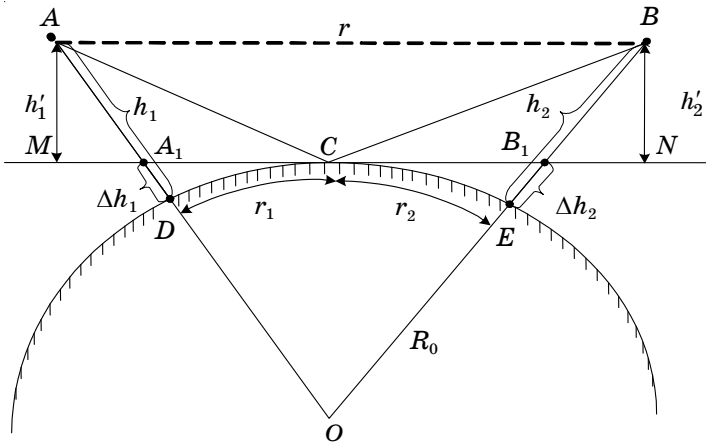


Рис. 2.13. Учет влияния сферичности Земли на распространение радиоволн

Таким образом, проблема учета кривизны Земли при использовании интерференционных формул сводится к проблеме нахождения приведенных высот  $h'_1$  и  $h'_2$  по известным высотам  $h_1$  и  $h_2$  и расстоянию между антеннами. Если бы рисунок был изображен с соблюдением масштаба, то было бы видно, что приведенные и реальные высоты  $h'_1$  и  $h_1$ ,  $h_2$  и  $h'_2$  почти не имеют углового расхождения и можно считать

$$h'_1 \cong h_1 - \Delta h_1; \quad h'_2 \cong h_2 - \Delta h_2. \quad (2.32)$$

Отметим, что  $r_1$  и  $r_2$  соответствуют расстоянию прямой видимости при высотах антенн  $\Delta h_1$  и  $\Delta h_2$  и, следовательно, можно, согласно формуле (2.4), записать:

$$\Delta h_1 \cong \frac{r_1^2}{2R_0}; \quad \Delta h_2 \cong \frac{r_2^2}{2R_0}. \quad (2.33)$$

Окончательно приведенные высоты могут быть определены из соотношений

$$h_1' = h_1 - \frac{r_1^2}{12,8}; \quad h_2' = h_2 - \frac{r_2^2}{12,8}, \quad (2.34)$$

где высоты антенн выражаются в метрах, а расстояния  $r_1$  и  $r_2$  — в километрах.

Полученные формулы показывают, что умение вычислять приведенные высоты зависит от знания расстояний  $r_1$  и  $r_2$ , т.е. от нахождения точки  $C$ . В общем случае, определение положения точки отражения  $C$  связано с громоздкими вычислениями [1, 3]. Их можно упростить, если рассматривать либо большие, либо маленькие расстояния  $r$ .

При небольших расстояниях между антеннами  $r$ , считая Землю плоской, положение точки отражения  $C$  находят по формулам

$$A_1C \approx r_1 = r \frac{h_1}{h_1 + h_2}; \quad B_1C \approx r_2 = r \frac{h_2}{h_1 + h_2}. \quad (2.35)$$

При значительных расстояниях, близких к расстоянию прямой видимости, прямая  $A_1B_1$  и ломаная  $ACB$  почти сливаются и можно считать

$$A_1C \approx AC \approx \sqrt{2R_0 h_1}; \quad C_1B \approx CB \approx \sqrt{2R_0 h_2}.$$

Кроме того, в последнем случае  $r$  близко к расстоянию прямой видимости, т.е.

$$r \approx r_0 = \sqrt{2R_0} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad \sqrt{2R_0} = \frac{r}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}}.$$

Отсюда положение точки  $C$  можно найти по формулам

$$r_1 = r \frac{\sqrt{h_1}}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}}; \quad r_2 = r \frac{\sqrt{h_2}}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}}. \quad (2.36)$$

Для промежуточных случаев положение точки  $C$  приближенно берется как среднее из двух положений, определяемых формулами (2.35) и (2.36).

Приведенные высоты позволяют учесть влияние сферичности Земли на величину поля в интерференционных формулах.

Отметим, что по мере увеличения длины трассы и приближения её к дальности прямой видимости приведенные высоты постепенно уменьшаются и в пределе стремятся к нулю. В этом случае множитель ослабления в интерференционных формулах, а следовательно, и напряженность поля также обращаются в нуль, и концепция, положенная в основу интерференционных формул, — наличие двух волн (прямой и отраженной) в точке приёма — теряет смысл. В связи с этим полагают, что интерференционные формулы пригодны для расчетов при расстояниях между передатчиком и приемником  $r < 0,8r_0$ .

## 2.6. Распространение радиоволн в зоне тени и полутени

При длинных радиотрассах модель плоской Земли не работает, необходимо учитывать ее сферичность и для определения напряженности поля на большом удалении от передатчика решать задачу дифракции электромагнитных волн на шаре. Задача усложняется тем, что приходится учитывать реальные электрические параметры Земли. В 1945 г. академик В.А. Фок получил общее выражение для расчета напряженности электрического поля в месте приема, пригодное для любых расстояний от передатчика. Однако определение напряженности поля по формуле Фока связано со сложными вычислениями, поскольку формула представляет собой ряд, плохо сходящийся при небольших расстояниях.

Для значительных расстояний в области тени, когда выпуклость Земли экранирует область приема, можно учитывать только первый член ряда и рассчитывать напряженность поля по формуле

$$E = E_0 W, \quad (2.37)$$

где  $E_0$  — амплитуда напряженности электрического поля, создаваемого антенной в свободном пространстве;  $W$  — множитель ослабления.

Множитель ослабления определяется произведением трех функций:

$$W = U(x)V(y_1)V(y_2), \quad (2.38)$$

где  $U(x)$  — функция, зависящая от расстояния и электрических параметров почвы;  $V(y_1)$  и  $V(y_2)$  — функции, зависящие от высоты подъема приемной и передающей антенн соответственно.

Параметры  $x$ ,  $y_1$ ,  $y_2$  определяются через масштабы расстояний ( $L$ ) и высот ( $H$ ) следующим образом:

$$L = \left( \frac{R_0^2 \lambda}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}; \quad H = \frac{1}{2} \left( \frac{R_0 \lambda^2}{\pi^2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (2.39)$$

$$x = \frac{r}{L}; \quad y_1 = \frac{h_1}{H}; \quad y_2 = \frac{h_2}{H}, \quad (2.40)$$

где параметр  $x$  является нормированной длиной трассы; параметры  $y_1$ ,  $y_2$  — нормированные высоты расположения антенн;  $R_0$  — радиус Земли.

Выражения для функций  $U(x)$  и  $V(y)$ , достаточно сложные в общем виде, могут быть упрощены для некоторых практически важных случаев. Например, в диапазоне УКВ при  $\lambda < 10$  м для горизонтальной поляризации волны и  $\lambda < 1$  м для вертикальной поляризации функция  $U(x)$  может быть аппроксимирована выражением [1, 2, 3]

$$U(x) = 2\sqrt{\pi x} e^{-2,02x}. \quad (2.41)$$

Графики функций  $U(x)$  и  $V(y)$ , взятые из [1, 2], приведены на рис. 2.14 и 2.15.

Кроме того, значения функции  $V(y)$ , выраженные в децибелах, с достаточной степенью точности могут быть аппроксимированы выражениями

$$\left. \begin{aligned} V(y) &\approx -1,386 + 2,22y + 19 \lg(y), & \text{при } 0,01 \leq y \leq 1; \\ V(y) &\approx -1,29 + 1,166y + 30,1 \lg(y), & \text{при } 1 \leq y \leq 40. \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

В случае длинных, средних и коротких волн антенны являются, как правило, низко расположенными. Высотные множители  $V(y_1)$  и  $V(y_2)$  обращаются в единицы, но расчет множителя ослабления остается достаточно сложным, так как проявляется сильная зависимость от параметров почвы [1, 3]. На практике в этом случае можно использовать графики, построенные для двух видов земной поверхности — моря и суши (рис. 2.16, 2.17).

Графики, приведенные на рис. 2.16, 2.17, составлены по формуле Шулейкина — Ван-дер Поля при малых расстояниях (см. разд. 3), по формуле Фока при больших расстояниях и рекомендованы Международным консультативным комитетом по радиосвязи (МККР). Предполагается, что передающая антенна — несимметричный вибратор с  $D = 1,5$ , установленный на поверхности Земли и излучающий мощность 1 кВт.

Если для передающей антенны задана не излучаемая мощность, а ток  $I_0$  на входе антенны и действующая длина антенны  $l_d$ , то излучаемую мощность можно определить по формуле [1]

$$P = 160\pi^2 \left( \frac{l_d I_0}{\lambda} \right)^2. \quad (2.43)$$

На графиках (рис. 2.16, 2.17) слева по вертикали отложены значения напряженности электрического поля в микровольтах на метр, справа — в децибелах по отношению к 1 мкв/м. Если излучаемая мощность и КНД передающей антенны отличаются от предполагаемых, то напряженность поля определяется из условия, что она пропорциональна  $\sqrt{PD}$ .

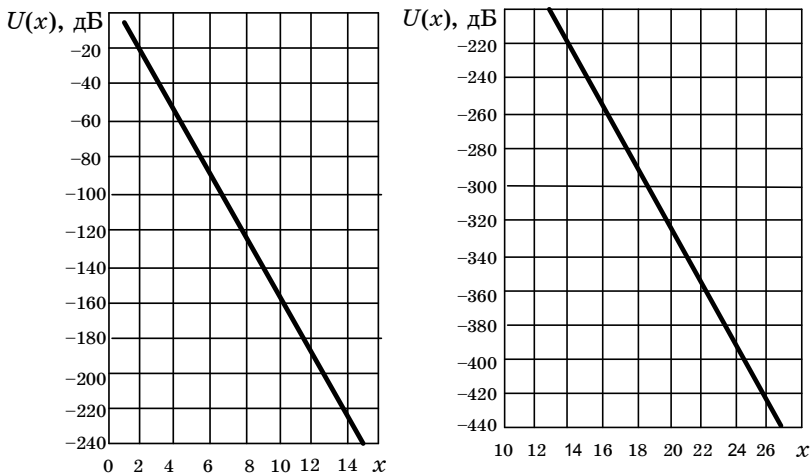


Рис. 2.14 Зависимость  $U(x)$  от нормированной длины трассы

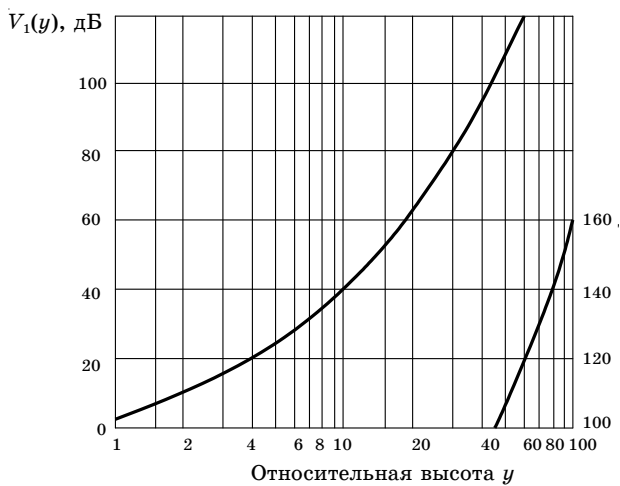
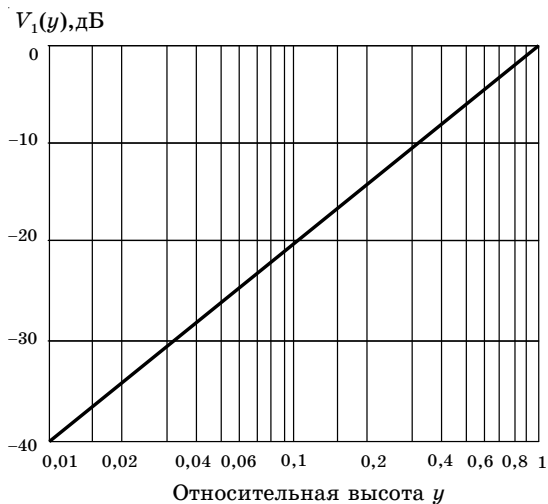


Рис. 2.15. Зависимость  $V(y)$  от нормированной высоты антенны

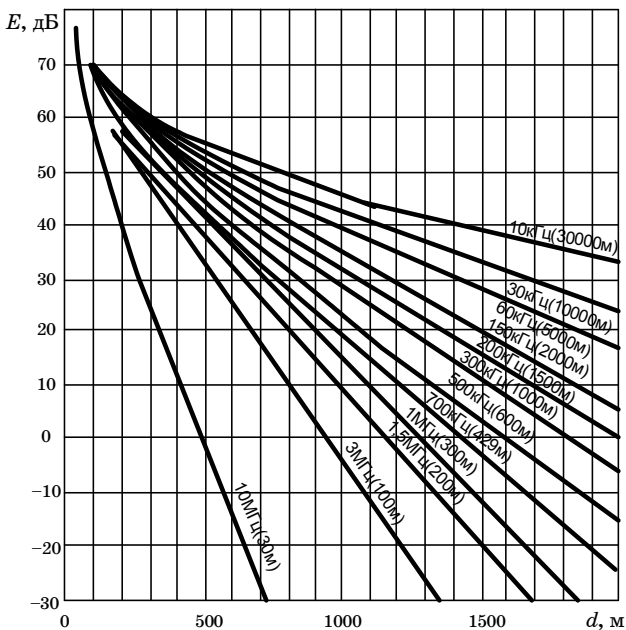


Рис. 2.16. Зависимость напряженности земной волны от расстояния при распространении над морем ( $\epsilon_r = 80$ ,  $\sigma = 4$  сим/м)

В зоне полутени при поднятых антеннах расчет поля значительно усложняется, поскольку в дифракционной формуле необходимо учитывать несколько слагаемых. В то же время определение поля в зоне полутени представляет значительный практический интерес, например, при определении зоны уверенного приема телевизионных передач, поскольку в зоне тени дифракционное поле быстро убывает с увеличением расстояния.

На практике приходится использовать приближенные методы [1,5]. Рассмотрим метод, изложенный в [5]. Нормированные параметры трассы определяются по формулам (2.39) и (2.40). Нормированное расстояние прямой видимости при этом будет равно



$$X_{\text{пр}} = \sqrt{Y_1} + \sqrt{Y_2} . \quad (2.44)$$

Множитель ослабления определяется в децибелах на метр по формуле

$$V(X) = V_{\text{пр}}(\mu, q = \infty) - 17,1\xi , \quad (2.45)$$

где первое слагаемое определяет ослабление на границе прямой видимости, второе — добавочное ослабление при переходе в область тени; параметр  $\xi$ , определяющий удаление от границы прямой видимости в область тени, равен

$$\xi = X - X_{\text{пр}} . \quad (2.46)$$

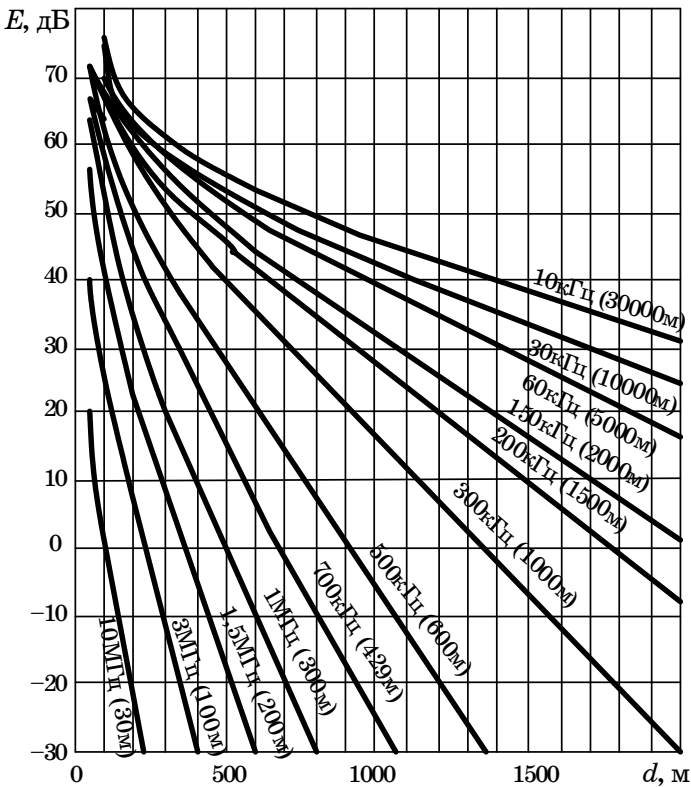


Рис. 2.17. Зависимость напряженности земной волны от расстояния при распространении над сушей ( $\epsilon_r = 4$ ,  $\sigma = 0,01$  сим/м)

Параметр  $\mu$  связан с нормированными высотами антенн соотношением

$$\mu = \frac{\sqrt{Y_1 Y_2}}{\sqrt{Y_1} + \sqrt{Y_2}}. \quad (2.47)$$

Параметр  $q$  определяется формулой

$$q = j \sqrt[3]{\frac{\pi R_0}{\lambda}} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r - j60\lambda\sigma}}.$$

В диапазоне УКВ можно пользоваться формулой (2.45) как для горизонтальной, так и для вертикальной поляризации.

Для функции  $V_{\text{пр}}(\mu, q = \infty)$  в [5] приведен график, который хорошо аппроксимируется выражением

$$V(\mu, q = \infty) = 16,8 - 35,28\mu + 1,44e^{\mu} \cdot 47,65 \ln(\mu). \quad (2.48)$$

В заключение отметим, что одночленной дифракционной формулой можно пользоваться для радиотрасс с расстоянием, примерно в полтора раза превышающим расстояние прямой видимости. Общее представление о поведении поля вблизи расстояния прямой видимости и в зоне тени дает рис. 2.18 [5].

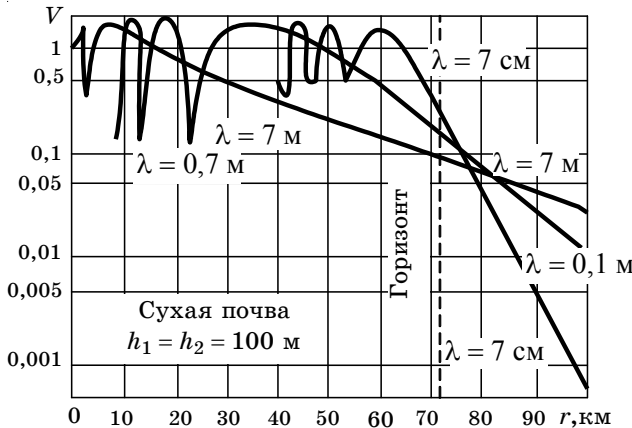


Рис. 2.18. Зависимость множителя ослабления на разных длинах волн при поднятых антеннах

Из него видно, что в зоне освещенности поле имеет интерференционный характер, причем по мере укорочения волны первый максимум приближается к линии горизонта в соответствии с формулой (2.23). В области тени множитель ослабления быстро уменьшается и тем быстрее, чем короче длина волны.

В качестве примера рассмотрим расчет множителя ослабления в области полутени.

**Пример.** Определить множитель ослабления на границе прямой видимости и на расстоянии больше его на 10 км, если высоты антенн  $h_1 = 200$  м (передающая антенна телецентра),  $h_2 = 15$  м (приемная антенна),  $\lambda = 6$  м.

1. Определим масштабы расстояний и высот по формуле (2.39):

$$L = \sqrt[3]{\frac{\lambda R_0^2}{\kappa}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot (6,37 \cdot 10^6)^2}{\pi}} = 42,63 \text{ м.}$$

$$H = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{\lambda^2 R_0}{\kappa^3}} = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{36 \cdot 6,37 \cdot 10^6}{\pi^2}} = 142,676 \text{ м.}$$

2. Определим нормированные высоты антенн по формулам (2.40):

$$Y_1 = \frac{h_1}{L} = 1,402; \quad Y_2 = \frac{h_2}{L} = 0,105.$$

3. Нормированное расстояние прямой видимости можно определить как

$$X_{\text{пр}} = \sqrt{Y_1} + \sqrt{Y_2} = \sqrt{1,402} + \sqrt{0,105} = 1,508$$

или как  $X_{\text{пр}} = r_0/L$ , где  $r_0$  — расстояние прямой видимости, равное 64,3 км.

4. Параметр  $\mu$  по формуле (2.47) равен  $\mu = 0,505$ .

5. Множитель ослабления на границе прямой видимости по формуле (2.47) составит величину

$$V(\mu, q = \infty) = -31,185 \text{ дБ.}$$

6. Нормированное расстояние для расстояния, большего расстояния прямой видимости ( $r_0 + 10$  км), равно 74,3 км:

$$X = \frac{74,3}{42,63} = 1,173.$$

7. Параметр  $\xi = X - X_{\text{пр}} = 0,235$ .

8. Множитель ослабления для расстояния 74,3 км

$$\begin{aligned} V(X) &= V_{\text{пр}}(\mu, q = \infty) - 17,1\xi = \\ &= -31,185 - 17,1 \cdot 0,235 = -35,203. \end{aligned}$$

Таким образом, на расстоянии прямой видимости множитель ослабления составляет  $-31,185$  дБ, а в области полутени, на расстоянии 74,3 км, составляет  $-35,203$  дБ. Сравнение множителя ослабления на границе прямой видимости, посчитанное в этом примере и по графику из [1] для этих же данных, дает их хорошее соответствие ( $-31,18$  и  $-32$  дБ).

### Контрольные вопросы

1. Поясните суть отражательной трактовки при определении напряженности поля поднятых антенн. Как определяются пределы ее применимости?

2. В чем отличие диаграммы направленности вертикального и горизонтального вибраторов, поднятых над идеально проводящей землей? Что происходит с диаграммами направленности при уменьшении высоты антенн?

3. Какой вид имеет диаграмма направленности в вертикальной плоскости у вертикального вибратора в условиях применимости формулы Введенского?

4. Объясните квадратичную зависимость напряженности от расстояния в формуле Введенского. Каковы условия применимости формулы?

5. Каким образом определить участок поверхности Земли, существенный при отражении радиоволн при поднятых антеннах? Как определить, можно ли считать его гладким?

6. Как определить напряженность поля в точке приема при поднятых антеннах, если условия применимости формулы Введенского не выполняются?

7. Поясните механизм распространения радиоволн в область тени. Как поле в зоне тени зависит от частоты радиоволн? Объясните эту зависимость, используя понятие пространства, существенного для распространения радиоволн.

8. Какой характер имеет зависимость напряженности поля от расстояния в зоне освещенности и зоне тени при поднятых антеннах? Объясните разный характер этих зависимостей.

9. Как зависит напряженность поля по формуле Введенского от высоты приемной антенны? Какова эта зависимость в действительности?

### **3. Распространение земных радиоволн при низко расположенных антеннах**

В диапазонах длинных, средних и отчасти коротких волн в качестве антенн используют различного типа вибраторы, расположенные непосредственно на поверхности Земли. Это объясняется, во-первых, большой длиной волны, при которой поднять антенну на несколько длин волн не представляется возможным. Во-вторых, как увидим ниже, такое расположение имеет свои определенные преимущества. В предыдущем разделе распространение радиоволн при поднятых антеннах рассматривалось на основе отражательной трактовки. При низко расположенных антеннах она в общем случае неприменима, хотя бы потому, что невозможно выделить по отдельности падающую и отраженную волны. Однако, как было показано в п. 2.3.3, для идеально проводящей Земли отражательная трактовка справедлива для любых высот расположения антенн. Поэтому, используя отражательную трактовку, вначале определим поле, создаваемое низко расположенным вибратором над идеально проводящей Землей. Затем рассмотрим особенности распространения радиоволн над реальной почвой в сравнении со случаем идеально проводящей Земли.

#### **3.1. Формула идеальной радиопередачи**

Рассмотрим вопрос об оптимальной ориентации вибратора относительно поверхности идеально проводящей Земли. Для этого рассмотрим два случая расположения симметричного вибратора над поверхностью Земли (рис. 3.1, *а, б*). Согласно методу зеркальных изображений действие Земли можно учесть введением зеркального изображения реальных зарядов с противоположными знаками.

Из рис. 3.1, *а* следует, что для вертикального вибратора ток в зеркальном изображении имеет то же направление, что и в реальном вибраторе. Это приводит к увеличению поля в точке наблюдения в два раза по сравнению с полем в отсутствии Земли при условии сохранения величины входного тока. В случае горизонтального вибратора (рис. 3.1, *б*) ток в зеркальном изображении имеет противоположное направление по

отношению к току в вибраторе. При этом поля в точке наблюдения на поверхности Земли взаимно компенсируются. В остальных точках пространства эта компенсация будет тем более полной, чем ниже располагается вибратор над Землей. Таким образом, в случае идеально проводящей Земли вибратор следует располагать вертикально. Для реальных почв этот вывод остается также справедливым, поскольку свойства почв в диапазонах длинных, средних и коротких волн близки к свойствам проводника. На практике в качестве вертикальных вибраторов обычно используются вертикальные несимметричные вибраторы (рис. 3.1, в), в которых роль второй половины вибратора играет зеркальное изображение в Земле.

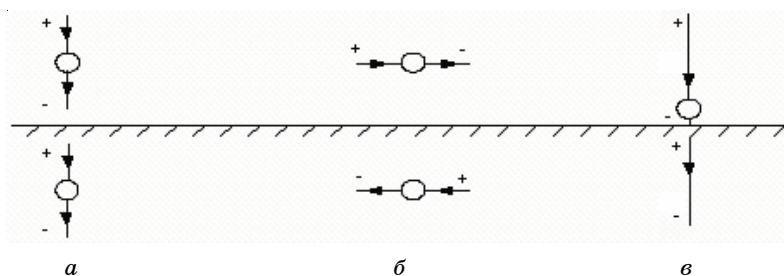


Рис. 3.1. Вибраторные антенны вблизи идеально проводящей Земли: *а* — симметричный вертикальный вибратор; *б* — симметричный горизонтальный вибратор; *в* — несимметричный вертикальный вибратор

Определим, как изменится поле вибратора (рис. 3.1, в) по сравнению с полем симметричного вибратора в свободном пространстве при сохранении излучаемой мощности. В присутствии Земли вектор Пойнтинга в точке наблюдения увеличится в два раза по сравнению со свободным пространством, поскольку поле в идеальный проводник не проникает, и поэтому поверхность сферы, по которой распределяется излученная мощность, уменьшится в два раза. Напряженность поля при этом увеличится в  $\sqrt{2}$  раз. Таким образом, вместо (1.4) в направлении поверхности Земли будем иметь

$$E = \frac{\sqrt{120PD}}{r}. \quad (3.1)$$

Эта формула называется формулой идеальной радиопередачи. Этим подчеркивается двойкая идеализация: во-первых, не принимается во внимание кривизна Земли, во-вторых, ее поверхности приписываются свойства идеального проводника. Отметим, что зависимость  $E(r) \sim 1/r$  осталась такой же, как в свободном пространстве. Это вполне естественно, так как идеальные проводники не поглощают энергию электромагнитных волн.

Если Земля будет иметь конечную проводимость, то волна будет проникать в Землю и это приведет к следующему:

а) изменится структура поля в точках на поверхности Земли;

б) энергия волны будет поглощаться в Земле, и это приведет к дополнительному ослаблению поля. Это ослабление учитывается введением в формулу идеальной радиопередачи (3.1) множителя ослабления  $W$ , зависящего от расстояния и электрических параметров почвы:

$$E = \frac{\sqrt{120PD}}{r} W(r, \dot{\epsilon}_{r2}), \quad (3.2)$$

где  $\dot{\epsilon}_{r2}$  — комплексная относительная диэлектрическая проницаемость почвы (2.1).

Рассмотрим следствия «а» и «б» по отдельности. В качестве передающей антенны будем предполагать для определенности несимметричный вибратор (рис. 3.1, в), хотя все выводы будут справедливы для любых низко расположенных антенн с вертикальной поляризацией поля излучения.

### 3.2. Структура поля над поглощающей поверхностью Земли

Определение структуры поля означает нахождение соотношений между составляющими векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в какой-либо точке. Предположим, что точка наблюдения находится на поверхности Земли на достаточном удалении от передающей антенны (в ее дальней зоне). Изменения, происходящие в структуре поля при замене идеально проводящей Земли на поглощающую, показаны на рис. 3.2. Передающая антенна



расположена слева (на рисунке не показана) так, что распространение волны происходит слева направо.

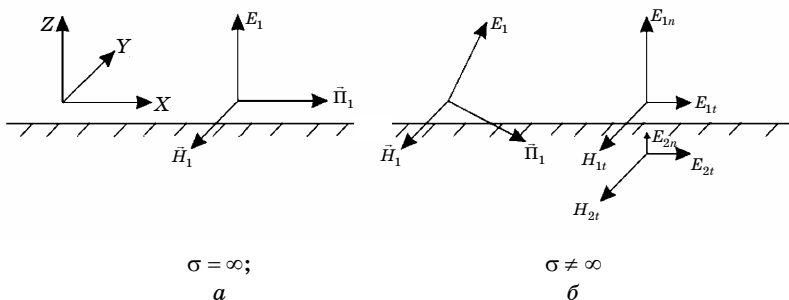


Рис. 3.2. Структура поля над идеально проводящей (а) и поглощающей (б) Землей

Над идеально проводящей Землей вектор Пойнтинга  $\vec{\Pi}$  направлен вдоль Земли, вектор  $\vec{E}$  перпендикулярен, а вектор  $\vec{H}$  параллелен поверхности Земли, так что выполняются граничные условия для идеальных проводников ( $E_t = H_n = 0$ ), где индекс  $t$  означает тангенциальную (касательная к поверхности Земли) составляющую какого-либо вектора, а индекс  $n$  — соответственно нормальную (перпендикулярную) составляющую.

Над реальной (с конечной проводимостью) поверхностью Земли происходит наклон вектора Пойнтинга в сторону Земли, поскольку энергия волны из воздуха частично проникает в Землю и поглощается в ней в виде тепла. Поскольку вектора  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  перпендикулярны вектору  $\vec{\Pi}$ , то происходит наклон вектора  $\vec{E}$  в направлении движения волны. Таким образом, на поверхности появляется составляющая  $E_{1t}$ . Задача о структуре поля в основном сводится к определению этой составляющей. Конечно, на поверхности почвы выполняются точные граничные условия электродинамики [7, 10, 11]:

$$E_{1t} = E_{2t}, \quad H_{1t} = H_{2t}, \quad \varepsilon_1 E_{1n} = \varepsilon_2 E_{2n}, \quad B_{1n} = B_{2n}. \quad (3.3)$$

Эти условия не позволяют ответить на вопрос о структуре поля, поскольку число неизвестных больше числа уравнений. Задача имела бы точное решение, если уравнения (3.3) рассмотреть вместе с уравнениями Максвелла для воздуха и Земли и найти поля из этих уравнений с учетом граничных усло-

вий. Однако такой путь является слишком сложным и громоздким. Существует более простой способ решения задачи, основанный на использовании приближенных граничных условий Леонтовича [7, 10, 11].

Условия Леонтовича применимы, когда модуль комплексной относительной диэлектрической проницаемости второй среды — Земли — много больше относительной проницаемости первой среды — воздуха:

$$|\dot{\epsilon}_{r2}| = \sqrt{\dot{\epsilon}_{r2}^2 + (60\lambda\sigma)^2} \gg \epsilon_{r1} = 1, \quad (3.4)$$

где  $\dot{\epsilon}_{r2}$  и  $\sigma$  — относительная диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость почвы;  $\epsilon_{r1}$  относительная диэлектрическая проницаемость воздуха, которую можно считать равной единице.

Для реальных почв условие (3.4), как правило, выполняется и потому не носит ограничительного характера.

Приближенные граничные условия Леонтовича могут быть представлены в виде

$$\frac{E_{1t}}{H_{1t}} \approx \dot{Z}_2, \quad (3.5)$$

где  $E_{1t}$  и  $H_{1t}$  — тангенциальные составляющие напряженности полей  $\vec{E}_1$  и  $\vec{H}_1$  в воздухе на границе с почвой;  $\dot{Z}_2 = 120\pi/\sqrt{\dot{\epsilon}_{r2}}$  — характеристическое сопротивление почвы. Характеристическое сопротивление первой среды — воздуха — принимаем равным  $120\pi$ .

Особенностью граничных условий Леонтовича является то, что они связывают между собой тангенциальные составляющие полей в воздухе через параметры земной поверхности.

В выбранной нами на рис. 3.2 системе координат приближенные граничные условия Леонтовича имеют вид

$$H_{1y} \approx -\frac{E_{1x}}{120\pi} \sqrt{\dot{\epsilon}_{r2}}. \quad (3.6)$$

Если бы Земля была идеально проводящей, то соотношение между  $E_{1z}$  и  $H_{1y}$  определялось бы характеристическим сопротивлением воздуха:

$$\frac{E_{1z}}{H_{1y}} = Z_1 = 120\pi. \quad (3.7)$$

При реальных почвах соотношение (3.7) выполняется приближенно, поскольку, как показывает анализ, наклон вектора Пойнтинга на реальных почвах составляет всего несколько градусов. Исключая из (3.6) и (3.7)  $H_{1y}$ , получим соотношение между  $E_{1z}$  и  $E_{1x}$

$$E_{1x} \approx \frac{E_{1z}}{\sqrt{\hat{\epsilon}_r}}. \quad (3.8)$$

Приближенный характер этого соотношения объясняется приближенным характером соотношений (3.6) и (3.7) для реальных почв.

Точные граничные условия (3.3) позволяют выразить компоненты полей  $\vec{E}_2$  и  $\vec{H}_2$  в земле через компоненты в воздухе:

$$E_{2x} = E_{1x}, \quad \hat{\epsilon}_{r2} E_{2z} = E_{1z}, \quad H_{1y} = H_{2y}. \quad (3.9)$$

В отличие от соотношений (3.6) и (3.8), равенства (3.9) являются точными. Из формул (3.8) и (3.9) можно получить соотношение между компонентами электрического поля в земле:

$$E_{2z} \approx \frac{E_{2x}}{\sqrt{\hat{\epsilon}_{r2}}}. \quad (3.10)$$

Таким образом, поперечные (нормальные) и продольные (тангенциальные) компоненты вектора  $\vec{E}$  в воздухе и земле связаны между собой похожими соотношениями (3.8) и (3.10). Однако если в воздухе преобладает поперечная составляющая  $E_{1z}$ , то в земле — продольная  $E_{2x}$ .

Из формул (3.8) и (3.10) также следует, что между составляющими электрического поля в воздухе и в земле имеется сдвиг фаз, поскольку корень из комплексной диэлектрической проницаемости почвы является также комплексной величиной. Это приводит к тому, что поля  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  являются эллиптически поляризованным (рис. 3.3).

Для реальных почв эллипс, как правило, сильно вытянут. Поэтому можно приближенно считать поляризацию волны линейной и говорить о явлении «наклона фронта волны». Угол наклона определяется соотношением [1].

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{1}{\sqrt{|\hat{\epsilon}_{r2}|}}. \quad (3.11)$$

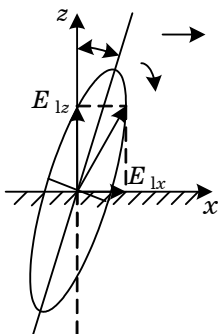


Рис. 3.3. Эллипс поляризации радиоволны, распространяющейся над полупроводящей поверхностью

Проведенный анализ структуры полей позволяет сделать вывод о том, что в воздухе выгоднее использовать в качестве антенн вертикальные вибраторы, а в Земле — горизонтальные. В то же время появление горизонтальной составляющей электрического поля над реальными почвами объясняет применение приемных антенн в виде горизонтальных проводов над Землей в диапазоне коротких волн. По сравнению с вертикальным проводом, горизонтальный провод принимает составляющую поля  $E_{1x}$ , которая меньше вертикальной. Однако антенна с горизонтальным проводом обладает направленностью в горизонтальной плоскости и проще в изготовлении. Если в качестве приемной антенны используется магнитная антенна, например рамочная или ферритовая, то она может располагаться либо в воздухе, либо в почве, но вблизи поверхности, поскольку поля в почве быстро затухают при удалении от поверхности.

### 3.3. Расчет вертикальной составляющей напряженности электрического поля. Формула Шулейкина — Ван-дер-Поля

Обратимся теперь к определению множителя ослабления  $W$  в формуле (3.2). Решение этой задачи, как и предыдущей, представляет сложную электродинамическую проблему. Впервые в 1909 году эту задачу решил А. Зоммерфельд, используя уравнения Максвелла для воздуха и почвы и строгие граничные условия на границе. Однако его решение содержало ошибку, позднее исправленную В.А. Фоком, и было представлено в интегральном виде, неудобном для практического применения. Позднее этой проблемой занимались М.В. Шулейкин, Ван-дер-Поль, Е.Л. Фейнберг и многие другие. Решение, пригодное для

практического использования, было получено в 1923–1925 годах М.В. Шулейкиным и Ван-дер Полем и представляется в виде графика (рис. 3.4) или приближенной формулы

$$|W| = \frac{2 + 0,3\rho}{2 + \rho + 0,6\rho^2}, \quad (3.12)$$

где безразмерный параметр  $\rho$  называется численным расстоянием и равен

$$\rho = \frac{\pi r}{\lambda |\tilde{\epsilon}_{r2}|} = \frac{\pi r}{\lambda \sqrt{\epsilon_{r2}^2 + (60\sigma\lambda)^2}}. \quad (3.13)$$

Формулу для расчета напряженности поля (3.2) вместе с формулой для определения множителя ослабления (3.12) называют формулой Шулейкина — Ван-дер-Поля.

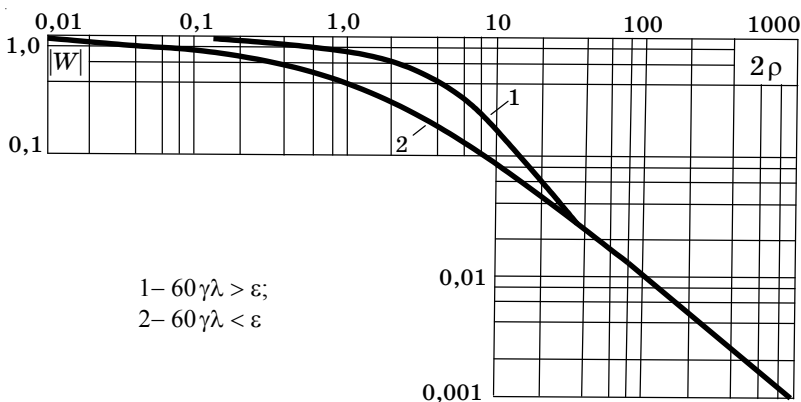


Рис. 3.4. Зависимость множителя ослабления от численного расстояния

Из графика рис. 3.4 и формулы (3.12) видно, что при малых значениях  $\rho$  множитель  $W$  слабо зависит от  $\rho$ , то есть мало меняется с изменением расстояния, длины волны, электрических свойств почвы и близок к единице. Следовательно, при этих условиях почва не вносит дополнительного ослабления и волна распространяется как над идеально проводящей почвой. Реально этому случаю соответствуют небольшие значения  $r/\lambda$

и большие значения диэлектрической проницаемости (например, для воды) или проводимости (например, для морской воды). Заметим, что при  $\sigma \rightarrow \infty$  формула Шулейкина переходит в формулу идеальной радиопередачи. Большие значения  $\rho$  соответствуют большим расстояниям, небольшим длинам волн, сухим почвам. При  $\rho > 20$  справедливо приближение

$$|W| = \frac{1}{2\rho} \quad (3.14)$$

и напряженность поля убывает как  $1/r^2$ .

Заметим, что затухание в воздухе, определяемое по формуле Шулейкина — Ван-дер-Поля, всегда меньше, чем если бы волна распространялась только в почве. В последнем случае коэффициент ослабления имеет экспоненциальную зависимость от расстояния и определяется по формулам, известным из курса электродинамики [7, 10].

Представленный выше результат решения задачи о распространении волны над поглощающей почвой является максимально упрощенным, но удовлетворяющим потребностям практики. Более строгое решение можно найти в [1, 3, 12].

Сделаем теперь несколько качественных выводов о механизме распространения радиоволн в этом случае.

Мы установили ранее, что область, существенная для распространения радиоволн, имеет форму эллипса с фокусами в корреспондирующих пунктах — местах расположения антенн. При расположении антенн близко к поверхности Земли часть энергии просачивается в почву и по мере удаления от излучателя убывает за счет потерь в полупроводящей Земле. Вследствие этого повышается роль концевых участков трассы, прилегающих к антеннам.

Физическую картину повышения роли концевых участков трассы можно объяснить следующим образом [3]. Предположим, что Земля является идеальным проводником. На ее поверхности расположен вертикальный диполь в точке  $O$ . Определим поле на поверхности Земли в точке  $A$  (рис. 3.5).

Пусть между точками  $O$  и  $A$  расположена плоскость  $S_0$ , перпендикулярная поверхности Земли и трассе распространения радиоволн. Согласно принципу Гюйгенса — Френеля напряженность поля в точке  $A$  формируется в результате

суммирования полей вторичных излучений, расположенных на плоскости  $S_0$ .

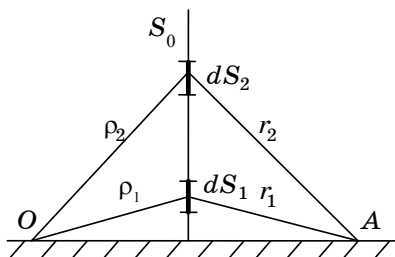


Рис. 3.5. К объяснению понятий «взлетной» и «посадочной» площадок

Сравним вклад в поле, создаваемый вторичными источниками с элементарных площадок  $dS_1$  и  $dS_2$ . Вклад площадок в создание поля в точке  $A$  определяется суммарным расстоянием  $\rho + r$ . Очевидно, что чем больше это расстояние, тем меньше вклад в поле в точке  $A$ . Таким образом, вклад вышерасположенной площадки меньше по сравнению с вкладом ниже расположенной.

Пусть теперь Земля не является идеальным проводником. Тогда роль элементарных площадок изменится. Поле в точке  $A$  определяется теперь не только расстоянием  $\rho + r$ , но и ослабляющим действием Земли. В результате утечки электромагнитной энергии в Землю поле над реальной Землей оказывается ослабленным (по сравнению с полем над идеальной землей). Чем ближе к земле площадка, тем сильнее сказывается ослабляющее действие Земли. Следовательно, в случае реальной Земли более существенный вклад в поле в точке  $A$  вносят вторичные источники высокорасположенных элементарных площадок. То есть вклад площадки  $dS_2$  больше вклада площадки  $dS_1$  (рис. 3.5).

Таким образом, при распространении радиоволны вдоль трассы она как бы «взлетает» над поверхностью Земли и «опускается» в точке приема (рис. 3.6). При этом очевидно, что параметры трассы не влияют существенно на величину поля в точке приема  $A$ . Исключение составляют участки поверхности вблизи антенн, поскольку они определяют общее ослабление

волны. Таким образом, концевые участки трассы, называемые «взлетной» и «посадочной» площадками, играют наиболее существенную роль в распространении земных радиоволн при низко расположенных антеннах. Следовательно, для обеспечения уверенной радиосвязи при низко расположенных антеннах важным является выбор места расположения передающей и приемной антенн.

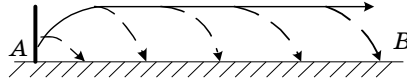


Рис. 3.6. Механизм распространения радиоволн при низко расположенных антеннах

Как уже отмечалось выше, функция ослабления является комплексной величиной. Представим ее в виде

$$\dot{W}(r) = |W(r)| e^{j\psi(r)}.$$

Модуль ее определяет ослабление амплитуды поля. Выясним, что определяет фаза  $\psi(r)$  функции ослабления. Для ответа на этот вопрос запишем напряженность поля волны с полным фазовым множителем:

$$\dot{E}(r, t) = \frac{\sqrt{120PD}}{r} |W(r)| e^{j[\omega t - kr + \psi(r)]}. \quad (3.15)$$

Определим фазовую скорость волны, приравняв к нулю полный дифференциал фазы [3, 10]:

$$\omega dt - kdr + \frac{d\psi}{dr} dr = 0.$$

Отсюда получим

$$v_\phi = \frac{dr}{dt} = \frac{\omega}{k - d\psi/dr}. \quad (3.16)$$

Как следует из формулы (3.16), фазовая скорость волны определяется изменением фазы  $\psi$  с расстоянием. Анализ функции ослабления (3.12) показывает, что фаза  $\psi$  изменяется в начале трассы, а затем остается практически постоянной [3]. Это означает, что фазовая скорость волны вблизи передающей антенны постепенно увеличивается и на некотором расстоянии от нее приближается к скорости света. Обратный процесс —



замедление скорости волны — происходит вблизи приемной антенны. Волна как бы разгоняется вблизи передающей и замедляется вблизи приемной антенны, что подтверждает рассмотренный выше механизм распространения. Основную часть трассы волна проходит со скоростью света независимо от характера почвы, над которой распространяется. Этот вывод имеет решающее значение в таких применениях радио, как радионавигация и радиопеленгация.

### 3.4. Распространение радиоволн при низко расположенных антеннах над неоднородной трассой

Реальная поверхность Земли в редких случаях является однородной. Чаще всего она представляет собой электрически неоднородную поверхность сложной формы. Рассмотрим плоский участок земной поверхности с двумя почвами, отличающимися друг от друга диэлектрической проницаемостью и проводимостью (рис. 3.7).

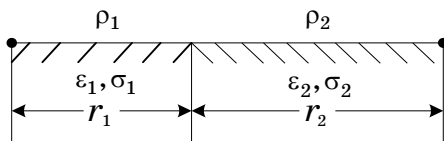


Рис. 3.7. Неоднородная радиотрасса

Определим множитель ослабления в точке приема. Долгое время для вычисления множителя ослабления для неоднородной почвы пользовались приближенными методами [3]. Эти методы основывались на том, что поглощение радиоволн при их распространении над каким-либо участком пропорционально длине участка с данной почвой и не зависит от положения этого участка на трассе. Такой подход приводил к ошибкам в определении напряженности поля в точке приема, обусловленным тем, что в действительности радиоволны больше всего поглощаются концевыми участками трассы, прилегающими к

антеннам. Оценка множителя ослабления для неоднородной трассы была проведена в работах Е.Л. Фейнберга. Он полагал, что модуль комплексной диэлектрической проницаемости каждой из почв много больше 1, то есть применимы граничные условия Леонтовича. Для случая, когда электрические параметры почвы резко изменяются (например, суша-море), Фейнберг Е.Л. получил формулу для расчета множителя ослабления [1,3]:

$$|W| = \frac{1}{2\sqrt{\frac{\rho_1}{r_1} \frac{\rho_2}{r_2}} (r_1 + r_2)}. \quad (3.17)$$

Выражение (3.17) позволяет выявить своеобразный эффект, который является специфическим при распространении радиоволн над поверхностью Земли и заключается в следующем: при распространении радиоволн над однородной почвой множитель ослабления всегда убывает с увеличением расстояния, над неоднородной почвой возможны отступления от этого правила.

Например, пусть участок, примыкающий к передатчику, обладает меньшей проводимостью, чем участок, примыкающий к приемнику ( $|\tilde{\epsilon}_1| < |\tilde{\epsilon}_2|$ ), а длины участков примерно одинаковы ( $r_1 \approx r_2$ ). В этом случае численное расстояние  $\rho_1$  будет больше численного расстояния  $\rho_2$ . Если при этом численные расстояния велики, то

$$\left| \frac{1}{\rho_1} \right| < \left| \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right| < \left| \frac{1}{\rho_2} \right|. \quad (3.18)$$

При больших  $\rho_1$  множитель ослабления на первом участке определяется формулой

$$|W_1| = \frac{1}{2\rho_1}.$$

На втором участке множитель ослабления определяется формулой (3.17). В связи с этим при переходе на второй участок должен иметь место скачок напряженности поля вверх, поскольку множитель ослабления  $|W_1|$  оказывается значительно больше множителя ослабления  $|W_2|$ .

Типичный пример такого скачка напряженности поля наблюдается при переходе трассы с суши (плохо проводящая среда, вызывает сильное поглощение) на море (хорошо проводящая среда). Результаты экспериментальных измерений амплитуды поля подтверждают скачок при переходе через береговую линию (рис. 3.8).

Для трассы, состоящей из трех электрически неоднородных участков, при больших численных расстояниях  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  множитель ослабления определяется формулой, также полученной Е.Л. Фейнбергом [12]:

$$|W| = \frac{1}{2 \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_3}{r_1 r_3} (r_1 + r_2 + r_3)}}. \quad (3.19)$$

Из формулы (3.19) следует, что поле в точке приема не зависит от свойств среднего участка трассы, а определяется только свойствами концевых участков. Это обстоятельство подчеркивает роль «взлетной» и «посадочной» площадок.

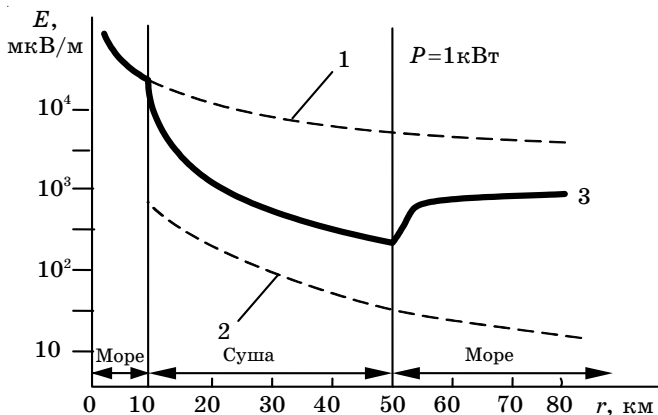


Рис. 3.8. Изменение напряженности поля на стыке двух разнородных трасс: 1 — однородная морская трасса; 2 — однородная сухопутная трасса; 3 — трасса «суша — море»

При распространении радиоволн над неоднородной трассой кроме скачкообразного изменения амплитуды волны может

происходить и изменение направления движения волны. Это явление получило название «береговая рефракция», поскольку наиболее ярко выражено на границе суша — море. Для его объяснения обратимся к рис. 3.9.

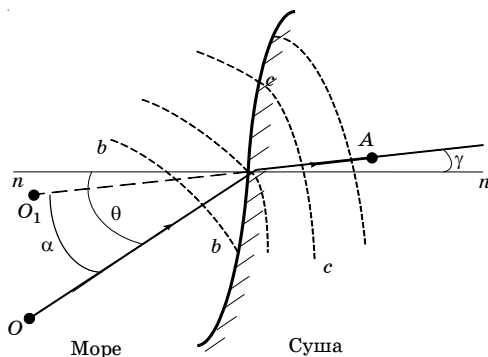


Рис. 3.9 К теории береговой рефракции

Пусть передатчик находится в море (точка  $O$ ) на значительном удалении от берега. Приемник расположен на суше в точке  $A$  вблизи от береговой линии. Над морем волна распространяется со скоростью света. Пунктирная линия  $bb$  изображает фазовый фронт волны, подходящей к береговой линии. Участки фронта волны, оказавшиеся над сушей, замедляются, в то время как над морем скорость остается прежней. В результате после перехода через береговую линию наклон фазового фронта изменяется (линия  $cc$ ). Фактически произошло преломление фазового фронта волны, причем угол преломления  $\gamma$  стал меньше угла падения  $\theta$ . Если в точке  $A$  расположен пеленгатор, определяющий угловое положение передатчика, то он определит его не в направлении точки  $O$ , а в направлении угла  $\gamma$  к линии нормали  $nn$ , т.е. в направлении точки  $O_1$ . Угол  $\alpha = \theta - \gamma$  называется углом береговой рефракции и определяет ошибку пеленга. Если суша близка по свойствам к диэлектрику, то угол рефракции определяется выражением [3]

$$\alpha = \frac{\operatorname{tg} \theta}{2\sqrt{\pi k \epsilon_r x_2}}, \quad (3.20)$$

где  $k = \omega/c$  — волновое число в свободном пространстве;  $\varepsilon_r$  — относительная диэлектрическая проницаемость почвы;  $x_2$  — протяженность сухопутного участка трассы. Из формулы (3.20) следует, что угол рефракции уменьшается с уменьшением угла падения  $\theta$  и увеличением расстояния  $x_2$ . Последнее можно объяснить тем, что в приемник, расположенный далеко от берега, попадает энергия из верхней области распространения радиоволны, на которые переход суша — море оказывает слабое влияние. В связи с этим для уменьшения ошибки пеленга станции рекомендуется располагать дальше от береговой линии. Более подробное изложение теории береговой рефракции можно найти в [3].

### Контрольные вопросы

1. Почему в диапазонах средних и длинных волн в качестве передающих антенн используют вертикальные несимметричные вибраторы? Какова при этом роль Земли?

2. Сформулируйте приближенные граничные условия Лентовича. При каких условиях они применимы?

3. Как зависит структура поля над земной поверхностью от свойств почвы?

4. От чего зависит соотношение амплитуд вертикальной и горизонтальной составляющих напряженности электрического поля в волне, распространяющейся вдоль поверхности Земли?

5. Объясните характер зависимости напряженности поля от расстояния в формуле Шулейкина — Ван-дер-Поля? В каких случаях этой формулой можно пользоваться?

6. Объясните суть понятий «взлетная» и «посадочная» площадки?

7. Трасса между передающей и приемной антеннами частично проходит над озером, расположенным посередине трассы. Изобразите зависимость напряженности поля вдоль трассы.

8. Поясните суть явления береговой рефракции. Почему ошибка пеленга цели, вызванная береговой рефракцией, зависит от расстояния передатчика и приемника до береговой линии?

## **4. Тропосфера и ее влияние на распространение радиоволн**

С точки зрения распространения радиоволн атмосферу разделяют на три области: тропосферу (расстояние от поверхности Земли 10–15 км), стратосферу (от 10–15 км до 60 км) и ионосферу (от 50–60 км примерно до 20000 км). В состав атмосферы входит молекулярный азот (78 % по объему), молекулярный кислород (21 % по объему) и другие газы (водород, аргон,  $\text{CO}_2$ ).

Высота нижнего слоя атмосферы — тропосферы — над полярными широтами 8–10 км, над экватором 16–18 км. В отличие от других слоев атмосферы — стратосферы и ионосферы — тропосфера содержит большое количество паров воды.

Тропосфера слабо поглощает солнечный свет и нагревается, главным образом, от поверхности Земли. Поэтому температура воздуха в ее пределах уменьшается с высотой. Обычно температура воздуха убывает на 5–6 °C на 1 км. Но иногда на небольших интервалах высот наблюдается местное возрастание температуры с высотой, называемое температурной инверсией.

Прекращением уменьшения температуры и характеризуется верхняя граница тропосферы. Выше этой границы, в стратосфере, температура с высотой возрастает и достигает максимума примерно на высоте 50 км. Нагрев стратосферы связан с образованием озонового слоя на высоте примерно 50 км.

Тропосфера и стратосфера составляют неионизированные слои атмосферы, поэтому закономерности распространения радиоволн в обоих слоях в ряде случаев одинаковы. Однако в тропосфере благодаря значительно большей плотности воздуха и близости слоя к земле метеорологические процессы проходят значительно интенсивнее, чем в стратосфере. Ввиду этого при изучении распространения радиоволн в неионизированной части атмосферы можно ограничиться изучением распространения радиоволн в тропосфере.

## 4.1. Электрические параметры тропосферы

Характер распространения радиоволн в тропосфере определяется состоянием атмосферы и процессами, которые в ней происходят. Состояние атмосферы определяется следующими характеристиками: температурой ( $T$ ), влажностью (абсолютной влажностью —  $e$ ), давлением ( $p$ ). Эти характеристики называются метеорологическими параметрами тропосферы.

Атмосфера состоит из смеси газов, в основном азота и кислорода. Каждый газ обладает диэлектрической проницаемостью и проводимостью. Во всех диапазонах, за исключением УКВ, проводимость газов практически равна нулю. В диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн сказывается дисперсия вещества и проводимость оказывается отличной от нуля.

В 1925 году Международной комиссией по аэронавигации было введено понятие «стандартной», или «нормальной», тропосферы, которая характеризует среднее состояние тропосферы в умеренных широтах. Для нормальной тропосферы приняты следующие метеопараметры: на поверхности Земли  $p = 1013$  мбар,  $T = 288$  К, относительная влажность 60 %. С увеличением высоты на каждые 100 метров давление уменьшается на 12 мбар, температура — на 0,55 градуса, относительная влажность остается постоянной. Высота нормальной тропосферы равна 11 км.

Для определения влияния метеорологических условий на характер распространения радиоволн нужно установить связь между электрическими (проводимость, диэлектрическая проницаемость) и метеорологическими (температура, влажность, давление) параметрами тропосферы. При прохождении электромагнитной волны через газ происходит поляризация молекул газов под действием электрического поля волны. Вектор поляризации определяется как дипольный момент единицы объема газа и пропорционален напряженности электрического поля  $\vec{E}$ :

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E}, \quad (4.1)$$

где  $\varepsilon_0$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость,  $\chi$  — электрическая восприимчивость вещества, связанная с относительной диэлектрической проницаемостью соотношением  $\chi = \varepsilon_r - 1$ .

Восприимчивость  $\chi$  зависит от абсолютной температуры  $T$ , давления  $p$  и, если молекулы не обладают постоянным дипольным моментом, равна

$$\chi = \frac{ap}{T}. \quad (4.2)$$

Если каждая молекула обладает постоянным дипольным моментом, то восприимчивость  $\chi$  равна

$$\chi = \frac{bp}{T^2}. \quad (4.3)$$

В формулах (4.2) и (4.3)  $a$  и  $b$  — постоянные, определенные в результате многочисленных экспериментов.

Восприимчивость смеси газов подчиняется закону аддитивности, т.е. восприимчивость смеси газов равна сумме восприимчивости отдельных газов.

Молекулы всех газов тропосферы, за исключением молекул водяного пара, не обладают постоянным электрическим дипольным моментом. Молекула же водяного пара обладает постоянной составляющей электрического дипольного момента, существующей и при отсутствии внешнего поля. Поэтому электрическая восприимчивость тропосферы определяется формулой

$$\chi = \varepsilon_r - 1 = \frac{ap}{T} + \frac{be}{T^2}, \quad (4.4)$$

где  $p$  — суммарное давление всех газов воздуха, за исключением водяного пара;  $e$  — давление водяного пара.

С показателем преломления тропосферы  $n$  электрическая восприимчивость  $\chi$  связана соотношением

$$\chi = n^2 - 1 = (n - 1)(n + 1) \approx 2(n - 1). \quad (4.5)$$

Так как показатель преломления воздуха мало отличается от единицы, то удобно ввести параметр  $N$  — индекс преломления, определив его как

$$N = (n - 1) \cdot 10^6. \quad (4.6)$$

Если в формулы (4.4), (4.5) подставить значения констант  $a$  и  $b$ , то для индекса преломления  $N$  получается соотношение [1]

$$N = \frac{76,5}{T} \left( p + \frac{4810 e}{T^2} \right), \quad (4.7)$$



где  $T$  — температура в градусах Кельвина;  $p$  и  $e$  — давление в миллибарах.

Если в формулу (4.7) подставить параметры нормальной тропосферы, то на поверхности Земли

$$N = 325 \quad \text{и} \quad dN/dh = -40 \text{ км}^{-1}.$$

В реальных условиях значения метеопараметров и индекса преломления могут значительно отличаться от принятых для нормальной тропосферы. В любом случае тропосфера является неоднородной средой, поскольку ее показатель преломления изменяется с высотой, а иногда и в горизонтальном направлении. Изменение показателя преломления с высотой приводит к искривлению траектории волны — рефракции. В диапазоне СВЧ начинает сказываться поглощение радиоволн в молекулах газов и рассеяние на капельках воды в гидрометеорах: дожде, тумане, снеге. Кроме того, в тропосфере всегда существуют мелкие неоднородности показателя преломления, которые приводят к рассеянию радиоволн.

Исследование совместного действия всех этих эффектов затруднительно, поэтому будем каждый эффект рассматривать в отдельности.

## 4.2. Рефракция радиоволн

До сих пор, в разд. 1, 2 и 3, мы рассматривали распространение радиоволн в однородной среде — вакууме, хотя и при наличии различных препятствий. Тропосфера, как и ионосфера, являются принципиально отличными — неоднородными средами, поскольку их электрические параметры зависят от координат. Строгое решение задачи о распространении радиоволн в таких средах является достаточно сложным. Однако если учесть, что реальное изменение показателя преломления в тропосфере очень медленное, то решение можно упростить, применив метод геометрической оптики. В нем распространение волны заменяется распространением лучей. Это можно обосновать тем, что при укорочении длины волны уменьшаются поперечные размеры области, существенной для распространения радиоволн, т.е. нескольких первых зон Френеля. В пределе для оптических волн эта область превращается в линию — луч.

При этом сферические участки волновых поверхностей в пределах существенной области становятся все более плоскими. Это позволяет пользоваться законами отражения и преломления для плоских волн — законами Снеллиуса и формулами Френеля для коэффициентов отражения и преломления. Плавное изменение показателя преломления позволяет также пренебречь отражением при переходе волны из одного слоя в другой и учитывать только искривление траектории, т.е. рефракцию. Более строгое обоснование применимости метода геометрической оптики можно найти в [3].

Условие применимости геометрической оптики — малость изменения показателя преломления  $n$  на расстояниях порядка длины волны — можно представить в виде [3]

$$\left| \frac{dn}{dl} \right| \ll \frac{n^2}{\lambda}, \quad (4.8)$$

где  $\lambda$  — длина волны в вакууме.

Это условие выполняется в тропосфере для большинства диапазонов радиоволн.

### 4.2.1. Траектория волны в сферически слоистой среде

Разобьем мысленно тропосферу на тонкие сферические слои, в пределах каждого из которых коэффициент преломления будем считать неизменным (рис. 4.1).

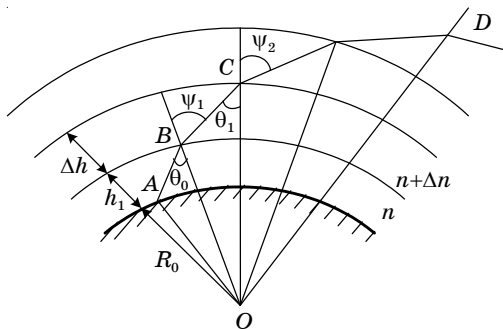


Рис. 4.1. Рефракция радиоволн в сферической слоистой тропосфере

Пусть из точки  $A$  излучается волна, падающая под углом  $\theta_0$  на границу раздела слоев в точке  $B$ . При переходе во второй слой происходит преломление волны, причем если коэффициент преломления убывает с высотой, угол преломления  $\psi_1$  оказывается больше угла падения  $\theta_0$ . На границе раздела второго, третьего и всех последующих слоев также происходит преломление радиоволны. В результате этого радиоволна движется по траектории, имеющей вид ломаной линии  $ABCD$ . Если толщину слоев уменьшить и перейти к плавному изменению коэффициента преломления, то ломаная  $ABCD$  в пределе будет стремиться к некоторой кривой. Таким образом, при прохождении волны в неоднородной среде ее траектория искривляется, т.е. происходит рефракция радиоволны.

Из треугольника  $BOC$  на основании теоремы синусов углов треугольника имеем

$$\frac{\sin \theta_1}{R_0 + h_1} = \frac{\sin \angle OBC}{R_0 + h_1 + \Delta h}. \quad (4.9)$$

На основании закона преломления

$$\sin \angle OBC = \sin \psi_1 = \frac{n}{n + \Delta n} \sin \theta_0.$$

Преобразуя выражение (4.9), получим уравнение траектории радиоволны в сферически слоистой тропосфере:

$$n \sin \theta_0 (R_0 + h_1) = (n + \Delta n)(R_0 + h_1 + \Delta h) \sin \theta_1. \quad (4.10)$$

Чем больше величина  $\Delta n$ , тем больше угол  $\theta_1$  отличается от угла  $\theta_0$  и тем больше траектория отходит от прямолинейной.

Если в (4.10) устремить  $R_0$  к бесконечности, то получим уравнение траектории волны в плоской тропосфере:

$$n \sin \theta_0 = (n + \Delta n) \sin \theta_1.$$

Таким образом, при распространении волны в плоской слоистой среде произведение коэффициента преломления слоя на синус угла падения этой волны на слой остается постоянным:

$$n \sin \theta_0 = \text{const}. \quad (4.11)$$

Определим радиус кривизны траектории радиоволны для плоской тропосферы. На рис. 4.2. изображены две поверхности с коэффициентами преломления  $n$  и  $n + dn$ , отстоящие одна от другой по высоте на малый интервал  $dh$ . Волна, падающая

на нижнюю поверхность под углом  $\theta$ , преломляется и падает на верхнюю поверхность под углом  $\theta + d\theta$ . На участке  $AB$  траектория волны представляется отрезком кривой с радиусом кривизны  $\rho$ .

Радиусы  $OA$  и  $OB$  являются нормальными к кривой в точках  $A$  и  $B$ . Угол между касательными к кривой в точках  $A$  и  $B$  равен  $d\theta$ , следовательно, и угол  $AOB$  равен  $d\theta$ . Радиус кривизны траектории  $\rho$  будет равен

$$\rho = \frac{AB}{d\theta},$$

где  $AB$  — длина дуги.

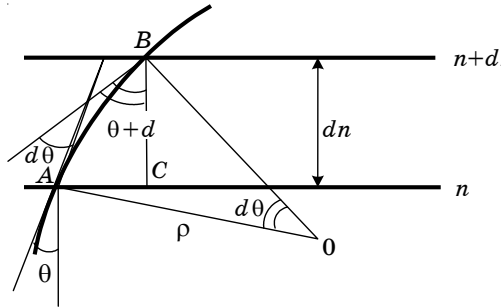


Рис. 4.2. К определению радиуса кривизны траектории волны в тропосфере

Из треугольника  $CAB$  определим отрезок  $AB$ :

$$AB = \frac{dh}{\cos(\theta + d\theta)}.$$

Тогда

$$\rho = \frac{dh}{\cos(\theta + d\theta) d\theta} \approx \frac{dh}{\cos(\theta) d\theta}. \quad (4.12)$$

Возьмем полный дифференциал от уравнения траектории в плоской слоистой среде (4.11):

$$d(n \sin \theta) = dn \sin \theta + n \cos \theta d\theta = 0,$$

и выразим  $\cos \theta d\theta$  через  $n$  и  $dn$ :

$$\cos \theta d\theta = -\frac{dn}{n} \sin \theta. \quad (4.13)$$

Подставляя (4.13) в (4.12), получим

$$\rho = \frac{n}{-\frac{dn}{dh} \sin \theta}. \quad (4.14)$$

Как следует из полученного выражения, наибольшее искривление испытывают пологие лучи, для которых  $\theta \approx 90^\circ$  и радиус кривизны минимален. Вертикально направленные лучи не искривляются.

Перейдем в формуле (4.14) к индексу преломления и запишем ее для пологих лучей. Отличим  $n$  от единицы практически можно пренебречь. Тогда

$$\rho = \frac{10^6}{-dN/dh}. \quad (4.15)$$

Формулы (4.14) и (4.15) справедливы и для сферической тропосферы, поскольку радиус кривизны определяется для небольшого отрезка траектории волны, на котором сферичность Земли не сказывается.

Для нормальной тропосферы радиус кривизны траектории волны согласно (4.15) составляет  $4R_0 \approx 25000$  км, где  $R_0$  — радиус Земли. Если скорость убывания индекса преломления составит  $157 \text{ км}^{-1}$ , то радиус кривизны луча станет равным радиусу Земли. С этим случаем мы еще встретимся ниже.

### 4.2.2. Эквивалентный радиус Земли

Изложенные в гл. 2, 3 методы расчета напряженности поля земных радиоволн не учитывали влияния тропосферы и рассматривали прямолинейное распространение волн. Для учета влияния тропосферной рефракции оказалось удобным заменить распространение волны по криволинейной траектории на распространение по прямолинейной траектории, но над Землей — с другим радиусом — эквивалентным. Понятием эквивалентного радиуса Земли можно пользоваться в том случае, когда коэффициент преломления  $n$  меняется с высотой по линейному закону, т.е.  $dn/dh = \text{const}$ .

Рассмотрим уравнение траектории волны в сферически слоистой тропосфере (4.10):

$$n \sin \theta_0 (R_0 + h_1) = (n + \Delta n)(R_0 + h_1 + \Delta h) \sin \theta.$$

Если коэффициент преломления  $n$  меняется с высотой по линейному закону, это уравнение можно переписать в виде

$$\left( n + \frac{dn}{dh} \Delta h \right) (R_0 + h_1 + \Delta h) \sin \theta = n \sin \theta_0 (R_0 + h_1)$$

или

$$\left( 1 + \frac{\Delta h}{n} \frac{dn}{dh} \right) \left( 1 + \frac{\Delta h}{R_0 + h_1} \right) \sin \theta = \sin \theta_0.$$

Раскрывая скобки и пренебрегая членами второго порядка малости, а также учитывая, что  $n \approx 1$ ,  $R_0 + h_1 \approx R_0$ , получим

$$\left[ 1 + \Delta h \left( \frac{dn}{dh} + \frac{1}{R_0} \right) \right] \sin \theta = \sin \theta_0. \quad (4.16)$$

Если в уравнении (4.16) положить  $dn/dh = 0$ , то оно определит прямолинейную траекторию волны при отсутствии рефракции:

$$\left( 1 + \frac{\Delta h}{R_0} \right) \sin \theta = \sin \theta_0. \quad (4.17)$$

Из сравнения (4.16) и (4.17) видно, что тропосферу можно рассматривать как однородную среду с неизменным по высоте значением  $n$ , если вместо реального радиуса Земли ввести эквивалентный  $R_э$ , определяемый соотношением

$$\frac{1}{R_э} = \frac{dn}{dh} + \frac{1}{R_0},$$

откуда, переходя к индексу преломления, получим

$$R_э = \frac{R_0}{1 + R_0 \frac{dN}{dh} 10^{-6}}. \quad (4.18)$$

Используя эквивалентный радиус Земли, картину распространения радиоволн по криволинейной траектории с радиусом кривизны вблизи реальной земной поверхности (рис. 4.3,а) можно заменить картиной распространения волн по прямолинейной траектории вблизи поверхности Земли с измененным радиусом  $R_э$  (рис. 4.3,б). При этом высота траекторий в обоих случаях будет одинаковой.

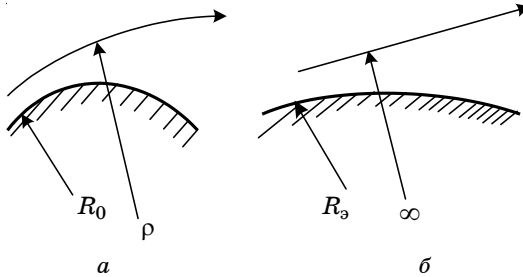


Рис. 4.3. Определение эквивалентного радиуса Земли

Эквивалентный радиус Земли  $R_3$  можно выразить и через радиус кривизны луча  $\rho$ :

$$R_3 = \frac{R_0}{1 - \frac{R_0}{\rho}}. \quad (4.19)$$

Для нормальной тропосферы  $\rho = 4R_0$  и, следовательно, эквивалентный радиус Земли будет равен

$$R_3 = \frac{4}{3} R_0. \quad (4.20)$$

При учете влияния тропосферы на распространение земных радиоволн обычно ограничиваются случаем нормальной тропосферы и заменяют реальный радиус Земли на эквивалентный (4.20) при вычислении приведенных высот антенн и в дифракционных формулах.

### 4.2.3. Виды тропосферной рефракции

Как было показано выше, радиус кривизны луча  $r$ , а следовательно, и рефракция радиоволн в тропосфере определяются градиентом показателя преломления по высоте. В зависимости от знака изменения индекса преломления с высотой  $dN/dh$  тропосферную рефракцию разделяют на положительную или отрицательную (рис. 4.4).

При  $dN/dh > 0$  индекс преломления возрастает с высотой и траектория волны обращена выпуклостью вниз ( $\rho < 0$ ). Такой вид рефракции называют отрицательной тропосферной рефракцией (рис. 4.4,а).

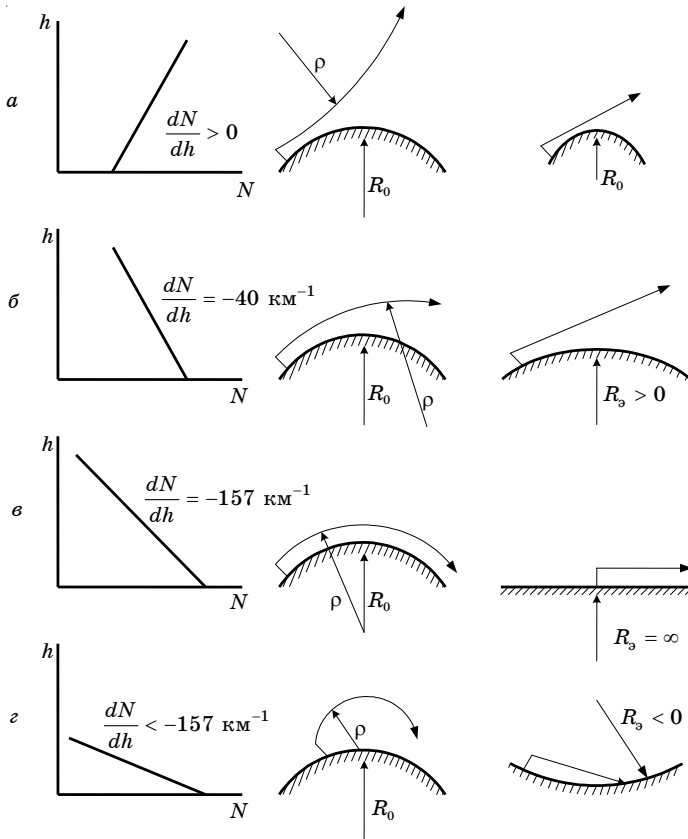


Рис. 4.4. Виды тропосферной рефракции

При  $dN/dh < 0$  индекс преломления убывает с высотой и траектория волны обращена выпуклостью вверх ( $\rho > 0$ ). Такой вид рефракции называют положительной тропосферной рефракцией (рис. 4.4, б). При положительной тропосферной рефракции различают три частных случая.

1. Нормальная тропосферная рефракция, когда

$$\frac{dN}{dh} = -40 \text{ км}^{-1}; \quad \rho = 4R_0; \quad R_3 = \frac{4}{3}R_0.$$

Напряженность поля в точке приема больше, чем при отсутствии рефракции.



2. Критическая тропосферная рефракция, когда

$$\frac{dN}{dh} = -\frac{10^6}{R_0} = -157 \text{ км}^{-1}; \quad \rho = R_0; \quad R_9 = \infty.$$

В этом случае радиус кривизны луча равен радиусу Земли и волна распространяется вдоль земной поверхности. Эквивалентная Земля становится плоской (рис. 4.4, в).

3. Сверхрефракция, когда

$$\frac{dN}{dh} < -157 \text{ км}^{-1}; \quad \rho < R_0; \quad R_9 < 0.$$

При сверхрефракции радиус кривизны меньше радиуса Земли, наступает полное внутреннее отражение волны в тропосфере, и она возвращается на Землю. Эквивалентный радиус Земли  $R_9$  оказывается отрицательным (рис. 4.4, г). После отражения от Земли волна снова уходит в тропосферу и может далее распространяться путем последовательного отражения от тропосферы и Земли на большие расстояния.

Как следует из выражения для индекса преломления (4.7), производная  $dN/dh$  определяется скоростью изменения температуры, давления и влажности с высотой, т.е. погодными условиями. Отрицательная рефракция встречается довольно редко. Как правило, имеет место положительная рефракция. Повышенная влажность, сырая погода, характерная для циклонов, приводит к уменьшению скорости убывания индекса преломления с высотой и уменьшению рефракции. Напротив, сухая, ясная погода приводит к усилению рефракции.

#### 4.2.4. Распространение радиоволн в условиях сверхрефракции

Как уже отмечалось, режимом сверхрефракции может быть охвачена область тропосферы, в которой выполняется условие

$$\frac{dN}{dh} < -157 \text{ км}^{-1},$$

т.е. показатель преломления с высотой резко уменьшается. Такое убывание  $N$  с высотой наиболее часто связано с температурной инверсией, при которой температура воздуха не уменьшается, как обычно, а возрастает с высотой. В этих областях индекс преломления  $N$  резко убывает с высотой (рис. 4.5).

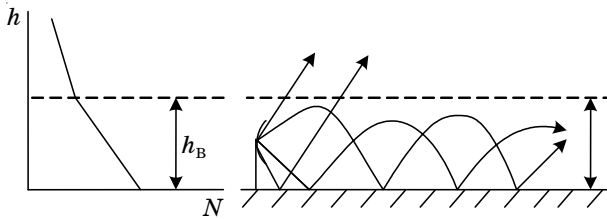


Рис. 4.5. Изменение показателя преломления тропосферы с высотой и распространение УКВ в условиях тропосферного волновода

Возникает температурная инверсия по следующим причинам:

- 1) горизонтальный перенос воздушных масс, когда теплый воздух суши, например, оказывается над холодным воздухом, прилежащим к поверхности моря;
- 2) охлаждение поверхности Земли. После захода солнца в первую очередь охлаждаются прилегающие к ней слои воздуха. Такое явление характерно для засушливых районов и пустынь;
- 3) сжатие воздушных масс. Температурная инверсия возникает за счёт выделения тепла при сжатии воздушных масс при антициклонах.

Когда область сверхрефракции занимает значительное расстояние над земной поверхностью, радиоволны УКВ-диапазона могут быть приняты на весьма больших расстояниях от передатчика, много больших расстояния прямой видимости. Радиоволны в этом случае распространяются путём последовательного отражения в тропосфере и от поверхности Земли.

Это явление аналогично распространению волн в волноводе. Поэтому инверсионный слой, в котором возникает такая передача энергии, называют тропосферным волноводом. По аналогии с металлическим волноводом, тропосферный волновод имеет критическую длину волны, которая связана с высотой волновода соотношением

$$\lambda_{кр} = 8 \cdot 10^{-4} \cdot h_B^{3/2}, \quad (4.21)$$

где  $h_B$  — высота тропосферного волновода, м.

Волны длиннее  $\lambda_{кр}$  не захватываются волноводом и испытывают только дополнительное искривление на его границе.

Эксперименты по измерению показателя преломления в тропосфере показывают, что высота тропосферных волноводов редко превышает 200 м и, следовательно, в тропосферных волноводах возможно распространение в основном сантиметровых и дециметровых волн.

Значение сверхрефракции для дальней радиосвязи невелико, так как само явление температурной инверсии носит нерегулярный характер и не может обеспечить устойчивой связи на большие расстояния. Однако появление тропосферного волновода может являться причиной помех при работе радиолокационных станций, которые не могут обнаружить самолёт, находящийся выше тропосферного волновода. Заметим, что сверхрефракция оптических волн была известна человечеству с древнейших времен как явление миража.

### 4.3. Распространение радиоволн путем рассеяния на неоднородностях тропосферы

Дальнее распространение радиоволн УКВ-диапазона имеет место и при отсутствии сверхрефракции. Основной причиной заметных уровней напряжённости электрического поля за пределами горизонта, превышающих величину напряжённости дифракционного поля, является рассеяние радиоволн неоднородностями тропосферы. Эти неоднородности непрерывно возникают в тропосфере за счёт постоянно существующего турбулентного (вихревого) движения воздуха. Величина неоднородностей, как правило, очень мала, изменение индекса преломления  $\Delta N$  составляет всего несколько единиц при индексе преломления  $N = 325$  для нормальной тропосферы.

Схематически тропосферная линия связи за счёт рассеяния на неоднородностях изображена на рис. 4.6.

Допустим, что неоднородности сосредоточены в объёме  $V$ . Все неоднородности в этом объёме являются источниками рассеянного излучения. Рассмотрим одну из точек объёма. Пусть в точке  $Q$  передающая антенна создаёт плотность потока мощности, равную

$$\Pi_Q = \frac{P_1 D_1}{4\pi r_1^2},$$

где  $D_1$  — коэффициент направленного действия передающей антенны;  $P_1$  — мощность излучения передающей антенны;  $r_1$  — расстояние от передающей антенны до точки  $Q$  объема рассеяния.

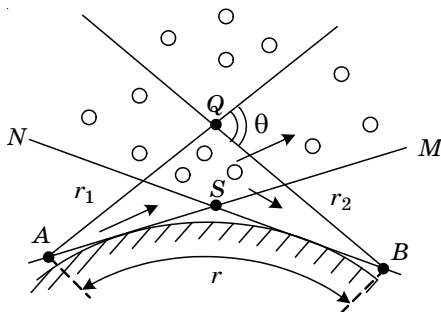


Рис. 4.6. Тропосферная линия связи за счёт рассеяния на неоднородностях тропосферы

Обозначим через  $S(\theta)$  удельную эффективную площадь рассеяния единицы объема тропосферы с центром в точке  $Q$ . Эффективной площадью рассеяния называется величина (имеющая размерность площади), которая, будучи умноженной на плотность потока мощности первичного излучения (в месте расположения рассеивающего тела) и разделенной на  $4\pi r_2^2$ , даёт плотность потока мощности рассеянного излучения в точке приема. Удельная эффективная площадь рассеяния является функцией угла рассеяния  $\theta$ .

Тогда мощность вторичного излучения, рассеянного элементом объема  $dV$  с центром в точке  $Q$ , будет

$$dP_Q = \frac{P_1 D_1 S(\theta)}{4\pi r_1^2} dV. \quad (4.22)$$

Плотность потока мощности переизлученной волны от объема  $dV$  в месте расположения приёмной антенны будет

$$d\Pi_B = \frac{dP_Q}{4\pi r_2^2},$$

где  $r_2$  — расстояние от рассеивающего тела до приемника.

Мощность, извлекаемая приёмной антенной:

$$dP_2 = d\Pi_B S_{2\text{эфф}}, \quad (4.23)$$

где  $S_{2\text{эфф}}$  — эффективная площадь приёмной антенны, связанная с коэффициентом направленного действия  $D_2$  соотношением (1.9).

Подставляя в соотношение (4.23) значения  $d\Pi$  и  $S_{2\text{эфф}}$ , найдем мощность, создаваемую единицей объёма рассеяния в месте расположения приемной антенны:

$$dP_2 = \frac{P_1 D_1 D_2 \lambda^2 S(\theta) dV}{16\pi^2 r_1^2 r_2^2}.$$

Для определения мощности, создаваемой переизлучением всех неоднородностей объёма  $V$ , проинтегрируем это выражение по всему объёму рассеяния:

$$P_2 = \frac{P_1 D_1 D_2 \lambda^2}{64^3 \pi} \int_V \frac{S(\theta) dV}{r_1^2 r_2^2}. \quad (4.24)$$

Формула (4.24) показывает, что для расчёта мощности радиоволны в приёмной антенне, во-первых, необходимо знать конфигурацию объёма  $V$  тропосферы, участвующего в создании рассеянного излучения. Рассеивающий объём обычно определяют как пространство, ограниченное пересечением главных лепестков диаграмм направленности передающей и приёмной антенн. Во-вторых, необходимо знать выражение удельной эффективной площади рассеяния. Эту величину получают при статистическом рассмотрении процесса рассеяния радиоволн на неоднородностях тропосферы и выражают через среднеквадратичное значение флуктуаций диэлектрической проницаемости тропосферы [1, 7].

Воспользоваться формулой (4.24), как правило, не удастся из-за недостаточной изученности функции  $S(\theta)$ . Кроме того, рассмотренная модель дальнего тропосферного распространения (ДТР), основанная на существовании мелких неоднородностей в тропосфере, не является единственной. Существуют теории, учитывающие также и отражения радиоволн в тропосфере от слоистых образований [1, 3, 4]. Поэтому при расчетах поля при ДТР используются в основном экспериментальные данные.

На рис. 4.7 приведен пример записи зависимости напряженности поля  $E$  в точке приема от времени  $t$ .

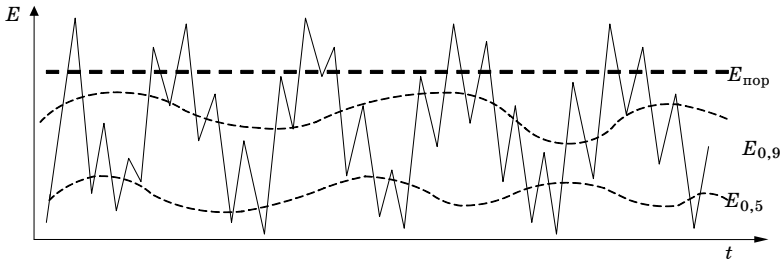


Рис. 4.7. Запись напряженности поля сигнала, подверженного замираниям

Из рисунка видно, что напряженность поля испытывает случайные изменения своего уровня, которые называются замираниями. По своему характеру и длительности замирания можно четко разделить на два типа: быстрые и медленные. Длительность быстрых замираний составляет от долей секунд до нескольких минут. Медленные замирания имеют длительность от часов до суток и более. Установлено, что причиной быстрых замираний является интерференция в точке приема большого количества волн, рассеиваемых отдельными частями  $\Gamma \acute{a} V$ . При этом амплитуды этих волн можно считать постоянными, а фазы изменяются случайным образом в пределах от 0 до  $2\pi$  из-за турбулентного движения воздуха в рассеивающем объеме  $V$ . Медленные замирания связаны с изменением метеоусловий на трассе распространения, например выпадением осадков, изменением давления, температуры и т.п.

Пунктирными линиями на рис. 4.7 обозначены уровни напряженности поля, которые превышаются сигналом в течение определенного времени наблюдения. Так, уровень  $E_{0,5}$  превышает в течение 50 % времени наблюдения. Такой уровень называется медианным. Уровень  $E_{0,9}$  превышает в течение 90 % времени наблюдения. Очевидно, что можно провести уровни сигналов, превышаемые для любой заданной доли времени наблюдения.

На рис. 4.7 нанесена также линия постоянного уровня  $E_{\text{пор}}$ , которая соответствует пороговой чувствительности приемного устройства, включающего и приемную антенну.

Очевидно, что величина напряженности поля в точке приема зависит от параметров передающего устройства и трассы, а  $E_{\text{пор}}$  определяется только параметрами приемного устройства. При изменении мощности передатчика кривая  $E(t)$  смещается относительно уровня  $E_{\text{пор}}$ . Если мощность передатчика будет такой, что  $E_{\text{пор}} = E_{0,5}$ , то связь будет осуществляться только в течение 50 % времени связи и надежность такой связи составит 50 %. Для увеличения надежности связи до 90 % необходимо увеличивать мощность передатчика так, чтобы против уровня  $E_{\text{пор}}$  пришелся уровень  $E_{0,9}$ .

Увеличение мощности передатчика в децибелах будет равно разности уровней  $E_{\text{мед}} - E_{0,9}$ , выраженной также в децибелах, поскольку изменение мощности передатчика и соответствующее изменение напряженности поля в точке приема выражаются в децибелах одним и тем же числом.

Зависимость вероятности превышения уровня от его значения в относительных единицах называется функцией распределения случайной величины [1]. Обычно уровни сигнала определяют в относительных единицах по отношению к медианному уровню и выражают в децибелах:

$$E_{0,9} = 20 \lg \frac{E_{0,9}}{E_{0,5}}.$$

Таким образом, чтобы определить мощность передатчика, обеспечивающую требуемую надежность связи, необходимо знать функцию распределения напряженности поля и величину мощности передатчика при вероятности связи 50 %.

Увеличение мощности передатчика является не единственным и далеко не оптимальным способом повышения надежности связи. Для борьбы с быстрыми замираниями и получения более устойчивого сигнала используют также приём на две или четыре антенны. Их разносят в направлении, перпендикулярном трассе, на расстояние  $(70 \div 100)\lambda$ . Принятые отдельными антеннами сигналы детектируют и затем складывают. Очевидно, чем больше расстояние между антеннами, тем больше некоррелированность замираний. Аналогичный эффект дает использование для передачи сообщений нескольких частот (разнесение по частоте).

Радиолинии тропосферного рассеяния используют в основном там, где нельзя установить ретрансляторы радиорелейных линий — над проливами, в малонаселенных районах. Протяженность таких радиолиний составляет 300–600 км. Их основной недостаток — большие потери энергии при распространении радиоволн. Это предъявляет повышенные требования к аппаратуре, в частности, требуется применение передатчиков большой мощности (10–100 кВт) и антенн с большим КНД. При этом для антенн с КНД больше 40 дБ наблюдается эффект «потери усиления антенн». Он проявляется в том, что увеличение КНД антенн не приводит к увеличению мощности в нагрузке приемной антенны в соответствии с формулой (4.24). Это объясняется тем, что при увеличении КНД происходит сужение диаграмм направленности и, как следствие, уменьшение рассеивающего объема  $V$ .

К недостаткам таких линий связи следует отнести и невозможность передачи широкой полосы частот без искажения.

#### 4.4. Инженерный метод расчета радиорелейных линий на основе ДТР

Остановимся кратко на инженерном методе расчета радиорелейных линий связи (РРЛ) на основе дальнего тропосферного распространения (ДТР) за счет рассеяния радиоволн в тропосфере. Метод основан на экспериментальных данных по определению множителя ослабления на трассах протяженностью несколько сотен километров. Исходными данными будем считать: расстояние  $r$ , частоту  $f$  или длину волны  $\lambda$ , надежность связи  $P$ , пороговую чувствительность  $E_{\text{пор}}$  или чувствительность приемника  $P_{\text{пр}}$ , коэффициенты направленного действия антенн  $D_1$  и  $D_2$ .

Подлежит определению мощность излучения передающей антенны  $P_1$ .

Представим мощность в приемном устройстве в виде формулы радиосвязи в свободном пространстве (1.10) с коэффициентом ослабления  $F$ :

$$P_{\text{пр}} = P_1 \frac{D_1 D_2 \lambda^2}{(4\pi r)^2} F. \quad (4.25)$$



Выразим из этой формулы излучаемую мощность  $P_1$ :

$$P_1 = P_{\text{пр}} \frac{(4\pi r)^2}{D_1 D_2 \lambda^2 F}. \quad (4.26)$$

Множитель ослабления  $F$  определяется потерями, связанными с необходимостью достижения в точке приема медианного уровня  $F_{\text{мед}}$ , и компенсацией быстрых  $F_6$  и медленных  $F_M$  замираний:

$$F = F_{\text{мед}} F_6 F_M$$

или (в децибелах)

$$F = F_{\text{мед}} + F_6 + F_M. \quad (4.27)$$

Экспериментальные данные для медианного уровня при ДТР, представленные в виде графиков, приводятся в большинстве учебников и учебных пособий по распространению радиоволн. Пример такого графика приведен на рис. 4.8 [1,13].

Зависимости множителя ослабления на рис. 4.8 можно аппроксимировать выражением

$$F_{\text{мед}} = -50 + \frac{632}{f} - 0,216\sqrt{f} - 7,1r \cdot 10^{-2}, \quad (4.28)$$

где  $r$  — расстояние в километрах;  $f$  — частота в мегагерцах;  $F_{\text{мед}}$  — ослабление медианного уровня напряженности поля по отношению к свободному пространству в децибелах.

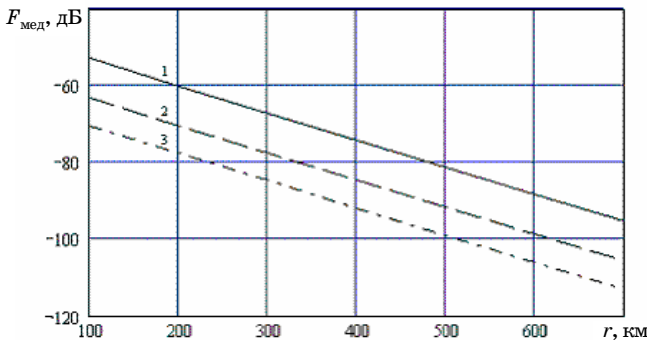


Рис. 4.8. Зависимость медианных значений множителя ослабления от расстояния для зимних условий:

1 —  $f = 100$  МГц; 2 —  $f = 1000$  МГц; 3 —  $f = 4000$  МГц

Определим теперь  $F_6$ .

Быстрые замирания подчиняются закону распределения Релея (см. приложение). Как отмечалось в подразд. 4.3, необходимое увеличение излучаемой мощности  $F_6$  в децибелах определяется по графику функции распределения как величина  $E_{\min}(P)$  для заданной надежности связи  $P$ .

Для закона Релея эта функция имеет вид (П8, см. приложение).

$$F_6(P) = E_{\min}(P) = 10 \lg \left( \frac{\lg(1 - \sqrt[n]{1-P})}{\lg 2} \right), \quad (4.29)$$

где  $P$  — надежность связи;  $n$  — число разнесенных антенн.

Графики, соответствующие формуле (4.29), приведены в литературе по распространению радиоволн [1–7]. Пример такого графика представлен на рис. 4.9.

Медленные замирания подчиняются логарифмически нормальному закону распределения (см. приложение). Для этого закона распределения случайной величины функция распределения выражается формулой

$$P(E_{\min}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{E_{\min}}^{\infty} \exp\left(-\frac{E^2}{2\sigma^2}\right) dE, \quad (4.30)$$

где  $\sigma$  — стандартное отклонение; а  $\sigma^2$  — дисперсия медленных замираний.

Особенностью медленных замираний при ДТР является то, что дисперсия  $\sigma^2$  зависит от длины трассы и КНД антенн. Зависимости стандартного отклонения медленных замираний от расстояния  $r$  при двух значениях коэффициента усиления антенн  $G$  приведены на рис. 4.10 [4].

Как видно из рис. 4.10, при увеличении расстояния до 250–300 км дисперсия сначала растет. Это связано с увеличением рассеивающего объема. При дальнейшем увеличении расстояния дисперсия уменьшается, поскольку рассеивающий объем поднимается над Землей и флуктуации индекса преломления уменьшаются.

В отличие от закона распределения Релея, функция, обратная к функции распределения, т.е.  $E_{\min}(P)$ , как аналитическая функция не находится. Найти функцию  $E_{\min}(P)$  можно

численным расчетом из формулы (4.30). Результаты расчета функции  $E_{\min}(P)$  при различных расстояниях и дисперсиях приведены на рис. 4.11.

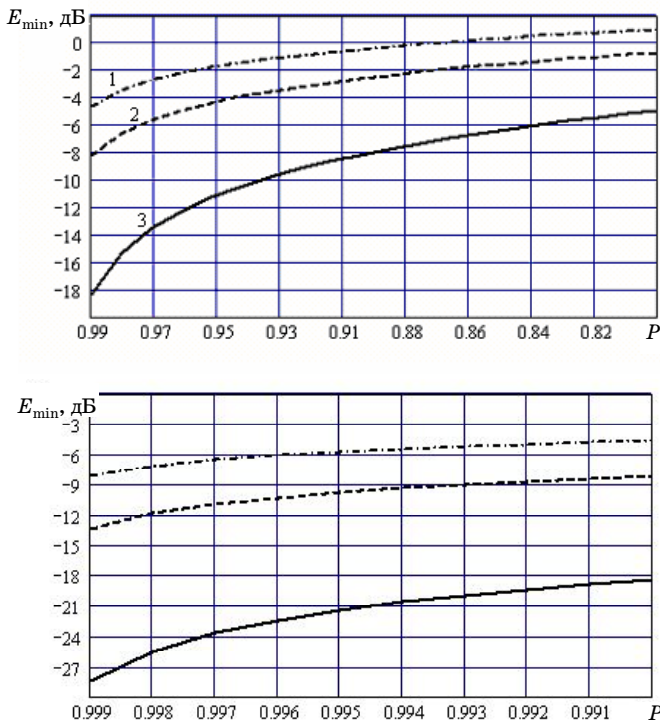


Рис. 4.9. Зависимость  $F_{\bar{\sigma}} = E_{\min}(P)$  для быстрых замираний,  $n$  — число разнесенных антенн: 1 —  $n = 1$ ; 2 —  $n = 2$ ; 3 —  $n = 3$

Таким образом, определение  $F_{\text{м}} = E_{\min}(P)$  сводится к определению дисперсии по заданному расстоянию  $r$  и коэффициенту усиления передающей антенны  $G$  из графиков рис.4.10 и численному решению уравнения (4.30) для заданного значения вероятности связи  $P$ .

Другой способ определения  $F_{\text{м}} = E_{\min}(P)$  состоит в использовании экспериментальных зависимостей  $E_{\min}(P)$ , приведенных в литературе [1,14], которые могут быть аппроксимированы следующим выражением:

$$F_m = E_{\min}(P, r) = 29,4 - 0,025r + (-38,6 + 0,036r)P + 6(1 - 0,001r)\lg(1 - P). \quad (4.31)$$

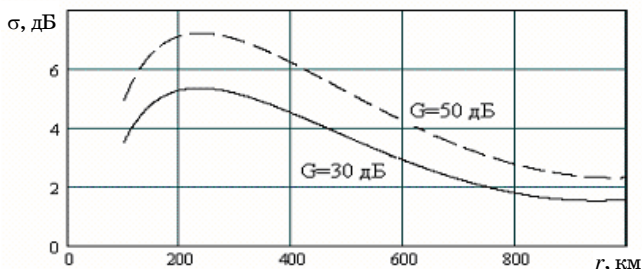


Рис. 4.10. Зависимость стандартного отклонения медленных замираний от расстояния и усиления антенн

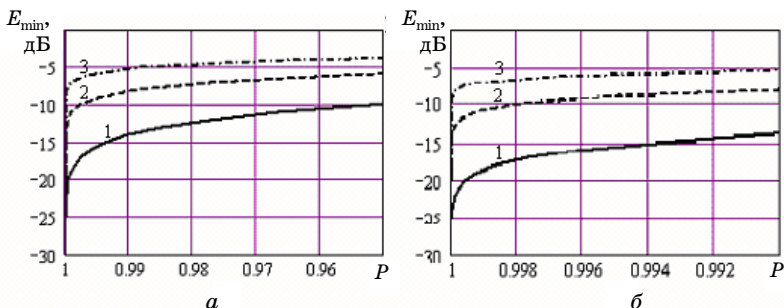


Рис. 4.11. Зависимость уровня  $E_{\min} = F_m$  от вероятности его превышения для медленных замираний:

- $a$  —  $P$  от 0,95 до 0,99;  $b$  —  $P$  от 0,990 до 0,999;  
 1 —  $\sigma = 6$  дБ,  $r = 300$  км; 2 —  $\sigma = 3,5$  дБ,  $r = 600$  км;  
 3 —  $\sigma = 2,2$  дБ,  $r = 800$  км

Рассмотрим пример энергетического расчета линии связи при ДТР.

**Пример.** Определить мощность передатчика для радиорелейной линии, использующей ДТР, для обеспечения радиосвязи в течение 99,9 % времени. Протяженность трассы 500 км, коэффициент направленного действия антенны  $D = 40$  дБ, частота 400 МГц, чувствительность приемника  $10^{-13}$  Вт, для уменьшения замираний используется прием на две антенны.

*Решение.* Определим вначале потери в децибелах при распространении радиоволн в свободном пространстве, выразив их из формулы (1.10)

$$P_2 = P_1 \frac{D_1 D_2 \lambda^2}{(4\pi r)^2},$$

где  $P_2$  — принятая мощность, должна быть  $10^{-13}$  Вт;  $P_1$  — излучаемая мощность, подлежит определению;  $\lambda = c/f = 0,75$  м.

Отсюда

$$\begin{aligned} L_{\text{св}} &= 10 \lg \frac{P_2}{P_1} = D_1 + D_2 + 20 \lg \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right) = \\ &= 40 + 40 - 138,5 = -58,5 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Эта цифра определяет отношение принятой мощности  $P_2$  к излучаемой  $P_1$  при заданных антеннах для свободного пространства. При этом потребовалась бы излучаемая мощность, равная

$$P_1 = P_2 \cdot 10^{-L_{\text{св}}/10} = 7,08 \cdot 10^{-8} \text{ Вт.}$$

Определим потери, связанные с необходимостью достижения в точке приема медианного уровня  $F_{\text{мед}}$ . По формуле (4.28) для частоты 400 МГц и дальности 500 км эти потери составляют 88 дБ.

Это означает, что при увеличении мощности передатчика на 88 дБ в условиях ДТР будет обеспечена связь в течение 50 % времени. При этом необходимая мощность передатчика составит

$$P_1 = 7,08 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{88/10} = 44,67 \text{ Вт.}$$

Как следует из рис. 4.9 и формулы (4.26), уровень напряженности поля, который превышает в течение 99,9 % времени при быстрых замираниях и приеме на две антенны, лежит ниже медианного на 13,34 дБ. Это означает, что для обеспечения заданной надежности связи в присутствии быстрых замираний мощность передатчика должна быть увеличена на 13,34 дБ и составит

$$P_1 = 44,67 \cdot 10^{13,34/10} = 963,83 \text{ Вт.}$$

Для компенсации медленных замираний необходимое увеличение мощности определим численным решением уравне-

ния (4.28). В результате при  $P = 0,999$  получим  $F_m = -12,68$  дБ, что потребует увеличения излучаемой мощности до

$$P_1 = 963,83 \cdot 10^{12,68/10} = 17860 \text{ Вт} = 17,86 \text{ кВт.}$$

Этот же результат можно получить, определив полные потери на линии связи как сумму отдельных слагаемых:

$$L = -58,5 - 88 \cdot 13,34 \cdot 12,68 = -172,52 \text{ дБ.}$$

Необходимая мощность излучения составит

$$P_1 = P_2 \cdot 10^{-L/10} = 10^{-13} \cdot 10^{17,252} = 17,86 \text{ кВт.}$$

В заключение заметим, что ошибка в определении полных потерь в линии связи ДТР может составлять от единиц до десятков децибел, поскольку экспериментальные данные по медианным уровням и медленным замираниям существенно зависят от конкретных условий.

## 4.5. Ослабление радиоволн в тропосфере

При распространении в тропосфере радиоволны испытывают дополнительное ослабление по отношению к ослаблению поля в свободном пространстве. Это ослабление называется затуханием. Причинами затухания волн в тропосфере являются: 1) поглощение радиоволн гидрометеорами и газами атмосферы; 2) рассеяние радиоволн гидрометеорами — дождем, снегом, градом, туманом.

Прежде чем анализировать конкретные причины затухания в тропосфере, уточним единицы его измерения.

Множитель ослабления в тропосфере определяют по формуле

$$V = e^{-\Gamma'' r}, \quad (4.32)$$

где  $\Gamma''$  — коэффициент затухания, выраженный в неперах на метр, или по формуле

$$V = 10^{-\frac{\Gamma'' r}{20}}, \quad (4.33)$$

где  $\Gamma''$  — коэффициент затухания, выраженный в децибелах на метр, причем  $1 \text{ Нп} = 8,68 \text{ дБ}$ .

Коэффициент затухания обычно выражают в децибелах на километр, так как расстояние удобнее определять в километрах.

Поглощение радиоволн газами атмосферы и парами воды имеет резонансный характер. Молекулы воды имеют постоянные электрические моменты, а молекулы кислорода — постоянные магнитные. Если частота волны совпадет с собственными частотами этих молекул, то наступают резонансные явления и энергия волны переходит во внутреннюю энергию молекул. Это обуславливает селективное поглощение волн определенной частоты (рис. 4.12). Резонансные линии поглощения всех других газов расположены вне диапазона радиоволн.

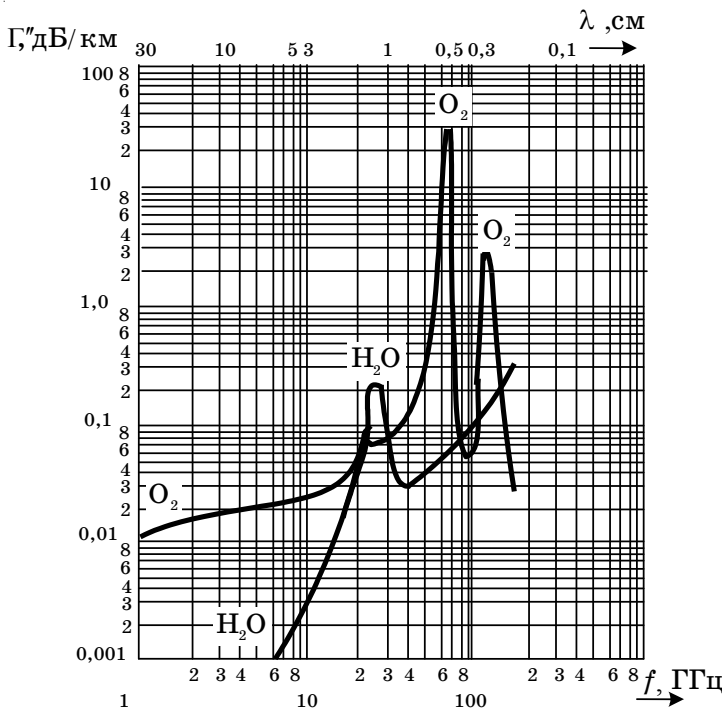


Рис. 4.12. Зависимость коэффициента поглощения от частоты в молекулах кислорода и парах воды

Из рис. 4.12 видно, что в молекулах  $H_2O$  имеется четко вы-

раженный резонанс на длине волны 1,35 см ( $\Gamma'' = 0,2$  дБ/км) и возрастание затухания при  $\lambda < 0,2$  см. В молекулах  $O_2$  наблюдаются резонансы при  $\lambda = 0,5$  см ( $\Gamma'' \approx 13$  дБ/км) и при  $\lambda = 0,25$  см ( $\Gamma'' \approx 3$  дБ/км). По причине большого селективного поглощения радиоволны с длиной меньше 1,5 см не используются для передачи сигналов в тропосфере.

В гидрометеорах оба фактора затухания радиоволн (поглощение и рассеяние) проявляются одновременно и поэтому их не разделяют (рис. 4.13) [2].

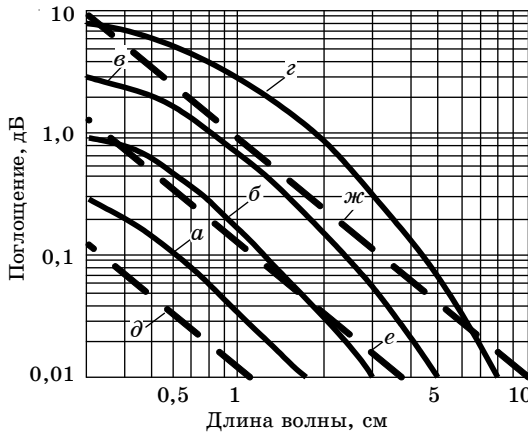


Рис. 4.13. Зависимость коэффициента поглощения

за счет рассеяния на гидрометеорах от длины волны:

- а* — моросающий дождь 0,25 мм/час; *б* — легкий дождь 1 мм/час;
- в* — умеренный дождь 4 мм/час; *г* — сильный дождь 15 мм/час;
- д* — слабый туман; *е* — средний туман; *ж* — сильный туман

Наиболее существенным препятствием гидрометеоры (капельки дождя, тумана, снежинки) являются для радиоволн короче 10 см. Более длинные волны существенного поглощения в гидрометеорах не испытывают (рис. 4.13). Так как диэлектрическая проницаемость снега и града ( $\epsilon_r = 1$  и  $5$ ) гораздо меньше, чем у жидкой фазы воды ( $\epsilon_r = 80$ ), то ослабление радиоволны в граде составляет несколько процентов от ослабления в дожде такой же интенсивности. Ослабление в сухом снеге также мало [4].



## Контрольные вопросы

1. Дайте определение рефракции радиоволн. Сравните рефракцию с дифракцией по проявлению и причинам, их вызывающим.

2. С какими параметрами воздушной среды и как связан показатель преломления тропосферы?

3. В чем состоит приближение геометрической оптики при анализе распространения радиоволн в тропосфере? При каких условиях можно пользоваться этим приближением?

4. Что такое эквивалентный радиус Земли, чему он равен и при каких условиях им можно пользоваться?

5. От каких параметров тропосферы зависит радиус кривизны траектории волны?

6. Дайте определение нормальной тропосфере и нормальной тропосферной рефракции. Как учитывается нормальная рефракция при определении напряженности поля радиоволн?

7. Какая погода способствует увеличению дальности распространения радиоволн в тропосфере?

8. При каких условиях возможно возникновение тропосферного волновода?

9. Объясните механизм дальнего тропосферного распространения радиоволн? На каких частотах работают линии связи, использующие явление ДТР?

10. Назовите причины быстрых и медленных замираний напряженности поля при ДТР? Какие меры обеспечения качественной связи применяются в линиях связи, использующих ДТР?

11. Волны каких диапазонов интенсивно поглощаются и рассеиваются в тропосфере?

## 5. Ионосфера и ее влияние на распространение радиоволн

### 5.1. Состав и строение ионосферы

Ионосферой называют область атмосферы, расположенную на высотах более 50–60 км над поверхностью Земли. За верхнюю границу ионосферы принимают область высот 15–20 тыс. км, где плотность газа близка к плотности газа в межпланетном пространстве. Область атмосферы, существенно влияющая на условия распространения радиоволн, ограничена меньшими высотами, порядка 1–1,5 тыс. км. С высот, больших 50 км, газ в атмосфере ионизирован и содержит большое число свободных электронов и положительных ионов. Процесс ионизации состоит в том, что под действием квантов солнечного излучения от нейтральных молекул отрываются электроны, а молекулы превращаются в положительно заряженные ионы. Условно этот процесс можно выразить соотношением



где  $N_2$  — молекула азота, из которого в основном состоит атмосфера на высотах 100–300 км;  $h\nu$  — квант энергии солнечного излучения;  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка;  $\nu$  — частота излучения;  $N_2^+$  — положительный ион азота;  $e$  — электрон.

Конечно, в ионосфере одновременно с ионизацией происходит и обратный процесс — рекомбинация — воссоединение положительного иона с электроном и образование нейтральной молекулы. С восходом Солнца ионизация преобладает над рекомбинацией и электронная концентрация растет. С заходом Солнца в результате рекомбинации электронная концентрация уменьшается.

Для того чтобы ионизация была возможна, энергия кванта должна быть по крайней мере не меньше работы выхода для молекулы азота. Анализ значений работ выхода газов, составляющих ионосферу, показывает, что ионизацию может совершить лишь ультрафиолетовое излучение Солнца с длиной волны меньше 1000 ангстрем и более короткое — рентгеновское. Ионизацию создают также метеориты, вторгающиеся в земную

атмосферу. Образование ионосферы на определенной высоте над Землей объясняется тем, что энергия ионизирующего излучения уменьшается на пути к Земле за счет ионизации и на поверхности Земли она очень ослаблена. Таким образом, ионосфера защищает Землю от опасного для жизни ультрафиолетового и рентгеновского излучения.

В результате экспериментальных исследований получены полные сведения о строении ионосферы (рис. 5.1). Установлено, что на высоте 250–400 км имеется основной максимум ионизации. Выше и ниже этого максимума электронная плотность убывает. Нижнюю область называют внутренней, верхнюю — внешней ионосферой.

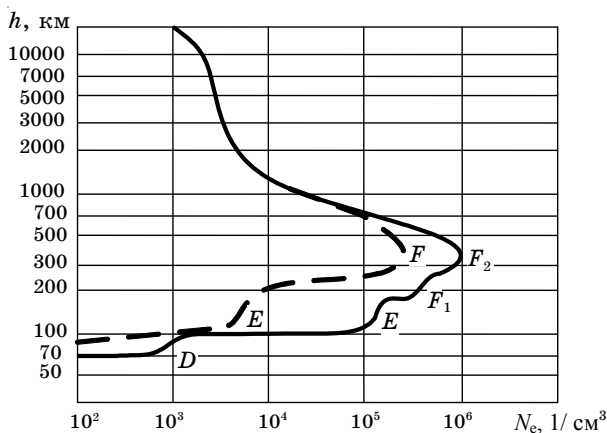


Рис. 5.1. Распределение электронной плотности ионосферы:  
ночью ————, днем —————

Во внутренней ионосфере существует несколько неярко выраженных максимумов концентрации электронов. Они называются слоями и обозначаются символами  $D$ ,  $E$ ,  $F$ . Ионосферные слои характеризуются следующими параметрами: плотностью электронов в максимуме ионизации; высотой нижней границы, полутолщиной слоя (высотой от нижней границы до максимума ионизации); числом столкновений электронов с нейтральными молекулами. Данные о слоях ионосферы представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

## Параметры иносферных слоев

Название	Высота, км	$N_e$ , $1/\text{см}^3$	Число соударений $\nu$ , $1/\text{с}$	Условия существования слоя
$D$	60–80	$10^3\text{--}10^4$	$10^7$	Днем
$E$	100	$1,5\text{--}10^5$ — днем $5\text{--}10^3$ — ночью	$10^5$	Всегда
$F(F_1)$	200–230	$(2\text{--}4)\cdot 10^5$	$10^4$	Днем летом
$F(F_2)$	300–400	$(4\text{--}9)\cdot 10^5$	$10^3\cdot 10^4$	Днем и ночью летом
$F_2$	220–240 300–330	$(0,6\text{--}2) 10^6$ $2,5\cdot 10^5$	$10^3\cdot 10^4$	Днем зимой Ночью зимой

Из данных таблицы следует, что слой  $D$  — нижний слой — существует лишь днем и зимой и летом. Ночью свободные электроны в нем полностью рекомбинируют с ионами. Слой  $E$  существует всегда, хотя ночью, с заходом Солнца, электронная концентрация в нем уменьшается. Слой  $E$  является самым устойчивым ионосферным слоем, и процессы в нем хорошо описываются современной теорией. Слой  $F$  зимой ведет себя подобно слою  $E$ , но электронная концентрация в нем гораздо больше. Летом слой  $F$  распадается на два слоя —  $F_1$  и  $F_2$ , причем слой  $F_1$  существует только днем. Необходимо иметь в виду, что число электронов даже в максимумах электронной концентрации гораздо меньше числа нейтральных молекул, концентрация которых в области слоя  $D$  составляет  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  и уменьшается до  $10^{10} \text{ см}^{-3}$  в слое  $F_2$ . Этим объясняется такое большое число соударений электронов с нейтральными молекулами за одну секунду ( $n$ ).

В заключении описания основных физических свойств ионосферы следует отметить, что гипотеза о существовании ионизированной области в верхних слоях атмосферы высказывалась задолго до изобретения радио. Свое косвенное подтверждение она получила в 20-х годах XX века, когда была установлена радиосвязь на коротких волнах между Америкой и Европой. Теория дифракции не может объяснить этот факт из-за малой длины волны. Прямое доказательство существования

ионосферы было получено только в 30-х годах после вертикального зондирования ионосферы радиоимпульсом и приема на Земле отраженного сигнала. Для проведения таких исследований в разных районах Земли было построено много ионосферных станций. Одна из первых в СССР такая станция была построена в Томске при Томском государственном университете. Поскольку сначала было неизвестно общее число ионосферных слоев, то им присваивали названия не с первой буквы, а с некоторым запасом. Первым был открыт слой *E*, а ниже его оказался лишь один слой *D*. По данным ионосферных станций можно определить значения максимальной электронной концентрации в каждом слое. Конечно, эти данные были уточнены с началом полетов искусственных спутников Земли. Существование ионосферы оказывает определяющее влияние на распространение радиоволн всех диапазонов, кроме УКВ, но и в нем ионосфера влияет на космическую связь, связь со спутниками, радиоастрономию и т.п.

## 5.2. Электрические параметры ионосферы

Наличие в верхних слоях атмосферы кроме нейтральных молекул свободных электронов и ионов определяет электрические параметры ионосферы. В целом, ионосфера является электрически нейтральной средой, поскольку число положительных и отрицательных частиц в ней одинаково. В физике такой ионизированный газ называется плазмой. Рассмотрим распространение плоской монохроматической волны в плазме, считая ее однородной.

При прохождении радиоволны через плазму, в данном случае ионосферу, положительные ионы и свободные электроны начинают двигаться упорядоченно в такт с изменением поля волны. Движущиеся в ионосфере заряды можно рассматривать как некоторый конвекционный ток. Плотность конвекционного тока электронов определяется концентрацией электронов в газе  $N_e$  и скоростью их движения  $\vec{V}$ :

$$\vec{\delta}_{эл} = eN_e \vec{V}, \quad (5.2)$$

где  $e$  — заряд электрона.

В этом уравнении неизвестна скорость движения электронов  $\vec{V}$ .

Определим ее, используя уравнение движения электрона

$$m \frac{dV}{dt} + m\nu V = eE, \quad (5.3)$$

где  $m$  — масса электрона;  $\nu$  — число столкновений электронов с молекулами в единицу времени;  $eE$  — сила, действующая на электрон со стороны электрического поля волны. Поскольку вектора  $\vec{E}$  и  $\vec{V}$  параллельны, знаки векторов в выражении (5.3) опускаем.

Величина  $m\nu V$  характеризует изменение количества движения электронов при соударениях за единицу времени и имеет смысл силы трения.

Решение уравнения (5.3) ищем в виде

$$V = Ae^{j\omega t}, \quad (5.4)$$

где  $\omega$  — круговая частота электромагнитной волны.

В результате подстановки (5.4) в (5.3) получим

$$V = \frac{eE}{m(\nu + j\omega)}$$

и выражение для конвекционного тока электронов преобразуется к виду

$$\delta_{эл} = \frac{N_e e^2 E}{m(j\omega + \nu)} = \frac{N_e e^2 E}{m(\omega^2 + \nu^2)} (\nu - j\omega). \quad (5.5)$$

Очевидно, что конвекционный ток положительных ионов будет определяться таким же выражением, только параметры  $m$ ,  $e$  и  $\nu$  будут относиться к иону. Поскольку масса иона во много раз больше массы электрона, то током ионов по сравнению с электронным током можно пренебречь.

Представим плазму как вакуум, в котором находятся только заряженные частицы. Присутствием нейтральных молекул можно пренебречь, так как даже в тропосфере, где плотность воздуха гораздо больше, показатель преломления отличается от единицы на миллионные доли. Таким образом, кроме конвекционного тока в ионосфере будет существовать также ток смещения в вакууме

$$\delta_{см} = j\omega\varepsilon_0 E, \quad (5.6)$$

и полный ток будет равен

$$\delta = \delta_{\text{см}} + \delta_{\text{эл}} = j\omega\varepsilon_0 E \left[ 1 - \frac{N_e e^2}{\varepsilon_0 m (v^2 + \omega^2)} \right] + \frac{N_e e^2 v}{m (v^2 + \omega^2)} E. \quad (5.7)$$

В формуле (5.7) разделены вещественная и мнимая части.

Известно [7, 10, 11], что в любом веществе полный ток может быть представлен суммой токов проводимости и смещения:

$$\delta = \delta_{\text{пр}} + \delta_{\text{см}} = \sigma E + j\omega\varepsilon_0 \varepsilon_r E. \quad (5.8)$$

Сравнивая выражения (5.7) и (5.8), получим выражения для проводимости и относительной диэлектрической проницаемости ионосферы:

$$\sigma = \frac{N_e e^2 v}{m (v^2 + \omega^2)}; \quad (5.9)$$

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{N_e e^2}{\varepsilon_0 m (v^2 + \omega^2)}. \quad (5.10)$$

Формулам (5.9) и (5.10) можно придать более удобный вид, если подставить численные значения входящих в них констант ( $e$ ,  $m$ ,  $\varepsilon_0$ ):

$$\sigma = 2,82 \cdot 10^{-8} \frac{N_e v}{v^2 + \omega^2}; \quad (5.11)$$

$$\varepsilon_r = 1 - 3190 \frac{N_e}{v^2 + \omega^2}. \quad (5.12)$$

Если частота  $\omega$  много больше числа соударений ( $\omega \gg v$ ), то формулы (5.11) и (5.12) могут быть упрощены:

$$\sigma = 2,82 \cdot 10^{-2} \frac{N_e v}{\omega^2}; \quad (5.13)$$

$$\varepsilon_r = 1 - 80,8 \frac{N_e}{f^2}. \quad (5.14)$$

В формулах (5.13) и (5.14) электронная концентрация выражена в электронах на кубический сантиметр, а частота — в килogerцах.

Из последних соотношений видно, что  $\varepsilon_r$  и  $\sigma$  зависят от частоты. Следовательно, ионосфера является средой диспер-

гирующей. Частота, при которой показатель преломления плазмы обращается в нуль, называется плазменной частотой или частотой Ленгмюра:

$$f_0 = \sqrt{80,8N_e} . \quad (5.15)$$

Соударения электрона с нейтральными молекулами при этом не учитываются.

Используя выражение для плазменной частоты, запишем выражение для показателя преломления плазмы в виде

$$n = \sqrt{\varepsilon_r} = \sqrt{1 - \frac{80,8N_e}{f^2}} . \quad (5.16)$$

Формула (5.16) имеет основополагающее значение при рассмотрении распространения радиоволн в ионосфере, хотя в ней не учтены соударения электрона с нейтральными молекулами. Однако, как следует из табл. 5.1, для большинства диапазонов частот выполняется условие  $\omega \gg \gamma$ , и поэтому учет столкновений вносит несущественные поправки.

Основные особенности распространения радиоволн в реальной ионосфере можно объяснить, полагая в первом приближении, что концентрация электронов в ионосфере, а следовательно, и ее плазменная частота зависят только от высоты над поверхностью Земли и не зависят от широты и долготы места.

Изменения диэлектрической проницаемости в ионосфере существенно отличаются от изменений этого параметра в тропосфере. Показатель преломления в тропосфере близок к единице и меняется с высотой незначительно. В ионосфере, как видно из выражения (5.16), при частотах радиоволны, меньших плазменной частоты ( $f < f_0$ ), относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_r$  оказывается меньше нуля, а показатель преломления — мнимой величиной:

$$n = -\sqrt{|\varepsilon_r|} \cdot j .$$

Отсюда следует, что при  $f < f_0$  электромагнитные колебания в ионосфере не распространяются и затухают при увеличении расстояния  $r$  по экспоненциальному закону. Нетрудно заметить, что выражение (5.16) совпадает с показателем преломления в волноводах без учета в нем потерь, так что плазменной частоте соответствует критическая частота в волноводе.



Очевидно, что все особенности полей в волноводах, изучаемые в курсе электродинамики, переносятся и на ионосферу. Отличие между ними состоит в том, что показатель преломления волновода характеризует его в целом, а в ионосфере он изменяется по высоте из-за изменения электронной концентрации.

### 5.3. Отражение и преломление радиоволн в ионосфере

В отличие от однородной плазмы, рассмотренной в предыдущем разделе, распределение электронной концентрации в реальной ионосфере имеет сложный характер, зависящий от высоты, времени суток и года, земных координат. Таким образом, ионосфера является неоднородной средой или, точнее, неоднородной плазмой. Анализ основных особенностей распространения радиоволн в ионосфере проводят для идеализированной модели в виде простого слоя, распределение электронной концентрации в котором приведено на рис. 5.2. В пределах полутолщины слоя  $B$  оно может быть представлено параболическим законом [3]:

$$N_e(h) = N_{em} \left[ 1 - \left( \frac{h - h_m}{B} \right)^2 \right]. \quad (5.17)$$

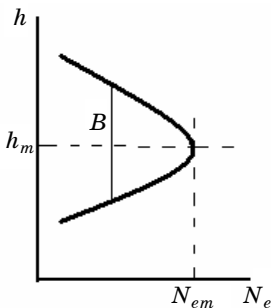


Рис. 5.2. Распределение электронной концентрации по высоте в простом слое

Как и в тропосфере, анализ распространения радиоволн в ионосфере проводится в приближении геометрической оптики. Будем пренебрегать потерями в ионосфере. Будем также считать Землю и ионосферу плоскими, делая в окончательных выводах поправки на их сферичность. Изменение электронной концентрации с высотой приводит, согласно (5.16), к изменению показателя преломления и искривлению траектории, т.е. к рефракции волны. Основные формулы, описывающие рефракцию радиоволн, ос-

таются такими же, как и в тропосфере, но зависимость  $n(h)$  выражена гораздо сильнее.

В качестве исходных соотношений будем использовать (5.16), (4.10) и (4.13), подчеркивая в них зависимость параметров ионосферы от высоты. Тогда показатель преломления на разных высотах  $h$  в простом слое будет определяться формулой

$$n(h) = \sqrt{1 - \frac{80,8N_e(h)}{f^2}}. \quad (5.18)$$

Уравнение траектории волны будет иметь вид

$$n(h) \sin \theta(h) = n_0 \sin \theta_0, \quad (5.19)$$

где  $n_0$  и  $\theta_0$  — значения показателя преломления и угла падения на нижней границе простого слоя. Можно принять, что на нижней границе  $n_0 = 1$ .

Радиус кривизны луча на разных высотах  $h$  будет

$$\rho(h) = \frac{n(h)}{-\frac{\partial n}{\partial h} \sin \theta(h)}. \quad (5.20)$$

Вычисляя производные

$$\frac{dn}{dh} = -\frac{40,4}{nf^2} \frac{dN_e}{dh} \quad \text{и} \quad \frac{dN_e}{dh} = \frac{2N_{em}}{B^2} (h_m - h)$$

и подставляя их в (5.20), окончательно для радиуса кривизны луча получим выражение

$$\rho(h) = \frac{n(h)^3 f^2 B^2}{80,8N_{em}(h_m - h) \sin \theta_0}. \quad (5.21)$$

Остановимся ниже на следующих аспектах изучения модели простого слоя:

- условие отражения вертикально направленной волны;
- условие отражения наклонно направленной волны;
- траектория радиоволн в простом слое;
- время распространения радиоволн в простом слое.

### 5.3.1. Условие отражения вертикально направленной волны

В простом слое плазменная частота (5.15) изменяется с высотой вместе с изменением электронной концентрации. Максимальное значение плазменной частоты в ионосферном слое называется его критической частотой. Очевидно, что критическую частоту слоя можно определить как плазменную частоту максимума ионизации:

$$f_{\text{кр}} = \sqrt{80,8N_{em}}. \quad (5.22)$$

Рассмотрим распространение вертикально направленной волны в простом слое в зависимости от соотношения частоты волны и критической частоты слоя. При этом возможны три случая, приведенные на рис. 5.3.

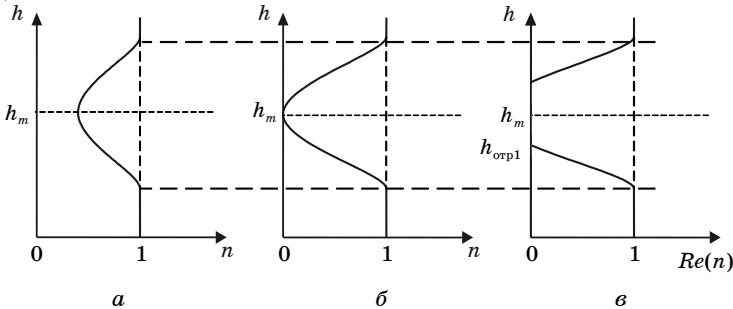


Рис. 5.3. Зависимость  $n(h)$  для вертикально направленной волны:

$a - f_1 > f_{\text{кр}}$ ;  $b - f_2 = f_{\text{кр}}$ ;  $v - f_3 < f_{\text{кр}}$

На частоте  $f_1 > f_{\text{кр}}$  (рис. 5.3, *a*) показатель преломления нигде не обращается в нуль ( $n(h) > 0$ ) и волна проходит через слой, лишь испытывая изменения скорости. На частоте  $f_2 = f_{\text{кр}}$  (рис. 5.3, *b*) показатель преломления в точке максимума электронной концентрации равен нулю ( $n(h_m) = 0$ ). При приближении к этой точке скорость движения энергии волны (групповая скорость) замедляется до нуля, распространение волны вверх прекращается и она поворачивает вниз. Будем называть этот процесс «отражением» волны, хотя, конечно, он отличается от классического отражения волны от резкой границы раздела двух сред.

На частоте  $f_3 < f_{кр}$  (рис.5.3,в) показатель преломления обращается в нуль в двух точках по высоте, и волна отражается в нижней из них. Между этими точками показатель преломления — мнимая величина. Чем ниже частота волны  $f$ , тем ниже оказывается высота первой точки отражения.

Формула (5.22) позволяет определить критические частоты реальных ионосферных слоев. Так, согласно данным табл. 5.1 критические частоты ионосферных слоев равны:

– для слоя  $D$  —  $N_{e \max} = 10^4$  эл/см<sup>3</sup>,  $f_{кр D} = \sqrt{80,8 \cdot 10^4} = 900$  кГц;

– для слоя  $E$  —  $N_{e \max} = 10^4$  эл/см<sup>3</sup>,  $f_{кр E} = 3,5$  ГГц;

– для слоя  $F_1$  —  $N_{e \max} = 10^4$  эл/см<sup>3</sup>,  $f_{кр F_1} = 5,5$  ГГц;

– для слоя  $F_2$  —  $N_{e \max} = 10^4$  эл/см<sup>3</sup>,  $f_{кр F_2} = 12$  ГГц.

### 5.3.2. Условие отражения наклонно направленной волны

Из уравнения (5.19) следует, что при продвижении волны вглубь простого слоя при  $h < h_m$  угол падения  $\theta$  увеличивается (поскольку  $n$  уменьшается), а при  $h > h_m$  — уменьшается. Об этом же свидетельствует анализ радиуса кривизны луча (см. формулу (5.20)). Из формулы (5.20) следует, что при  $h < h_m$  радиус кривизны  $\rho > 0$ , при  $h > h_m$  —  $\rho < 0$ . Таким образом, ниже  $h_m$  траектория волны обращена выпуклостью от Земли, а выше  $h_m$  — выпуклостью к Земле. Если при этом в какой-либо точке угол падения станет равным  $90^0$  ( $\sin \theta = 1$ ), то в ней произойдет поворот волны к Земле, то есть отражение волны. Очевидно, что отражение волны может произойти там, где  $\rho > 0$ , т.е. ниже максимума ионизации. Из уравнения траектории волны (5.19) следует, что условием отражения наклонного луча является выполнение равенства

$$n(h_{отр}) = \sin \theta_0. \quad (5.23)$$

Таким образом, отражение наклонного луча в ионосфере происходит на высоте, при которой показатель преломления  $n(h)$  равен синусу начального угла падения на ионосферу  $\theta_0$ .

Возведем выражение (5.23) в квадрат и, используя (5.18), придадим ему вид

$$1 - \frac{80,8N_e(h_{\text{отр}})}{f^2} = \sin^2 \theta_0 \quad \text{или} \quad \frac{80,8N_e(h_{\text{отр}})}{f^2} = \cos^2 \theta_0.$$

Величина  $\sqrt{80,8N_e(h_{\text{отр}})} = f_0(h_{\text{отр}})$  определяет частоту волны, отражающуюся на высоте  $h_{\text{отр}}$  при вертикальном падении, а  $f = f_0(h_{\text{отр}})$  — частоту волны, отражающуюся на той же высоте при наклонном падении под углом  $\theta_0$ . Опуская индекс «отр» в обозначении высоты, представим последнее соотношение в виде

$$f_0(h) = f_0(h) \sec \theta_0, \quad (5.24)$$

где  $\sec \theta_0 = 1/\cos \theta_0$ .

Это соотношение называется законом секанса и играет важную роль в теории распространения радиоволн в ионосфере. Оно связывает частоты вертикальной и наклонной волн, отражающиеся от одной и той же области ионосферы.

Поскольку при изменении угла  $\theta_0$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  функция  $\sec \theta_0$  изменяется от 1 до  $\infty$ , то согласно этому закону от ионосферы должны отражаться радиоволны сколь угодно высоких частот. В действительности максимальное значение угла  $\theta_{0m}$  ограничивается сферичностью Земли. Из простых геометрических соотношений следует, что максимальный угол падения на нижнюю границу ионосферы —  $\theta_{0m}$  — определяется соотношением

$$\sin \theta_{0m} = \frac{R_0}{R_0 + h_0}, \quad (5.25)$$

где  $R_0$  — радиус Земли;  $h_0$  — высота нижней границы ионосферного слоя.

Для  $R_0 = 6370$  км и  $h_0 = 200$  км угол  $\theta_{0m} = 72^\circ 40'$  и  $\sec \theta_{0m} \approx 4$ . Если учесть нормальную рефракцию в тропосфере и ввести эквивалентный радиус Земли, равный 8493 км, то  $\theta_{0m}$  станет равным  $75^\circ$ , а  $\sec \theta_{0m} = 3,86$ .

Если закон секанса применить к максимуму электронной концентрации, а углу  $\theta_0$  придать его максимальное значение  $\theta_{0m}$ , то формула (5.24) определит максимальную частоту, еще отражающуюся от данного слоя ионосферы. Эта частота называется максимальной частотой ионосферного слоя. Можно счи-

тать, что максимальная частота превышает критическую частоту в среднем в 4 раза. Для слоя  $F_2$  максимальные частоты, которые еще могут отражаться от ионосферы, составляют от 30 до 40 МГц.

### 5.3.3. Траектория радиоволн в простом слое

Траектория волны при отражении от ионосферы полностью определяется уравнением траектории волны (5.19). Для упрощения анализа траектории удобнее использовать соотношения (5.21) и (5.23), которые определяют точку поворота волны и радиус кривизны луча. В точке отражения наклонного луча ( $h_{\text{отр}}$ ) выполняется соотношение (5.23), и радиус кривизны в ней определяется выражением

$$\rho(h_{\text{отр}}) = \frac{f^2 B^2 (\sin \theta_0)^2}{80,8 N_{em} (h_m - h_{\text{отр}})}. \quad (5.26)$$

Рассмотрим траекторию волны в простом слое для двух случаев:

- 1) постоянный начальный угол падения  $\theta_0$  и изменяющаяся частота радиоволны  $f$ ;
  - 2) постоянная частота  $f$  и изменяющийся угол падения  $\theta_0$ .
- Траектория волн для первого случая показана на рис 5.4.

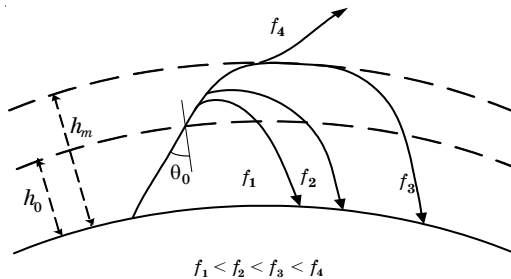


Рис. 5.4. Траектории волн в простом слое на разных частотах при постоянном угле падения  $\theta_0$

По мере увеличения частоты увеличивается высота точки отражения и радиус кривизны в ней согласно (5.26). Расстояние до падения отраженной волны на Землю (длина радиолинии) увеличивается. По мере увеличения частоты точка

отражения приближается к максимуму электронной концентрации ( $h_m$ ) и радиус кривизны, как следует из (5.26), стремится к бесконечности. Эта траектория (частота  $f_3$  на рис. 5.4) называется лучом Педерсена [3, 4]. При дальнейшем увеличении частоты волна проходит слой без отражения (частота  $f_4$  на рис. 5.4).

Рассмотрим второй случай. В частотных диапазонах, использующих отражение от ионосферы, применяются, как правило, антенны с широкой диаграммой направленности в вертикальной плоскости. В зависимости от соотношения между частотой волны и частотами ионосферного слоя ( $f_{кр}$ ,  $f_{max}$ ) возможны ситуации, представленные на рис. 5.5.

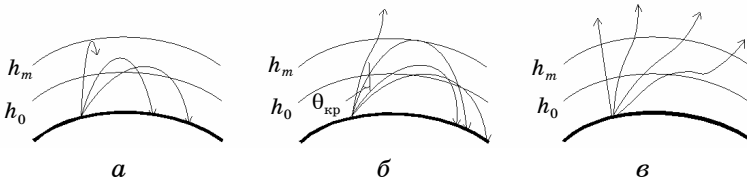


Рис. 5.5. Траектории волн в ионосфере в зависимости от угла  $\theta_0$  при: *a* —  $f \leq f_{кр}$ ; *б* —  $f_{кр} < f < f_{max}$ ; *в* —  $f > f_{max}$

При  $f \leq f_{кр}$  радиоволны отражаются при всех углах падения, в том числе отражается и вертикально вверх направленная волна (рис. 5.5, *a*). По мере увеличения угла падения высота точки отражения уменьшается, а радиус кривизны увеличивается. В реальных условиях такие траектории имеют длинные, средние волны и длинноволновая часть КВ.

В случае  $f_{кр} < f \leq f_{max}$  существует угол падения  $\theta_{кр}$ , при котором волна еще отражается от максимума ионизации (рис 5.5, *б*). Дальнейшее уменьшение угла падения приводит к тому, что радиоволна проходит через простой слой без отражения. Эту частоту выше мы определили как максимальную для угла  $\theta_{кр}$ . При этом опять может возникнуть луч Педерсена, поскольку радиус кривизны в точке отражения стремится к бесконечности. При приближении к критическому углу со стороны углов  $\theta > \theta_{кр}$  отраженный луч сначала приближается к передатчику, а вблизи критического удаляется и переходит в луч Педерсена, дальность радиолинии для которого может доходить до 7000 км. Таким образом, в этом случае вокруг антенны су-

существует область, в которую ионосферная волна не попадает, — зона молчания. Очевидно, что с увеличением частоты радиус зоны молчания ( $R_{\text{ЗМ}}$ ) увеличивается, а с увеличением электронной концентрации — уменьшается. Справедливо и обратное утверждение: для каждой длины радиолинии существует максимальная частота, еще отражающаяся от данного ионосферного слоя, которая называется максимально применимой частотой (МПЧ). Подобная ситуация характерна для коротких волн, отражающихся от слоев  $F_1$  и  $F_2$ .

При  $f > f_{\text{max}}$  условие отражения не выполняется для всех реальных углов падения ( $\theta < \theta_m$ ) и волна проходит через ионосферный слой, испытывая в нем искривление траектории, т.е. преломляется (рис. 5.5, в). Наибольшее искривление испытывают пологие лучи, вертикальный луч не искривляется. Этому соответствует зависимость радиуса кривизны от угла падения в формуле (5.21). Такие траектории характерны для диапазона УКВ. С увеличением частоты искривление траектории волны уменьшается.

### 5.3.4. Время распространения радиоволн в ионосфере

До запуска искусственных спутников Земли (ИСЗ) основным источником получения информации о строении ионосферы были данные ионосферных станций. Как отмечалось выше, ионосферные станции производят вертикальное зондирование ионосферы радиоимпульсами, частота которых меняется по линейному закону за время одного сеанса. Измеряя время прохождения сигналов от Земли до ионосферы и обратно на разных частотах, можно судить о высоте отражающего слоя и электронной концентрации в нем. Однако в ионосфере радиоимпульс распространяется не со скоростью света  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с, а с групповой  $v_{\text{гр}} = c \cdot n$ , где показатель преломления  $n$  зависит от электронной концентрации и частоты радиоволны. Время прохождения радиосигнала до точки отражения в ионосфере и обратно будет равно

$$t = 2 \frac{h_0}{c} + 2 \int_{h_0}^{h_{\text{отр}}} \frac{dh}{v_{\text{гр}}} . \quad (5.27)$$



За это время волна, идущая со скоростью света, прошла бы до высоты  $h_d$ , которая называется действующей высотой ионосферы. Поскольку ионосферные станции измеряют время прохождения сигнала, то оно может быть отражено на экране электронно-лучевой трубки в действующих высотах, связанных с истинными высотами соотношением

$$h_d = h_0 + \int_{h_0}^{h_{\text{отр}}} \frac{dh}{n(h)}. \quad (5.28)$$

Интеграл в формуле (5.28) является несобственным, поскольку  $n(h_{\text{отр}}) = 0$  и подынтегральная функция обращается в бесконечность в точке отражения. Можно доказать [1, 2], что интеграл сходится при  $h_{\text{отр}} < h_m$  и расходится при  $h_{\text{отр}} = h_m$ . Это означает, что при отражении ниже максимума ионизации действующие высоты хотя и больше реальных, но конечны. При отражении от максимума ионизации они стремятся к бесконечности. Это хорошо видно на высотно-частотных характеристиках, получаемых на ионосферных станциях (рис. 5.6).

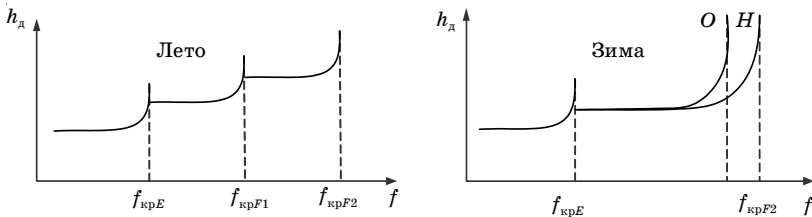


Рис. 5.6. Пример высотно-частотной характеристики ионосферы

По вертикали на них откладываются действующие высоты, а по горизонтали частота зондирования. Критическим частотам отдельных слоев соответствуют разрывы в кривых. Отражение от слоя  $D$  обычно не наблюдается из-за низкого значения его критической частоты. Отличие характеристик для лета и зимы объясняется раздвоением слоя  $F$  летом на два слоя  $F1$  и  $F2$ . Для зимних месяцев для слоя  $F2$  показано раздвоение характеристики, вызванное влиянием постоянного магнитного поля Земли на распространение радиоволн в ионосфере. Как будет показано в подразд. 5.5, волна в ионосфере в общем случае распадается на обыкновенную и необыкновенную, которые

имеют разные показатели преломления и соответственно разные критические частоты.

Для действующих высот ионосферы существуют две теоремы эквивалентности [2]. Приведем их без доказательства.

**Теорема 1.** Если равны реальные высоты отражения вертикального и наклонного лучей, то равны их действующие высоты.

Действующей высотой наклонного луча называется высота эквивалентного треугольника  $ACB$  (рис. 5.7).

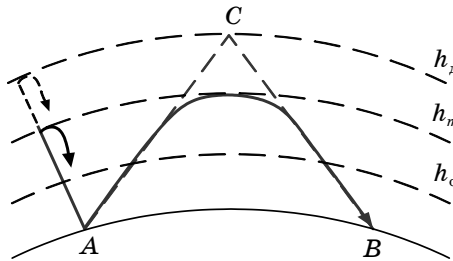


Рис. 5.7. Действующие высоты вертикального и наклонного лучей

**Теорема 2.** Реальное время распространения волны по криволинейной траектории равно времени распространения волны по эквивалентному треугольнику со скоростью света.

Использование теорем эквивалентности упрощает анализ и расчет радиолиний, проходящих через ионосферу [4].

## 5.4. Поглощение радиоволн в ионосфере

Поглощение радиоволн в ионосфере происходит из-за столкновения электронов с нейтральными молекулами. Под действием электрического поля волны электроны разгоняются и приобретают некоторую энергию, которую передают молекулам при соударениях. За счет этого увеличивается хаотическое тепловое движение молекул и повышается температура газа, составляющего ионосферу. Формально наличие потерь энергии волны в ионосфере проявляется в том, что ее проводимость отлична от нуля. Известно, что коэффициент поглощения  $\Gamma''$  в веществе выражается формулой [9–11]

$$\Gamma'' = k \sqrt{\frac{1}{2} \left( -1 + \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \Delta} \right)}, \quad (5.29)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число в свободном пространстве;  $\lambda$  — длина волны в нем;  $\operatorname{tg} \Delta = \frac{60\lambda\sigma}{\varepsilon_r}$  — тангенс угла потерь.

Выясним зависимость коэффициента поглощения от частоты. Для этого рассмотрим два случая — низких и высоких частот. На низких частотах можно считать, что  $60\lambda\sigma \gg \varepsilon_r$  и  $\operatorname{tg}\Delta \gg 1$ . Пренебрегая в формуле (5.29) единицами по сравнению с  $\operatorname{tg}\Delta$ , получим для этого случая

$$\Gamma'' \approx k \sqrt{\frac{\operatorname{tg} \Delta}{2}} = \sqrt{\frac{30\sigma}{\lambda}}. \quad (5.30)$$

Из формулы (5.11) для проводимости ионосферы следует, что на низких частотах при  $\omega \ll \nu$   $\sigma \approx 2,82 \cdot 10^{-8} \frac{N_e}{\nu}$  и не зависит от частоты. Таким образом, на низких частотах коэффициент поглощения пропорционален  $1/\sqrt{\lambda}$  или  $\sqrt{f}$ .

Аналогичные рассуждения для высоких частот, когда  $\omega \gg \nu$  и  $\operatorname{tg}\Delta \ll 1$ , приводят к выражению

$$\Gamma'' \approx \frac{\operatorname{ctg} \Delta}{2} = \frac{30\pi\sigma}{\varepsilon_r} \approx \frac{30\pi}{\varepsilon_r} \cdot 2,82 \cdot 10^{-8} \frac{\nu}{\omega^2}. \quad (5.31)$$

Таким образом, на низких частотах поглощение растет с ростом частоты как  $\sqrt{f}$ , а на высоких — падает как  $1/f^2$ . Очевидно, на промежуточных частотах существует частота с максимумом поглощения. Более строгий анализ показывает, что максимальное поглощение будет на частоте, близкой к числу соударений, т.е. при  $f \approx \nu$ .

Этому можно дать такое физическое объяснение. На низких частотах период колебаний много больше времени свободного пробега электрона между соударениями, равного  $1/\nu$ . Электрон не успевает набрать достаточно энергии между соударениями. На высоких частотах, когда период колебаний много меньше времени свободного пробега, электрон успевает несколько раз обменяться энергией с волной, прежде чем потеряет энергию при соударении.

Зависимость поглощения от частоты в ионосфере играет важную роль в объяснении особенностей распространения средних и коротких волн.

### 5.5. Влияние постоянного магнитного поля Земли на распространение радиоволн в ионосфере

Постоянное магнитное поле Земли, напряженность которого составляет  $H_0 \approx 40$  А/м, качественно и количественно меняет свойства ионосферы. Причина этого состоит в наличии в ионосфере свободных зарядов — электронов и ионов. В присутствии постоянного магнитного поля на них действует еще одна сила — сила Лоренца

$$\vec{F}_L = q[\vec{V} \cdot \vec{B}_0], \quad (5.32)$$

где  $q$  — заряд частицы;  $\vec{V}$  — ее скорость;  $\vec{B}_0 = \mu H_0$  — магнитная индукция поля Земли.

Рассмотрим физическую картину явлений, возникающих при действии постоянного магнитного поля на движущиеся заряды. Пусть вначале электромагнитная волна отсутствует. Электроны и ионы находятся в хаотическом движении. При этом на них действует сила Лоренца, изменяющая только направление скорости движущихся зарядов, но не ее величину. В результате частицы будут двигаться по окружностям вокруг вектора  $\vec{H}_0$ , радиусы которых определяются из равенства силы Лоренца и центробежной силы:

$$qV_n B_0 = \frac{mV_n^2}{R},$$

откуда

$$R = \frac{mV_n}{qB_0},$$

где  $V_n$  — составляющая скорости, перпендикулярная вектору  $\vec{H}_0$ .

Определим далее период и частоту вращения заряженной частицы вокруг вектора  $\vec{H}_0$ :

$$T = \frac{2\pi R}{V_n} = \frac{2\pi m}{qB_0}, \quad f_m = \frac{1}{T} = \frac{q\mu_0 H_0}{2\pi m}. \quad (5.33)$$

Формулы (5.33) интересны тем, что период и частота вращения заряженной частицы не зависят от величины и начального направления скорости  $\vec{V}$ . В случае параллельных векторов  $\vec{V}$  и  $\vec{H}_0$  сила Лоренца равна нулю и частица движется по прямой параллельно вектору  $\vec{H}_0$ . Частота вращения частицы вокруг магнитного поля  $f_m$  называется гиромангнитной частотой. Нетрудно убедиться, что если смотреть по направлению вектора  $\vec{H}_0$ , то электроны с зарядом  $e$  вращаются против часовой стрелки, а положительные ионы — по часовой стрелке. Для электронов  $f_m \approx 1,4$  МГц, для ионов  $f_m \approx 760$  Гц. Поскольку гиромангнитная частота ионов лежит за пределами используемых для радиосвязи частот, присутствием ионов далее будем пренебрегать.

Для определения показателя преломления и проводимости ионосферы в присутствии поля  $H_0$  воспользуемся соотношениями (5.1)–(5.8) (см. подразд. 5.2). Изменение коснется лишь определения скорости электрона.

В соотношение (5.3) добавится сила Лоренца. Для упрощения выражений не будем учитывать соударения с молекулами. Тогда уравнение движения электрона примет вид

$$-e\vec{E} - e\mu_0 [\vec{V} \cdot \vec{H}_0] = j\omega \cdot m\vec{V}. \quad (5.34)$$

Скорость  $\vec{V}$  как вектор из этого уравнения непосредственно не определяется, поскольку входит в векторное произведение. В декартовой системе координат компоненты  $V_x$ ,  $V_y$  и  $V_z$  находятся из системы трех уравнений, которая получается проектированием уравнения (5.34) на координатные оси. При этом если ось  $z$  выбрать вдоль вектора  $\vec{H}_0$ , то составляющие  $V_x$  и  $V_y$  будут зависеть и от  $E_x$ , и от  $E_y$ . Подстановка выражений для компонентов скорости в уравнение (5.8) приводит к выводу, что оно может выполняться, только если диэлектрическая проницаемость будет матрицей размером  $3 \times 3$ . Эта матрица называется тензором диэлектрической проницаемости ионосферы. Более подробный вывод выражения для тензора  $\hat{\epsilon}$  ионосферы (или плазмы) можно найти в [7, 10, 11]. Приведем без вывода его выражение [11]:

$$\hat{\varepsilon}_r = \begin{pmatrix} \varepsilon_T & -j\beta & 0 \\ j\beta & \varepsilon_T & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_L \end{pmatrix}, \quad (5.35)$$

где

$$\varepsilon_T = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2 - \omega_M^2}, \quad \beta = \frac{\omega_0^2 \omega_M}{\omega(\omega^2 - \omega_M^2)}, \quad \varepsilon_L = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}. \quad (5.36)$$

Из выражений (5.36) для компонентов тензора  $\hat{\varepsilon}_r$  видно, что влияние магнитного поля Земли на распространение радиоволн сказывается особенно сильно на частотах, близких к гиромангнитной частоте электронов, равной 1,4 МГц, хотя проявляется и на других частотах.

Известно, что среды, у которых один из параметров  $\varepsilon$ ,  $\mu$  или  $\sigma$  выражается тензором, являются анизотропными. Это означает, что их свойства зависят от направления распространения волн. Для ионосферы анизотропия выражается также в том, что вектора  $\vec{E}$  и  $\vec{D}$  не параллельны. Аналогичными свойствами обладают намагниченные ферриты и некоторые кристаллы.

Остановимся кратко на особенностях распространения радиоволн в ионосфере, связанных с присутствием магнитного поля Земли.

### 5.5.1. Эффект Фарадея

При распространении радиоволн вдоль магнитных силовых линий Земли наблюдается вращение плоскости поляризации радиоволны. Рассмотрим этот эффект подробнее. Пусть вектор  $\vec{E}$  волны в некоторой точке пространства направлен вдоль оси  $x$ . Представим его как сумму двух волн с круговой поляризацией, вращающихся в разных направлениях:

$$\vec{E} = \bar{x}_0 E_0 = \frac{E_0}{2} (\bar{x}_0 + jy_0) + \frac{E_0}{2} (\bar{x}_0 - jy_0). \quad (5.37)$$

Первое слагаемое в этом выражении представляет левополяризованную волну (вращение вектора  $\vec{E}$  происходит против часовой стрелки, если смотреть вдоль  $\vec{H}_0$ ), второе — правополяризованную. Если для каждой из этих волн определить вектор электрической индукции как

$$\vec{D} = \hat{\varepsilon}_r \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (5.38)$$

то окажется, что соотношение между векторами  $\vec{D}$  и  $\vec{E}$  для этих волн выражается не тензором, а разными числами:

$$\vec{D}_{\text{пр}} = (\varepsilon_T + \beta) \varepsilon_0 \vec{E}_{\text{пр}} \quad \text{и} \quad \vec{D}_{\text{лев}} = (\varepsilon_T - \beta) \varepsilon_0 \vec{E}_{\text{лев}}. \quad (5.39)$$

Это означает, что фазовые скорости этих волн будут различными:

$$V_{\text{ф.пр}} = \sqrt{(\varepsilon_T + \beta) \varepsilon_0 \mu_0}, \quad V_{\text{ф.лев}} = \sqrt{(\varepsilon_T - \beta) \varepsilon_0 \mu_0}.$$

Разница скоростей приводит к тому, что на некотором расстоянии  $l$  от исходной точки вектор  $\vec{E}$  повернется на угол  $\gamma$ :

$$\gamma = \left( \frac{\omega}{V_{\text{ф.лев}}} - \frac{\omega}{V_{\text{ф.пр}}} \right) \frac{l}{2}. \quad (5.40)$$

Эффект поворота плоскости поляризации волны в анизотропной среде называется эффектом Фарадея.

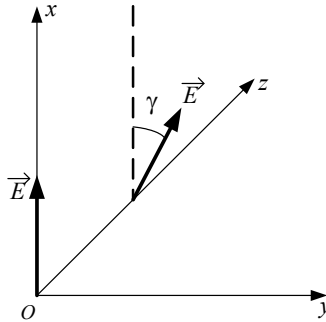


Рис. 5.8. Поворот плоскости поляризации волны при эффекте Фарадея

Для ионосферы его можно объяснить, если учесть, что электроны под действием магнитного поля Земли вращаются всегда в одном направлении и для волн с разным направлением вращения вектора  $\vec{E}$  ионосфера имеет различные свойства. Способность некоторых веществ вращать плоскость поляризации называется гиротропным эффектом, а сами вещества — гиротропными.

### 5.5.2. Обыкновенная и необыкновенная волны

Рассмотрим случай поперечного распространения волны по отношению к магнитному полю  $\vec{H}_0$ . При этом возможны два случая: а) вектор  $\vec{E}$  параллелен вектору  $\vec{H}_0$ ; б) вектор  $\vec{E}$  перпендикулярен  $\vec{H}_0$ . Определим для первого случая вектор индукции  $\vec{D}$ :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \hat{\varepsilon}_r \vec{E} = \varepsilon_0 \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_T & -j\beta & 0 \\ j\beta & \varepsilon_T & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_L \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ E_0 \end{bmatrix} = \varepsilon_0 \varepsilon_L E_0 \cdot \vec{z}_0.$$

Если подставить выражение  $\varepsilon_L$  из формулы (5.36), то видно, что соотношение между векторами  $\vec{D}$  и  $\vec{E}$  такое же, как и при отсутствии магнитного поля. Это объясняется тем, что сила Лоренца в этом случае равна нулю. Волна с таким направлением вектора  $\vec{E}$  называется обыкновенной.

Очевидно, что если вектор  $\vec{E}$  перпендикулярен  $\vec{H}_0$ , то сила Лоренца будет отлична от нуля. Приведем без вывода выражение для  $\varepsilon_r$  такой волны [3], которая называется необыкновенной:

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2 \left( 1 - \frac{\omega_M^2}{\omega^2 - \omega_M^2} \right)}. \quad (5.41)$$

Анализ выражения (5.41) показывает, что необыкновенная волна имеет особенности при распространении. В частности, при  $\omega > \omega_M$  существуют два значения частоты, при которых  $\varepsilon_r$  обращается в нуль. Кроме того, в необыкновенной волне появляется составляющая электрического поля, направленная вдоль  $\vec{H}_0$  и сдвинутая по фазе относительно поперечной составляющей. Это приводит к тому, что необыкновенная волна становится эллиптически поляризованной.

Если волна, посланная с Земли, падает на ионосферу под произвольным по отношению к  $\vec{H}_0$  углом, то она расщепляется на обыкновенную и необыкновенную, имеющие разные показатели преломления. Условия отражения (5.21) выполняются для них на разных высотах. Таким образом, каждому



входящему в ионосферу лучу соответствуют два отраженных луча, попадающие в разные точки Земли.

Поле в точке приема определяется интерференцией двух волн — обыкновенной и необыкновенной, входящих в ионосферу под разными углами. Поскольку параметры ионосферы непрерывно изменяются, то будут меняться и фазы интерферирующих волн, и, следовательно, величина результирующего поля, что приводит к эффекту замирания сигнала.

### Контрольные вопросы

1. Что из себя представляет ионосфера, что является причиной ее образования?
2. Определите собственную частоту ионизированного газа, если электронная концентрация в нем составляет  $10^4$  эл/см<sup>3</sup>.
3. Объясните, почему ионосфера является диспергирующей средой. Как это качество ионосферы сказывается на распространении радиоволн?
4. Дайте понятие критической и максимальной частоты ионосферного слоя. Укажите соотношение между ними.
5. Какие изменения в ионосферных слоях происходят в течение суток и при смене времени года?
6. Какие частоты радиоволн наиболее сильно поглощаются в ионосфере? Каков механизм этого поглощения?
7. Каким образом постоянное магнитное поле Земли влияет на распространение радиоволн в ионосфере? Почему такого влияния не обнаруживается в тропосфере?
8. В чем состоит эффект Фарадея, при каких условиях он проявляется?
9. Как по данным ионосферных станций определяются критические частоты ионосферных слоев?
10. Какие волны называются обыкновенной и необыкновенной? Поясните причину их различного распространения в ионосфере.

## 6. Диапазонные особенности распространения радиоволн

После изучения влияния Земли, тропосферы, ионосферы на распространение радиоволн рассмотрим диапазонные особенности распространения радиоволн.

### 6.1. Особенности распространения сверхдлинных и длинных волн

Радиоволны длиной от 1000 до 10000 м называют длинными (ДВ) — частота 30–300 кГц, а радиоволны длиной более 10000 м — сверхдлинными (СДВ) — частота менее 30 кГц. Благодаря большой длине волны эти волны хорошо огибают Землю. Кроме того, в этих диапазонах радиоволн для всех видов земной поверхности токи проводимости существенно преобладают над токами смещения. Благодаря этому при распространении поверхностной волны происходит лишь незначительное поглощение энергии, что обуславливает распространение СДВ и ДВ на большие расстояния (порядка 3000 км).

В ионосфере СДВ и ДВ поглощаются слабо, поскольку в ней проходит незначительная часть трассы. Известно, что чем ниже частота радиоволны, тем ниже электронная концентрация, необходимая для поворота луча к Земле. Следовательно, высота поворота радиоволн СДВ- и ДВ-диапазонов — нижняя граница ионосферы (слой *D* днем или *E* — ночью). Начиная с расстояния 300–400 км, в точке приема помимо земной волны присутствует и отражённая от ионосферы волна. Эти волны интерферируют в точке приема, но на различных расстояниях от передатчика интенсивность земной и ионосферной волн разная. До 500 км учитывают в основном земную радиоволну и расчёт напряжённости поля ведут по формуле Шулейкина — Ван-дер-Поля (см. формулу (3.12)). После 500 км земная волна слабее ионосферной. Тропосфера практически не влияет на распространение радиоволн в этих диапазонах. Можно сказать, что область пространства, где распространяются СДВ и ДВ, — сферический слой, который лежит между земной поверхностью и нижним слоем ионосферы. Высота этого слоя —

80–100 км. Условия распространения при этом такие же, как и в сферическом волноводе: есть даже критическая длина волны (~100 км).

Расчёт радиолиний на СДВ и ДВ обычно проводится по эмпирическим формулам, чаще всего по формуле Остина [1]

$$E = \frac{300\sqrt{PD}}{r} \sqrt{\frac{\theta}{\sin \theta}} e^{-0,0014 \cdot r / \lambda^{0,6}}. \quad (6.1)$$

Здесь мощность  $P$  подставляется в киловаттах; расстояние  $r$  и длина волны  $\lambda$  — в километрах; угол  $\theta$  — геоцентральный угол между точками излучения и приема:  $\theta = r/R_0$ ;  $R_0$  — радиус Земли. Действующее значение напряженности электрического поля в формуле (6.1) определяется в милливольт на метр.

Особенностью формулы Остина является необычная зависимость напряженности поля от расстояния. В противоположной точке Земли — точке антипода — формула Остина дает бесконечное значение поля, так как  $\theta = 180^\circ$ . В действительности в этой точке наблюдается некоторое увеличение поля, поскольку в нее приходят в фазе волны, обогнувшие Землю с разных направлений. Это явление получило название «эффект антипода». Реально формулой Остина пользуются на расстояниях от 2 до 18 тыс. км.

Основное преимущество линий связи на ДВ и СДВ — большая устойчивость напряженности электрического поля. Величина сигнала мало меняется в течение суток и в течение года и не подвержена случайным изменениям.

Основной недостаток — ограниченный частотный диапазон, а также необходимость использовать громоздкие антенны. Во всем частотном диапазоне СДВ и ДВ (3 кГц — 300 кГц) не разместится даже один телевизионный канал, который требует полосы 8 МГц.

На СДВ иногда наблюдается интересное явление — «свистящие атмосферерики». Оно проявляется в появлении в приемнике характерного свиста, частота которого постепенно понижается. Причиной появления «атмосфериков» являются грозовые разряды в другом полушарии Земли. Как отмечалось при изучении ионосферы, магнитное поле Земли вызывает расщепление волны на обыкновенную и необыкновенную.

Анализ показателя преломления необыкновенной волны (см. формулу (5.41)) при частотах, меньших плазменной, показывает, что он не обращается в нуль ни при какой электронной концентрации. Это означает, что такие сверхнизкие частоты могут пронизывать ионосферу, удаляться от Земли на десятки ее радиусов и возвращаться на Землю вдоль магнитных силовых линий Земли. Понижение частоты звучания «атмосферика» связано с сильной дисперсией этих частот в ионосфере. Более высокие частоты имеют большую скорость и раньше приходят в пункт приема, чем низкие. Изучение «свистящих атмосфериков» дает научную информацию о состоянии атмосферы на больших расстояниях от Земли.

Устойчивость сигнала на ДВ и СДВ объясняет их широкое применение для построения навигационных систем. Однако суточные изменения слоя  $D$  приводят к изменению высоты сферического волновода, в котором распространяются эти волны на большие расстояния. Это, в свою очередь, вызывает изменение фазовой скорости, что приводит к ошибкам в определении местоположения объекта.

Несмотря на крайнюю ограниченность частотного диапазона, длинные и сверхдлинные волны находят очень важное применение. Кроме радионавигации, они используются для обеспечения надежной радиотелефонной и телеграфной связи на дальние расстояния и радиовещания. Кроме того, они могут использоваться для связи с подводными объектами, например подводными лодками, поскольку только волны этих диапазонов (наряду с оптическими) испытывают относительно слабое поглощение в морской воде.

## 6.2. Особенности распространения средних волн

К средним волнам (СВ) относятся радиоволны длиной от 100 до 1000 м (частоты 0,3–3 МГц). Средние волны могут распространяться как земные и как ионосферные.

Напряженность электрического поля земных радиоволн СВ-диапазона для малых расстояний (до 200 км) рассчитывают по формуле Шулейкина — Ван-дер-Поля, а для больших

расстояний — по дифракционным формулам (см. подразд. 2.6). Средние волны испытывают существенное поглощение земной поверхностью и поэтому СВ-радиолинии, использующие земные радиоволны, имеют протяжённость не более 700 км. Все особенности распространения земных радиоволн при низко расположенных антеннах, рассмотренные ранее, проявляются именно в диапазоне средних волн.

Ионосферная волна способна отразиться лишь при концентрации, свойственной слою *E*. Через слой *D* (самый низкий) волна проходит и сильно в нём поглощается. Слой *D* ионосферы появляется только днём, и поэтому ночью поглощение средних волн в ионосфере значительно уменьшается.

Если пункт приема находится в зоне действия земной волны, то с наступлением темноты в эту точку начинает попадать также и ионосферная волна. Интерференция земной и ионосферной волн приводит к замираниям — случайным колебаниям поля сигнала. Для замираний еще употребляется термин «фединг». В случае когда приемная станция расположена вне области действия земных радиоволн, замирания обязаны своим происхождением интерференции ионосферных волн, претерпевших разное число отражений от ионосферы. Для борьбы с замираниями на средних волнах применяются специальные антенны, у которых максимум диаграммы направленности прижат к земной поверхности, — так называемые антифединговые антенны.

Только в диапазоне средних волн наблюдается сравнительно редкое явление — перекрестная модуляция. Оно проявляется в том, что сигнал мощной радиостанции модулирует своим полем число соударений  $\nu$  электронов с нейтральными молекулами. В результате в такт с сигналом мощной радиостанции изменяется поглощение радиоволн других станций. В этом проявляются нелинейные свойства ионосферы — поглощение зависит от напряженности поля волны мощной радиостанции. Впервые этот эффект наблюдался в 1924 году после начала работы крупной радиостанции в городе Горьком (ныне Нижнем Новгороде), которая модулировала своим сигналом передачи радиостанции в Люксембурге. Поэтому данный эффект называется также Люксембург-Горьковским эффектом.

Действенных мер борьбы с этим эффектом не существует, и на практике ограничиваются рекомендациями использовать на мощных станциях антифединговые антенны.

Средние волны используются, главным образом, в радиовещании. В заключение сформулируем кратко особенности распространения средних волн.

1. На небольших расстояниях (до 1000 км) от передатчика преобладает земная волна. Связь устойчивая и не зависит от времени суток и года. Расчет напряженности поля можно вести по формуле Шулейкина — Ван-дер-Поля (для расстояний, меньших 200 км) или по дифракционной формуле и графикам, составленным на ее основе (см. разд. 3).

2. На больших расстояниях от передатчика связь осуществляется только ионосферной волной. Поэтому днем связь практически отсутствует (из-за поглощения в слое  $D$ ), ночью диапазон «оживает». Связь относительно устойчивая, замирения вызваны приходом в точку наблюдения нескольких волн, претерпевших разное число отражений от Земли и ионосферы.

3. В промежуточной области днем прием идет на земную волну и ослабленную в слое  $D$  ионосферную. Интерференция этих небольших по интенсивности волн приводит к значительным колебаниям уровня сигнала — замирениям. Ночью ионосферная волна преобладает над земной. Связь становится более устойчивой.

4. Расчет напряженности поля ионосферных волн ведут по эмпирическим формулам или по графикам, составленным на основе экспериментальных данных [1, 4, 12].

### 6.3. Распространение коротких волн

К коротким волнам (КВ) относятся радиоволны с длиной волны от 10 до 100 м (частоты 3–30 МГц).

Слабовыраженная дифракция и сильное поглощение земных волн приводят к тому, что короткие волны как земные могут распространяться лишь на расстояния порядка десятков километров.

Основной интерес для радиосвязи представляют ионосферные волны. Короткие волны проходят слои  $D$  и  $E$ , испытывая в

них поглощение, отражение происходит от слоя  $F$ . Распространение ионосферных коротких волн имеет ряд особенностей. Рассмотрим основные из них.

1. Распространение радиоволн на большие расстояния происходит путем последовательных отражений от ионосферы и поверхности Земли. Радиоволна как бы совершает скачки с Земли к ионосфере и обратно. Длина одного скачка зависит от высоты отражающего слоя и угла падения волны на ионосферу. Максимальные скачки получаются, если излучение направлено вдоль Земли. За один такой скачок волна покрывает расстояние от 3000 км при отражении от слоя  $F_1$  до 4000 км при отражении от слоя  $F_2$ .

2. Способность коротких волн распространяться, как ионосферные, на большие расстояния объясняется их слабым затуханием в ионосфере. Как было установлено в подразд. 5.5, поглощение на высоких по сравнению с числом соударений частотах обратно пропорционально квадрату частоты. Именно этот случай характерен для коротких волн.

3. Ограниченность рабочего диапазона. В диапазоне коротких волн существуют понятия максимально применимой частоты (МПЧ) и наименьшей применимой частоты (НПЧ). Существование МПЧ объясняется с помощью закона секанса (см. формулу (5.24)). Из него следует, что для заданного расстояния, меньшего длины одного скачка, и для заданной электронной концентрации слоя существует максимальная частота, способная от него отражаться. Существование НПЧ объясняется частотной зависимостью поглощения в ионосфере. При понижении частоты поглощение быстро увеличивается, уровень сигнала в точке приема уменьшается, и при НПЧ напряженность поля принимает пороговое значение, ниже которого прием невозможен. Очевидно, что и МПЧ, и НПЧ зависят от параметров ионосферы: электронной концентрации и числа соударений. НПЧ зависит также от параметров аппаратуры: излучаемой мощности, чувствительности приемника и т.п. Для коротковолновых линий радиосвязи актуальна проблема правильного выбора оптимальной рабочей частоты для радиосвязи (ОРЧ). Поскольку концентрация электронов в слое  $F$  меняется в течение суток, то существуют так называемые дневные (длины волн 10–25 м) и ночные (35–100 м) волны.

4. Существование зоны молчания, упоминавшейся ранее в подразд. 5.3. Она представляет собой кольцевую область около передающей антенны. В зоне молчания прием радиоволн с данной аппаратурой невозможен. Внутренняя граница зоны молчания определяется напряженностью поля земной волны, достаточной для радиоприема. Очевидно, что положение этой границы зависит от мощности передатчика, чувствительности приемника, параметров антенн и т.п. Внешняя граница зоны молчания определяется из условия, что рабочая частота является МПЧ для данного расстояния.

Земные волны в зоне молчания слишком слабы из-за поглощения в Земле, а ионосферные отражаются под большими углами падения и поэтому попадают на Землю за зоной молчания. Очевидно, что в течение суток внешняя граница зоны молчания передвигается, а внутренняя неподвижна.

5. Замирания сигнала на коротких волнах в основном объясняются интерференцией нескольких волн, приходящих в точку приема (см. подразд. 6.1). Это могут быть волны, претерпевшие разное число отражений от ионосферы, либо обыкновенная и необыкновенная волны (см. подразд. 5.6), либо и то и другое. Кроме интерференционных, наблюдаются еще поляризационные замирания, связанные с поворотом плоскости поляризации при прохождении через ионосферу (эффект Фарадея).

Для борьбы с замираниями на КВ-линиях связи обычно применяют прием на несколько разнесенных в пространстве антенн. Расстояние между антеннами выбирается так, чтобы замирания сигналов слабо коррелировали между собой. На практике для этого достаточно разнести антенны на  $10\lambda$ . Выигрыш за счет разнесенного приема даже двух антенн может достигать 10 и более децибел [4].

6. Влияние ионосферных возмущений. В ионосфере кроме регулярных (суточных, сезонных) изменений часто наблюдаются возмущения, во время которых электронная концентрация слоя  $F$  значительно изменяется. В основном ионосферные возмущения вызываются потоками заряженных частиц — корпускул, испускаемых Солнцем во время солнечных вспышек. Потоки корпускул, попадая в магнитное поле Земли, двигаются вдоль магнитных силовых линий и концентрируются в приполярных областях, вызывая полярные сияния, магнитные бури



и нарушения связи на коротких волнах. Для борьбы с такими нарушениями связи приходится переходить на более низкие частоты, увеличивать мощности передатчиков или использовать линии связи, проходящие в более южных широтах.

7. Расчет коротковолновых линий связи в основном сводится к составлению графика рабочих частот (волнового расписания) и расчету напряженности поля в точке приема. График рабочих частот строится на основе зависимости МПЧ от времени суток. Для определения МПЧ существуют приближенные методы, описанные в литературе [1, 3, 4, 12]. Для построения графика рабочих частот на основе данных ионосферных станций Земли составляются официальные прогнозы максимально применимых частот [14].

Расчет напряженности поля производится по методу А.Н. Казанцева на основе графиков для затухания волн в ионосферных слоях. Подробнее с этим методом можно ознакомиться по литературе [1, 3, 4, 12].

Короткие волны применяются в основном для радиовещания. Преимущество коротковолновых линий связи — способность распространяться на большие расстояния, испытывая слабое поглощение в Земле и ионосфере.

#### **6.4. Распространение ультракоротких волн**

Радиоволны с длиной волны короче 10 м (частота свыше 30 МГц) относятся к УКВ-диапазону. Снизу по частоте УКВ-диапазон ограничен КВ-диапазоном, сверху — инфракрасными волнами. Обычно УКВ-радиолинии действуют в пределах прямой видимости, поскольку ионосфера для УКВ-диапазона прозрачна. Это является основным недостатком УКВ и в то же время их достоинством, когда нужно избавиться от взаимных помех УКВ-станций. Несомненно, ценным свойством ультракоротких волн является большой частотный диапазон, позволяющий обмениваться значительными объемами информации. Так, для метровых и дециметровых волн диапазон частот составляет около 3000 МГц. Если принять для одного ТВ-канала полосу частот 10 МГц (на практике 8 МГц), то это позволяет разместить в данных диапазонах 297 телевизионных

каналов. Для сравнения, во всем КВ-диапазоне разместятся три телевизионных канала, а на средних — ни одного.

Постоянная тенденция радиотехники — переход на все более высокие частоты — приобретает особое значение в связи с развитием спутниковой и мобильной связи, развитием сети Интернет и пр. Поэтому рассмотрим особенности распространения УКВ более подробно, чем других диапазонов.

### 6.4.1. Распространение УКВ в пределах прямой видимости

К линиям связи этого типа относятся:

- 1) телевизионное и УКВ-вещание;
- 2) радиорелейные линии связи (РРЛ) и радиолокационные станции (РЛС);
- 3) связь с искусственными спутниками Земли (ИСЗ) и другими космическими объектами;
- 4) различные виды мобильной связи.

Вопросы распространения радиоволн для этих линий связи являются во многом общими, хотя и имеют некоторые особенности. Рассмотрим их подробнее.

**Телевизионное и УКВ-вещание.** Поскольку телевизионные антенны, как правило, слабонаправленные, то отражение от Земли формирует диаграмму направленности в вертикальной плоскости. Для увеличения дальности вещания антенны передатчика и приёмника поднимают над земной поверхностью — это увеличивает расстояние прямой видимости и прижимает нижний лепесток ДН антенн к Земле.

Если поверхность Земли является достаточно гладкой, то для расчёта радиолинии применяют интерференционную формулу и, в частности, формулу Введенского. Для оценки неровности земной поверхности используется критерий Рэлея. Эти вопросы рассмотрены в разд. 2 данного пособия.

Влияние тропосферы учитывается введением эквивалентного радиуса Земли для нормальной тропосферы. Поглощением в тропосфере для метровых и дециметровых волн можно пренебречь. Распространение волн этих диапазонов в условиях города, конечно, имеет свои особенности, связанные с экранирующим действием зданий. По имеющимся в литературе

[15] данным измерение напряженности поля в Москве на уровне улиц на частоте 49,75 МГц дало дополнительное ослабление 6 дБ, а на частоте 200 МГц — 10 дБ. Внутри зданий дополнительное ослабление увеличивается по мере перехода с верхних этажей на нижние. Так, на седьмом этаже поле может составлять от 6 до 40 % от напряженности поля на крыше, а на первом от 3 до 7 %. Большой разброс этих значений объясняется интерференцией прямой волны и волн, отраженных от стен и других предметов.

**Работа РРЛ и РЛС.** Расстояние между соседними станциями РРЛ (30–50 км) и высоты антенн (до 100 м) выбираются так, чтобы антенны находились в пределах прямой видимости, а область пространства, существенная для распространения радиоволн, была свободна от местных предметов. При этом влиянием Земли можно пренебречь. Диапазон применяемых частот ограничен сверху поглощением в тропосфере (10–15 ГГц), а снизу — снижением усиления антенн и полосой частот для передачи необходимой информации (200–300 МГц). Тропосфера учитывается, как и в предыдущем случае, введением эквивалентного радиуса Земли для нормальной тропосферы. Нестационарные процессы в тропосфере являются причиной замираний на РРЛ. К таким процессам относятся:

- а) ослабление в осадках (гидрометеорах) на частотах выше 6–7 ГГц;
- б) изменение скорости убывания показателя преломления с высотой, что приводит к изменению траектории радиоволн;
- в) отражения от слоистых неоднородностей в тропосфере с последующей интерференцией с прямой волной.

В радиолокации тропосфера и ионосфера являются источником ошибок при определении координат цели радиолокационными станциями. Подробный анализ таких ошибок приведен в [16]. При углах места цели, больших  $5^\circ$ , рефракция радиоволн приводит к следующим систематическим ошибкам в определении угловых координат и дальности до цели:

$$\Delta\gamma = N \operatorname{ctg} \gamma_0; \quad \Delta r = 0,007N \operatorname{csc} \gamma_0, \quad (6.2)$$

где  $\gamma_0$  — начальный угол места в направлении на цель;  $N$  — индекс преломления тропосферы у поверхности Земли. В формулах (6.2)  $\Delta\gamma$  измеряется в микроградусах ( $1 \text{ мкрад} = 5,73 \cdot 10^{-5}$  градуса  $= 3,44 \cdot 10^{-3}$  угловых минут),  $\Delta r$  — в метрах.

Например, при  $\gamma = 10^\circ$  и  $N = 313$  (нормальная тропосфера)  $\Delta\gamma = 6,1'$  (угловых минут),  $\Delta r = 12,6$  м.

В целом, максимальные ошибки по углу места не превосходят  $1^\circ$ , а по дальности — 100 м. Флуктуации показателя преломления тропосферы приводят к случайным ошибкам в определении координат цели. Ионосфера влияет на работу РЛС, если цель находится на высотах, превышающих 100 км, причем влияние уменьшается с ростом частоты согласно формуле (5.16). Графики, приведенные в [16], показывают, что систематические ошибки по дальности, вызванные рефракцией в ионосфере на частоте 10 ГГц, не превышают 0,1 м при высоте цели 180 км, а по угловым координатам 0,1 мрад, т.е. 0,34 угловых минуты.

**Связь со спутниками и другими космическими объектами.** Очевидно, что радиосвязь с искусственным спутником Земли (ИСЗ) или другим космическим объектом, находящимся выше ионосферных слоев, возможна только в диапазоне УКВ, проникающих через ионосферу. Как правило, для этих целей используют остронаправленные антенны, и влиянием Земли можно пренебречь. Земля в этих случаях является источником тепловых шумов, которые рассматриваются далее в разд. 7. Верхние применяемые частоты ограничиваются поглощением в тропосфере, а нижние — поглощением в ионосфере, которое на этих частотах обратно пропорционально квадрату частоты (см. формулу (5.13)).

Суммарные потери в тропосфере и ионосфере минимальны в окне прозрачности от 0,1 до 6 ГГц, поглощение в котором не превышает одного децибела [13]. На практике обычно используют частоты от 1 до 10 ГГц.

Кроме поглощения, тропосфера и ионосфера создают следующие проблемы.

1. Рефракция радиоволн в тропосфере и ионосфере искривляет траекторию радиоволн. Это приводит к ошибкам в определении положения ИСЗ. Радиусы кривизны луча в тропосфере и ионосфере зависят от угла падения  $\theta$  как  $1/\sin\theta$ . Поэтому ошибка в определении угловых координат максимальна для пологих трасс и может составлять для тропосферы  $1-2^\circ$ . Рефракция в ионосфере увеличивается с уменьшением частоты и учитывается при частотах  $f < 400$  МГц. Ошибка из-за рефракции в ионосфере в определении положения ИСЗ может

достигать нескольких градусов [5]. Учет рефракции необходим в системах слежения за ИСЗ. Неправильный учет этого явления может привести к «потере» спутника станцией слежения.

2. Поворот плоскости поляризации волны при прохождении сквозь ионосферу (эффект Фарадея). Если для передачи и приема используются антенны с линейной поляризацией, то поворот плоскости поляризации волны приводит к уменьшению сигнала на выходе приемной антенны. При движении спутника угол поворота поляризации непрерывно меняется, и это приводит к замираниям сигнала. Исходя из анализа формулы (5.40), угол поворота обратно пропорционален квадрату частоты, поэтому эффект Фарадея учитывается на частотах ниже 1 ГГц.

**Различные виды мобильной связи.** Различные виды мобильной связи: сотовая, транкинговая и пейджинговая, получили в последнее время массовое распространение. Все они используют частоты от 0,8 до 4 ГГц. Особенности распространения радиоволн в городах, рассмотренные выше для телевидения, наблюдаются и в системах мобильной связи, но выражены более резко. Это вызвано двумя причинами. Во-первых, высоты телевизионных антенн, передающих и приемных, как правило, больше, чем в системах подвижной связи (СПС). Во-вторых, частоты СПС выше, чем в телевидении. Это уменьшает дифракцию волн на различных препятствиях. Кроме того, при мобильной связи движение абонента приводит к изменению уровня сигнала из-за изменения окружающей обстановки. Как и при ДТР, сигнал в точке приема испытывает случайные изменения уровня — быстрые и медленные замирания. Причиной быстрых замираний, как и при ДТР, является многолучевой характер распространения радиоволн. В точку приема приходят волны, отраженные от городских зданий, причем фазы этих волн изменяются случайным образом от 0 до 360°. Как и при ДТР, быстрые замирания подчиняются закону распределения Релея (см. приложение). Причиной медленных замираний является перемещение абонента. При этом изменяется экранирующее действие городских зданий.

Точное определение ослабления радиоволн в городских условиях не представляется возможным из-за влияния очень

многих факторов. Имеющиеся в литературе данные [15, 17–19] основаны на экспериментальных исследованиях. В настоящее время существует несколько моделей решения этих задач. Наибольшее распространение получили модели Окамуры и Хата [17–19]. Рассмотрим кратко положения модели Окамуры.

Как и при ДТР, задача определения напряженности поля в точке приема сводится к определению медианного уровня напряженности поля и оценке быстрых и медленных замираний. Из графиков, приведенных в [17, 18, 22, 23], для определения медианных значений напряженности поля можно получить следующие аппроксимирующие выражения для частот 0,9 и 4 ГГц, представляющих практический интерес:

$$\left. \begin{aligned} F_{\text{м}} &= -(20 + 0,3r + 5,7 \lg r) - 4; \text{ для } f = 0,9 \text{ ГГц;} \\ F_{\text{м}} &= -(29,4 + 0,3r + 7,6 \lg r) - 4; \text{ для } f = 4 \text{ ГГц.} \end{aligned} \right\} \quad (6.3)$$

В этих формулах расстояние  $r$  выражается в километрах,  $F_{\text{м}}$  — дополнительное ослабление по отношению к полю в свободном пространстве, выраженное в децибелах, при котором уровень поля соответствует медианному. Формулы (6.3) предполагают, что городская застройка соответствует «квазигладкой» поверхности протяженностью несколько километров со средней высотой неровностей, меньшей 20 метров. Как следует из упомянутых графиков и формул (6.3), дополнительное ослабление, вызванное рассеянием и поглощением радиоволн городскими зданиями, увеличивается с увеличением расстояния и частоты радиоволн. Формулы (6.3) получены для высоты антенны базовой станции (БС) 200 метров и высоты антенны абонентской станции (АС) 3 метра.

Экспериментально установлено, что влияние высоты БС в основном зависит от расстояния до точки приема и практически не зависит от частоты в диапазоне 200–2000 МГц. При этом на небольших расстояниях мощность принимаемого сигнала изменяется пропорционально квадрату высоты антенны, а при больших — пропорционально коэффициенту  $F_{\text{А1}}$ :

$$\left. \begin{aligned} F_{\text{А1}} &= 20 \log \frac{H}{200} && \text{при } r < 10 \text{ км;} \\ F_{\text{А1}} &= 30 \log \frac{H}{200} && \text{при } r > 10 \text{ км,} \end{aligned} \right\} \quad (6.4)$$

где  $H$  — высота антенны БС;  $F_{A1}$  — фактор, учитывающий высоту антенны БС в децибелах. Более точно величину  $F_{A1}$  можно определить по графикам в [17–19]. При дальности, превышающей расстояние прямой видимости, расчет напряженности поля ведется по дифракционным формулам. При  $H = 50$  м это расстояние составляет примерно 25 км, при  $H = 200$  м оно составляет 50 км.

Исследования влияния высоты антенны АС показали, что оно не зависит от длины трассы, поскольку антенна располагается ниже уровня застройки, принятой в модели «квазигладкой» поверхности города. Фактор, учитывающий высоту антенны АС, может быть представлен в виде

$$\left. \begin{aligned} F_{A2} &= 10 \log \frac{h}{3} && \text{при } h < 3 \text{ м;} \\ F_{A2} &= 20 \log \frac{h}{3} && \text{при } h > 3 \text{ м и } f = 400 \text{ МГц;} \\ F_{A2} &= 30 \log \frac{h}{3} && \text{при } 8h > 3 \text{ м и } f = 2000 \text{ МГц.} \end{aligned} \right\} (6.5)$$

Таким образом, медианный уровень сигнала в точке приема определяется множителем ослабления:

$$L_{\text{МЕД}} = L_{\text{СВ}} + F_{\text{М}} + F_{A1} + F_{A2}, \quad (6.6)$$

где  $L_{\text{СВ}}$  — ослабление в свободном пространстве.

Учет влияния замираний на качество и надежность мобильной радиосвязи во многих случаях не играет такой важной роли, как в РРЛ, использующих ДТР. При необходимости для оценки влияния быстрых замираний можно использовать формулу (8) приложения.

Медленные замирания при мобильной связи наблюдаются при движении АС и отражают медианный уровень сигнала в разных точках трассы. В табл. 6.1 приведены значения дисперсии медленных замираний ( $\sigma^2$  в децибелах) по данным Окамуры. По этим значениям с помощью формулы (11) приложения можно оценить влияние медленных замираний на качество связи.

Модель Окамуры предусматривает также учет характера местности, если она не относится к квазигладкой. К квазигладким относятся: а) пригород и открытая местность; б) трасса

с наклоном; в) трасса, включающая участки земли и моря; г) холмистая местность. Так, на частоте 1 ГГц при связи в условиях пригорода медианный уровень сигнала увеличивается на 10, а на открытой местности на 30 децибел относительно рассчитанного по формуле (6.6).

Таблица 6.1

Величина дисперсии при медленных замираниях  
(в децибелах)

Частота	$f = 0,5$ ГГц	$f = 1$ ГГц	$f = 2$ ГГц	$f = 11$ ГГц
Город	6	6,5	7,3	8
Пригород	7,5	8,9	9	10

Подробное изложение модели Окамуры и других моделей выходит за рамки данного пособия. Интересующимся этим вопросом можно рекомендовать [17–19], а также монографию [15], содержащую теоретические и экспериментальные исследования распространения УКВ в условиях города.

### 6.4.2. Распространение УКВ за горизонт

Распространение УКВ за линию горизонта, иначе называемое дальним распространением УКВ, всегда представляло особый интерес для радиосвязи из-за большой информационной емкости диапазона и возможности применения остронаправленных антенн. Особый интерес эти случаи представляли до запуска первых ИСЗ. Не останавливаясь подробно на этих случаях, перечислим их с краткой характеристикой.

1. Дальнее распространение УКВ за счет рассеяния на неоднородностях тропосферы (ДТР). Поскольку такие линии связи находят практическое применение, они подробно рассмотрены в подразд. 4.3 и 4.4.

2. Дальнее распространение УКВ при сверхрефракции в тропосфере.

Как отмечалось в п. 4.2.4, при определенных погодных условиях в тропосфере образуется область, в которой индекс преломления убывает с высотой быстрее чем на 157 единиц на километр. При этом радиус кривизны луча в тропосфере становится меньше радиуса Земли и луч, посланный горизонтально,



возвращается на Землю. После отражения от Земли распространение волны продолжается как бы в тропосферном волноводе на расстояния в несколько тысяч километров. В тропосферном волноводе могут распространяться волны дециметрового и сантиметрового диапазонов. Поскольку возникновение условий для появления тропосферных волноводов трудно предсказуемо, то практического использования тропосферные волноводы не получили. Более того, их появление является причиной взаимных помех радиолокационных и других УКВ-станций.

3. Дальнее распространение УКВ за счет рассеяния на неоднородностях ионосферы. Неоднородности показателя преломления ионосферы вызваны неоднородностями электронной концентрации, всегда существующими в ионосфере. Дифференцирование выражения (5.16) для показателя преломления плазмы приводит к выражению

$$\Delta n = -\frac{80,8 \Delta N_e}{2n(f)^2}, \quad (6.7)$$

из которого следует, что для организации такой связи пригодны низкие частоты УКВ-диапазона (30–60 МГц). Основное рассеяние происходит в нижних слоях ионосферы на высотах 70–90 км, поэтому дальность действия таких линий связи составляет от 1000 до 2300 км. Полоса частот одного канала составляет несколько килогерц. Как и при ДТР, полоса частот ограничена многолучевым характером распространения. Из-за значительных потерь при распространении такая связь требует больших мощностей передатчиков (десятки киловатт) и антенн с КНД 20–30 дБ. Поле в точке приема подвержено замираниям, как и при ДТР. Достоинством такой связи является ее надежность, что особенно важно для приполярных областей, где ионосферные возмущения приводят к нарушениям связи на КВ.

4. Дальнее распространение УКВ за счет отражения от слоя  $F_2$  и спорадического слоя  $E_s$ . В годы высокой солнечной активности электронная концентрация слоя  $F_2$  достигает значений, при которых от него возможно отражение метровых волн, падающих наклонно на ионосферу. Зона молчания при этом составляет 2000 км. Максимальная дальность — порядка 4000 км. Кроме регулярных ионосферных слоев ( $D$ ,  $E$ ,  $F$ ) в ионо-

сфере возможно появление спорадического (случайного) слоя  $E_s$  с электронной концентрацией, близкой к концентрации слоя  $F_2$ . Поскольку этот слой возникает на высоте слоя  $E$ , то дальность связи при отражении от него составляет от 1000 до 2500 км. Отражение от слоев  $F_2$  и  $E_s$  является причиной нерегулярного дальнего приема телевизионных сигналов.

5. Дальнее распространение УКВ за счет отражения от метеорных следов. Метеоры, постоянно вторгающиеся в атмосферу Земли, сгорая на высоте порядка 100 км, оставляют за собой ионизированный след, существующий несколько секунд. Отражение от него можно использовать для организации дальней связи на УКВ. Такая линия связи работает в ждущем режиме: передатчик на несущей частоте работает непрерывно, а передача информации начинается при появлении метеорного следа и заканчивается с его рассасыванием. Для таких линий связи используются частоты 40–80 МГц, длина трассы 1600–1800 км, КНД антенн 10–30 дБ [2], мощность передатчиков — единицы киловатт, полоса частот — единицы килогерц. Достоинством таких линий связи является их надежность и скрытность, поскольку определить участок небосвода, куда будут направлены антенны, практически невозможно.

6. Дальнее распространение УКВ за счет «усиления препятствием». Схема распространения радиоволн в этом случае изображена на рис. 6.1.

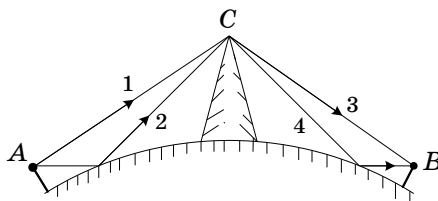


Рис.6.1. Схема распространения радиоволн при усилении препятствием

Расстояние между точками  $A$  и  $B$  составляет сотни километров и при отсутствии препятствия в точке  $C$  определяется дифракцией около сферической поверхности Земли. В диапазоне УКВ это поле является достаточно слабым. Дополнительное ослабление создается при этом поглощением Земли. При наличии препятствия в точке  $C$  в виде горного хребта между

точками *A* и *C* существуют две волны: прямая (1) и отраженная от Земли (2). На вершине препятствия они испытывают дифракцию, которую с некоторым приближением можно рассматривать как дифракцию на краю экрана (см. подразд. 1.3). От вершины до точки приема также можно выделить прямую (3) волну и отраженную (4) волну. Таким образом, можно говорить о четырех волнах между точками передачи *A* и приема *B*: 1–3, 1–4, 2–3 и 2–4. Поскольку они распространяются в свободном пространстве и испытывают ослабление только при отражении от Земли и дифракции в точке *C*, то при благоприятных фазовых соотношениях между ними поле в точке приема может значительно превышать поле при отсутствии препятствия. Так, на трассе 240 км, на частоте 100 МГц и высоте препятствия 1000 м расчетное значение увеличения напряженности поля составляет 80 дБ. В некоторых случаях для увеличения напряженности поля на вершинах устанавливаются специальные пассивные ретрансляторы в виде металлических сетчатых зеркал различной формы [4, 5].

### Контрольные вопросы

1. Каков механизм распространения длинных и сверхдлинных волн на расстояния до 3–4 тыс. км и свыше этого расстояния?
2. Какие преимущества и недостатки радиосвязи на ДВ и СДВ?
3. Укажите и объясните особенности связи на средних волнах в течение суток.
4. Что такое зона молчания в диапазоне коротких волн? Чем определяются ближняя и дальняя границы зоны? Почему зона молчания существует только на КВ?
5. Чем объясняется способность коротких волн распространяться на большие расстояния и даже огибать земной шар?
6. Какие нерегулярные процессы происходят в ионосфере и как они влияют на распространение коротких волн?
7. Какое влияние оказывают Земля, тропосфера и ионосфера на распространение УКВ?
8. Какие частоты выбираются для связи с космическими объектами? Объясните причины этого выбора.

9. Какие особенности распространения радиоволн в условиях города имеют место при телевизионном вещании и мобильной связи? Назовите и охарактеризуйте возможные случаи распространения УКВ за горизонт без использования искусственных спутников Земли. Чем объясняется интерес к таким случаям?

## 7. Помехи радиоприему

Величина сигнала в точке приема еще не определяет качество приема. Очевидно, оно зависит от отношения мощности сигнала к мощности помех на входе приемного устройства. Поэтому умение оценивать уровень помех не менее важно, чем определение уровня самого сигнала.

Помехами или шумами называют посторонние сигналы, поступающие на вход радиоприемного устройства одновременно с полезным сигналом и имеющие частоту, попадающую в полосу пропускания приемника [2]. Термин «шум» обычно применяют к помехам, имеющим непрерывный частотный спектр. Например, тепловой шум, вызванный хаотическим движением электронов в проводниках антенны или фидера, различные шумы полупроводниковых и электронных приборов. В некоторых случаях шум не является помехой. Например, в радиоастрономии прием излучения космических объектов, имеющих характер шума, используется для изучения Вселенной. К собственно помехам относят посторонние сигналы, имеющие дискретный частотный спектр. Например, помехи от соседних станций, промышленные помехи и др. В литературе по распространению радиоволн термины «шум» и «помеха» часто не имеют четкого разделения.

Известно [7, 20], что любой резистор  $R$  является источником теплового шума, который на согласованной с ним нагрузке выделяет мощность

$$P_{\text{ш}} = k\Delta f T_0, \quad (7.1)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град — постоянная Больцмана;  $\Delta f$  — полоса пропускания приемника;  $T_0$  — абсолютная температура резистора в градусах Кельвина.

Мощность шума реального источника на согласованной с ним по сопротивлению нагрузке может быть также представлена в виде формулы (7.1), но через некоторую эквивалентную температуру, которую называют шумовой температурой ( $T_{\text{ш}}$ ) данного источника:

$$P_{\text{ш}} = k\Delta f T_{\text{ш}}. \quad (7.2)$$

С формальной точки зрения  $T_{\text{ш}}$  — это коэффициент пропорциональности в формуле (7.2) между  $P_{\text{ш}}$  и величиной  $k\Delta f$ .

Шумовую температуру можно также трактовать как температуру, до которой нужно нагреть активное сопротивление, равное входному сопротивлению приемника, при которой оно создает в нем такую же мощность шума, как и реальный источник [4].

Каждый приемник имеет и собственные шумы, которые определяются в основном входными цепями и пересчитываются к его входу. Мощность этих шумов может быть также выражена через шумовую температуру приемника  $T_{ш.пр} = T_0(F-1)$  аналогично формуле (7.2), где  $T_0$  — реальная температура приемника в градусах Кельвина (обычно принимается равной 290 K);  $F$  — коэффициент шума приемника.

График зависимости шумовой температуры приемника  $T_{ш.пр}$  от частоты для приемников с различными входными цепями приведен на рис 7.1 [4].

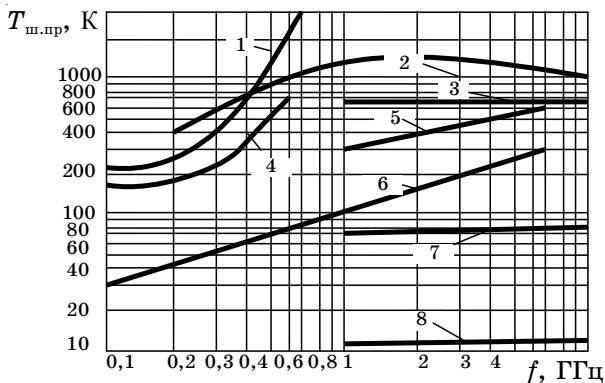


Рис. 7.1. Зависимости шумовой температуры приемников

с различными входными цепями от частоты:

- 1 — транзисторы; 2 — диодные смесители;
- 3 — туннельные диоды; 4 — электронные лампы;
- 5 — лампы бегущей волны; 6 — параметрические усилители; 7 — мазеры, охлаждаемые азотом; 8 — мазеры, охлаждаемые гелием

Представление шумов приемника и внешних шумов, поступающих с антенны, через один параметр — шумовую температуру — позволяет проводить их сравнение и определять полную

мощность шумов на его входе. Перечислим типы внешних шумов с обозначением их шумовой температуры:

1) атмосферные помехи, вызванные разрядами молний, —  $T_{\text{атм}}$ ;

2) промышленные помехи, созданные излучением промышленных и бытовых электрических установок, —  $T_{\text{пром}}$ ;

3) космические помехи, вызванные излучением космических объектов: галактик, звезд, планет, Солнца, Луны и т.п., —  $T_{\text{косм}}$ ;

4) шумы, вызванные радиоизлучением нагретой поверхности Земли и газов атмосферы, —  $T_{\text{тепл}}$ .

Кроме того, антенна и фидер, обладая собственным активным сопротивлением, являются источником тепловых шумов, шумовая температура которых определяется по формуле

$$T_{\text{ш.соб}} = T_0 \left[ (1 - \eta_{\text{ф}}) + \eta_{\text{ф}}(1 - \eta_{\text{а}}) \right], \quad (7.3)$$

где первое слагаемое определяет собственные шумы фидера; второе — собственные шумы антенны;  $\eta_{\text{ф}}$  и  $\eta_{\text{а}}$  — коэффициенты полезного действия фидера и антенны.

Таким образом, полная шумовая температура на входе приемника равна

$$T_{\text{ш}} = T_{\text{ш.пр}} + T_{\text{ш.соб}} + \eta_{\text{ф}} T_{\text{ш.вн}}, \quad (7.4)$$

где

$$T_{\text{ш.вн}} = T_{\text{ш.атм}} + T_{\text{ш.косм}} + T_{\text{ш.пром}} + T_{\text{ш.тепл}}. \quad (7.5)$$

Уровень внешних помех, а следовательно, и их шумовая температура зависят от параметров приемной антенны и от направления ее диаграммы направленности. Объективной характеристикой источников внешних помех является их яркостная температура  $T_{\text{я}}$ . Яркостной температурой источника помехи (шума) называется температура абсолютно черного тела, создающего такую же спектральную плотность излучения (плотность потока мощности в полосе 1 Гц), как и реальный источник [2]. Шумовая температура определяется через яркостную температуру и параметры антенны соотношением [20]

$$T_{\text{ш.вн}} = \frac{G}{4\pi} \int_{4\pi} T_{\text{я}}(\Omega) F^2(\Omega) d\Omega, \quad (7.6)$$

где  $\Omega$  — телесный (объемный) угол в пространстве в направлении на точку наблюдения, измеряемый в стерадианах;  $G$  —

коэффициент усиления антенны;  $F(\Omega)$  — диаграмма направленности антенны;  $T_{\text{я}}(\Omega)$  — распределение яркостной температуры источников шума в пространстве;  $4\pi$  — область интегрирования, охватывающая всю сферу вокруг антенны.

Для остронаправленных антенн интеграл в (7.6) можно приближенно оценить, если считать яркостную температуру источников шума постоянной в пределах главного ( $T_{\text{я.гл}}$ ) и боковых лепестков ДН. В этом случае формула (7.6) может быть преобразована к виду

$$T_{\text{ш.вн}} \approx \frac{G}{4\pi} \left( T_{\text{я.гл}} \Omega_{\text{гл}} + \sum_i T_{\text{я}i} \Omega_i \cdot F_i^2 \right), \quad (7.7)$$

где  $i$  — номер бокового лепестка ДН;  $\Omega_{\text{гл}}$  и  $\Omega_i$  — телесные углы главного и  $i$ -го бокового лепестка;  $F_i$  — уровень  $i$ -го бокового лепестка ДН, уровень главного лепестка ДН принят равным единице.

Во многих других случаях помеха приходит на антенну практически постоянной со всех направлений и  $T_{\text{я}}(\Omega)$  является величиной, не зависящей от направления  $\Omega$ . Можно показать [20], что в этих случаях

$$T_{\text{ш.вн}} = \eta_{\text{а}} T_{\text{я}}. \quad (7.8)$$

На частотах ниже 100 МГц уровень ненаправленных помех обычно оценивается не шумовой температурой, а напряженностью поля помех  $E_n$  в полосе частот 1 кГц. При известной действующей длине антенны ( $l_{\text{д}}$ ) напряжение помехи на входе согласованного приемника определяется выражением [4]

$$U_n = 0,5 E_n l_{\text{д}} \sqrt{f}, \quad (7.9)$$

а шумовая температура внешних шумов определяется выражением

$$T_{\text{вн}} = \frac{E_n^2 \lambda^2 \eta_{\text{а}} \eta_{\text{ф}}}{960 \pi^2 k}, \quad (7.10)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана.

Рассмотрим подробнее методы расчета уровня перечисленных помех и шумов. В большинстве своем они используют результаты экспериментальных исследований и представлены в виде графиков. Поскольку помехи являются случайными сигналами и описываются статистическими методами, то на



графиках приводятся значения, соответствующие медианным уровням напряженности поля помехи. Напомним, что медианный уровень превосходится сигналом в течение 50 % времени наблюдения. В отдельные моменты времени реальные значения уровня помех могут значительно отличаться от медианного значения.

## 7.1. Атмосферные помехи

Как уже отмечалось, атмосферные помехи создаются при грозовых разрядах молний. Основной уровень таких помех приходится на звуковые частоты 300–10000 Гц и убывает с ростом частоты как  $1/f$ . Эти помехи, постоянно возникающие в тропических районах Земли, отражаясь от ионосферы, проникают в средние широты и создают постоянный уровень атмосферных помех, который может быть определен по графику рис. 7.2 [4].

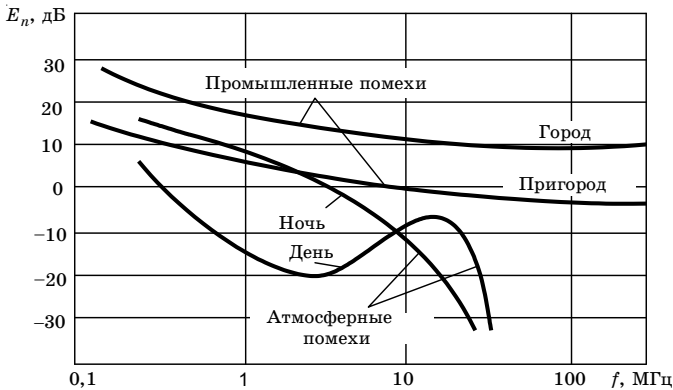


Рис. 7.2. Зависимости от частоты напряженности поля атмосферных и промышленных помех в полосе частот 1 кГц в децибелах относительно уровня 1 мкВ/м

## 7.2. Промышленные помехи

Уровень промышленных помех особенно велик в крупных промышленных центрах. Напряженность электрического поля помехи может быть определена по графикам на рис. 7.2. Про-

мышленные помехи имеют, как правило, вертикальную поляризацию.

К промышленным помехам можно условно отнести и сигналы от других радиостанций, работающих в данном частотном диапазоне. Уровень этих помех определяется конкретной обстановкой и может быть определен так же, как и уровень полезного сигнала. Исключение составляют короткие волны, которые могут распространяться на большие расстояния с малым ослаблением. Поэтому в точку приема приходят сигналы от многих станций земного шара. Их уровень на коротких волнах во многих случаях даже превосходит уровень атмосферных помех [4].

### 7.3. Космические помехи

Космические помехи создаются в основном радиоизлучением Галактики. Она создает шум с непрерывным частотным спектром. Яркостную температуру космического шума можно определить по графику рис. 7.3 [4], на котором приведены максимальные и минимальные значения уровня космических шумов.

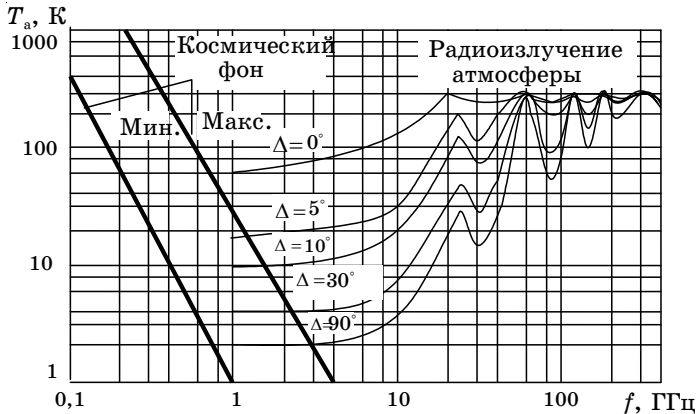


Рис.7.3. Зависимость яркостной температуры космических шумов и шумов атмосферы от частоты

Отдельные космические объекты также являются источником помех. Основным из них является Солнце, яркостная температура которого приведена на рис 7.4 [4]. Телесный угол для Солнца составляет 0,03 ст.

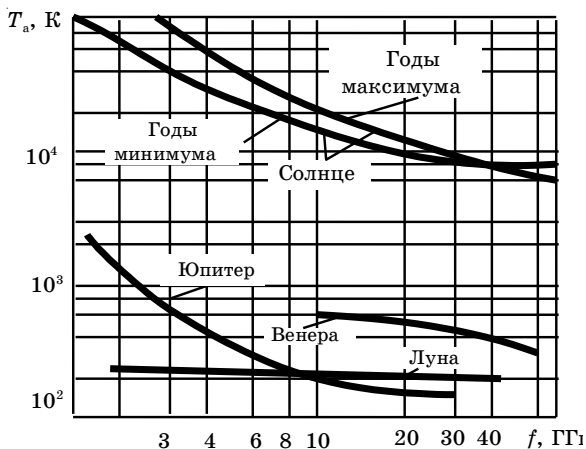


Рис. 7.4. Яркостная температура Солнца, Луны и планет

## 7.4. Шумы, созданные тепловым излучением Земли и атмосферы

Шумы, созданные тепловым излучением Земли, зависят от температуры ее поверхности и от того, какая часть диаграммы направленности антенны обращена в сторону Земли. Поэтому для уменьшения этих помех у остронаправленных антенн стараются уменьшить уровень боковых и заднего лепестков диаграммы направленности. Расчет шумовой температуры для этого случая ведут по формуле (7.7). Нагретые газы атмосферы (в основном тропосферы), яркостная температура которых определяется по графику на рис. 7.3, также создают шум. Уровень этих шумов зависит от наклона главного лепестка антенны к горизонту (угла места  $D$ ), поскольку при уменьшении этого угла увеличивается путь радиоволны в атмосфере.

В качестве примера рассмотрим вычисление шумовой температуры телевизионной антенны.

**Пример.** Определить мощность шумов на входе телевизионного приемника, если частота 100 МГц, полоса частот 6 МГц (примерно третий телевизионный канал), приемная антенна — симметричный полуволновый вибратор. Принять  $\eta_a = 1$ ;  $\eta_\phi = 0,9$ .

*Решение*

1. Собственные шумы приемника для частоты 100 МГц определяются по графику рис. 7.1 (транзисторная входная цепь) и составляют  $T_{ш.пр} = 250 \text{ К}$ .

2. Атмосферными помехами на этой частоте можно пренебречь (рис. 7.2).

3. Промышленные помехи определяются по графику рис. 7.2. Напряженность поля помех  $E_n$  равна 10 дБ по отношению к 1 мкВ/м, т.е.  $E_n = 3,1 \cdot 10^{-6} \text{ В/м}$ . Однако, как указывалось выше, эти данные характеризуют в основном вертикальный компонент электрического поля. Поскольку выделить горизонтальную составляющую помехи не представляется возможным, в дальнейшем ее учитывать не будем.

4. Космические шумы характеризуются яркостной температурой  $T_я = 700 \text{ К}$  (см. рис. 7.3, средний уровень). Поскольку космические шумы приходят практически со всех направлений, то согласно формуле (7.8)  $T_{ш.косм} = \eta_a T_я = 700 \text{ К}$ .

Шумовую температуру Солнца можно было бы определить по формуле (7.7), ограничиваясь интегрированием по телесному углу для Солнца. Это бы дало значение

$$T_{ш.С} = \frac{1,64}{4\pi} T_{я.С} \Omega_C,$$

где 1,64 — КНД полуволнового вибратора (без учета влияния Земли). Однако данных по яркостной температуре Солнца на таких частотах в литературе нет. Поэтому шум Солнца в данном примере учитывать не будем.

5. Шумы, созданные тепловым излучением Земли и нагретой атмосферы, определим по формуле (7.7), распространив ее на телесный угол, равный  $2\pi$ , под которым видна Земля из точки расположения антенны. Яркостная температура Земли зависит от угла падения волны и определяется по формуле [4]

$$T_a = T_0 (1 - |R|^2),$$

где  $R$  — коэффициент отражения от поверхности Земли, зависящий от угла падения, поляризации волны и свойств почвы.

Оценим приближенно интеграл в (7.6) по теореме о среднем значении. Для среднего угла падения, равного  $45^\circ$ , получим

$$T_{\text{ш.з}} = \frac{GT_0}{4\pi} \int_{2\pi} (1 - |R|^2) F^2(\Omega) d\Omega \approx \frac{1,64 \cdot 300}{4\pi} \cdot 0,5 \cdot 0,7 \cdot 2\pi \approx 86 \text{ К.}$$

Здесь  $|R| = 0,7$  (горизонтальная поляризация, сухая почва, угол падения  $45^\circ$ );  $F(45^\circ) = 0,7$  в плоскости вектора (проходящей через ось вибратора);  $F(45^\circ) = 1$  в плоскости  $H$  (перпендикулярной оси вибратора); телесный угол для полусферы составляет  $2\pi$ .

6. Собственные шумы антенны и фидера определяются по формуле (7.3):

$$T_{\text{ш.соб}} = T_0 [(1 - \eta_{\text{ф}}) + \eta_{\text{ф}}(1 - \eta_{\text{а}})] = 300(1 - 0,9) = 30 \text{ К.}$$

Таким образом, шумовая температура внешних шумов определяется в основном космическими шумами ( $T_{\text{ш.косм}} = 700 \text{ К}$ ) и тепловыми шумами Земли ( $T_{\text{ш.з}} = 86 \text{ К}$ ). Согласно формуле (7.4) полная шумовая температура шумов на входе приемника равна

$$T_{\text{ш}} = T_{\text{ш.пр}} + T_{\text{ш.соб}} + \eta_{\text{ф}} T_{\text{ш.вн}} = 250 + 30 + 786 \cdot 0,9 \approx 987 \text{ К.}$$

Для сравнения приведем данные по шумовой температуре приемных телевизионных антенн [21]: 1-й канал — 15000 К; 2-й, 3-й каналы — 3000 К; 4-й канал — 300 К.

Расхождение в определении шумовой температуры проведенных расчетов и литературных данных объясняется тем, что в расчете не учитывались промышленные помехи, которые могут быть сравнимы с уровнем остальных помех.

В заключение оценим действующее значение напряжения шумов  $U_{\text{ш}}$  на входе приемника через мощность шумов  $P_{\text{ш}}$  и входное сопротивление приемника  $R_{\text{пр}}$ :

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ш}}}{R_{\text{пр}}}} = \sqrt{\frac{k\Delta f T_{\text{ш}}}{R_{\text{пр}}}} = \sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 8 \cdot 10^6 \cdot 987}{75}} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ В.}$$

Таким образом, рассчитанное напряжение шумов на входе приемника гораздо меньше чувствительности типичного телевизионного приемника, составляющей 50–200 мкВ.

## Контрольные вопросы

1. Назовите основные виды помех и причины их возникновения.
2. Какой смысл имеет термин «шумовая температура» антенны?
3. Какие виды помех являются преобладающими в различных частотных диапазонах?
4. Что является источником атмосферных помех? Укажите частотный спектр атмосферных помех.
5. Объясните понятие «яркостная температура» источника помехи. Чему она равна для Земли, Солнца, космического пространства?
6. Опишите определение шумовой температуры антенны по известным яркостным температурам источников помех.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. -М.:Связь,1972.–336 с.
2. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. -М.:Выш.шк,1975.–280 с.
3. Черный Ф. Б. Распространение радиоволн. -М.: Советское радио,1972.– 458 с.
4. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев Распространение радиоволн: учебник 2-е изд. - М.: ЛЕНАНД, 2012. - 496 с.
- 5.Неганов В.А., Осипов О.В., Раевский С.Б., Яровой Г.П. Электродинамика и распространение радиоволн. Учебник / под ред. В.А. Неганова и Б. Раевского. Изд. 4-е, доп. и перераб. - М.: Радиотехника, 2009. - 744 с.
- 6.Морозов А. В., Нырцов А. Н., Шмаков Н. П. Электродинамика и распространение радиоволн. - М.: Радиотехника, 2007. – 408с.
7. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн.–М.: Горячая линия-Телеком, 2007.–558 с.
8. Нефедов Е.И. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства : Учеб. пособие.- М.: Академия, 2010.- 320 с.
9. Янке Е., Эмдэ Ф., Леш Ф. Специальные функции.–М.: Наука. 1977. – 215 с.
10. Боков Л.А. Электромагнитные поля и волны: Учеб. Пособие.– Томск. ТУСУР, 2003.– 214 с.
- 11.Никольский В. В., Никольская Т. И. Электродинамика и распространение радиоволн. Учебное пособие. Изд. 4-е. - М.: Книжный дом «Либроком», 2010. - 544 с.
- 12.Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности.–М.:Изд. Дом «Наука».–546 с.
- 13.Сомов А.М., Старостин В. В. Распространение радиоволн: учеб. пособие для студентов, обучающихся по специальностям в об. информ. безопасности / М.: Гелиос АРВ, 2010. - 264 с.
14. Долуханов М.П. Дальнее распространение ультракоротких волн. –М. Связьиздат,1962.–172 с.
15. Пономарев Г.А., Куликов А.Н., Тельпуховский Е.Д. Распространение УКВ в городе.– Томск.:МП РАСКО 1991.-223с.
16. Бартон Д., Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям.–М.: Сов. Радио.1976.–392 с.
17. Связь с подвижными объектами в диапазоне СВЧ/ Под ред. У.К.Джейкса: Пер. с англ./ Под ред. М.С.Ярлыкова, М.В. Чернякова.–М.:Связь, 1979.– 520 с.
- 18.Маковеева М.М., Шинаков Ю.С. Системы связи с подвижными объектами. Учебное пособие для вузов.– М.: Радио и связь, 2002.–440 с.

- 19.Ефанов В.И.,Тихомиров А.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем: Учеб. пособие.–Томск: ТУСУР,2004.–298 с.
- 20.Ерохин. Г. А., Чернышев О. В., Козырев Н. Д., Кочержевский В.Г. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн: учебник для вузов / Под ред. Г. А. Ерохина. - 2-е изд. - М.: Горячая линия- Телеком, 2004. – 491с.
- 21.Кабельное телевидение./ Редактор В.Б. Витиевский.–М.: Радио и связь.- 1994–192 с.
22. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM/ М.: Эко-Трендз.-2005.- 296 с.
23. Милютин Е.Р. Василенко Г. О., Сиверс М. А., Волков А. Н., Певцов Н.В. Методы расчета поля в системах связи дециметрового диапазона / СПб.: Триада, 2003.- 159 с.



# Приложение

## Краткие сведения из теории случайных процессов

Напряженность поля в точке приема при наличии замираний является случайной функцией времени. Как указывалось в подразд. 4.3, быстрые замирания подчиняются закону распределения Релея. Рассмотрим кратко статистические характеристики поля в точке приема.

Основной характеристикой случайного процесса  $x(t)$  является его плотность вероятности. Для закона Релея она описывается функцией [12]

$$w(x) = \frac{x}{(x^2)_{\text{cp}}} \exp\left(-\frac{x^2}{2(x^2)_{\text{cp}}}\right), \quad (1)$$

где  $x$  — значение случайной величины;  $(x^2)_{\text{cp}}$  — среднее по времени значение  $x^2$ ;  $x$  может принимать значения от нуля до бесконечности.

График  $w(x)$  представлен на рис. 1.

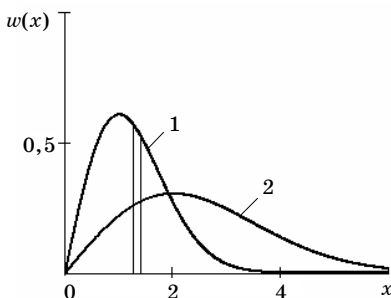


Рис. 1. График плотности вероятности закона распределения Релея: 1 —  $(x^2)_{\text{cp}} = 1$ ; 2 —  $(x^2)_{\text{cp}} = 2$

Вероятность появления случайной величины в интервале от  $x$  до  $x + dx$  равна площади, ограниченной кривой 1 и вертикальными линиями.

Функцией распределения случайной величины называют интеграл [12]

$$W(x_1) = \int_0^{x_1} w(x) dx . \quad (2)$$

Функция распределения определяет вероятность того, что величина  $x$  принимает значения от 0 до  $x_1$ . В распространении радиоволн представляет интерес вероятность того, что величина  $x$  не опустится ниже значения  $x_1$ . Обозначим эту вероятность  $P(x_1)$ . Поскольку  $\int_0^{\infty} w(x) dx = 1$ , то

$$P(x_1) = 1 - W(x_1) = \int_{x_1}^{\infty} w(x) dx . \quad (3)$$

В литературе по распространению радиоволн [1,2] функцию  $P(x)$  также называют функцией распределения. Мы будем придерживаться этого определения, т.е. считать  $P(x)$  функцией распределения.

Для закона Релея вычисление интеграла в (3) дает

$$P(x_1) = \exp \left[ -\frac{x_1^2}{(x^2)_{\text{cp}}} \right] . \quad (4)$$

Если в последней формуле положить  $P(x_1) = 0,5$ , то это будет соответствовать значению  $x_{\text{мед}}$ , которое превосходит в течение 50 % времени наблюдения, т.е. медианному уровню сигнала. Из (4) легко получить, что  $x_{\text{мед}}^2 = (x^2)_{\text{cp}} \ln 2$ . Тогда

$$P(x_1) = \exp \left( -\frac{x_1^2}{x_{\text{мед}}^2} \ln 2 \right) . \quad (5)$$

Использование медианного уровня вместо среднеквадратического более удобно, так как средний уровень поля экспериментально определяют в медианных значениях. Уровень сигнала по отношению к медианному обычно выражают в децибелах. Обозначим

$$X_1 = 20 \lg \frac{x_1}{x_{\text{мед}}} . \quad (6)$$

Тогда из (5) следует

$$X_1 = 10 \lg \left( -\frac{\lg P}{\lg 2} \right), \quad (7)$$

где  $X_1$  — уровень случайной величины  $x$ , выраженной в децибелах, относительно медианного значения  $x_{\text{мед}}$ .

Применительно к быстрым замираниям  $X_1$  имеет смысл такой величины поля  $E_{\text{min}}$ , выраженной в децибелах, по отношению к медианному уровню, которая превосходит в течение  $P$  % времени наблюдения. Другими словами,  $P(E_{\text{min}})$  определяет надежность связи при наличии быстрых замираний, если  $E_{\text{min}}$  равно пороговой чувствительности приемного устройства  $E_{\text{пор}}$ :

$$E_{\text{min}} = 10 \lg \left( -\frac{\lg P}{\lg 2} \right). \quad (7a)$$

Формула (7a) позволяет определять необходимое увеличение мощности передатчика, чтобы скомпенсировать быстрые замирания и обеспечить заданную надежность связи  $P$ .

Если для повышения надежности связи используется прием на несколько ( $n$ ) антенн или прием-передача на нескольких ( $n$ ) частотах, то формула (7a) преобразуется к виду [12]

$$E_{\text{min}} = 10 \lg \left[ -\frac{\lg \left( 1 - \sqrt[n]{1 - P} \right)}{\lg 2} \right]. \quad (8)$$

Рассмотрим еще один закон распределения вероятностей случайных величин — нормальный закон. Плотность вероятности нормального закона представляется в виде

$$w(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(x - x_0)^2}{\sigma^2} \right], \quad (9)$$

где  $x$  — случайная величина;  $x_0$  — ее медианное значение;  $\sigma$  — стандартное отклонение;  $\sigma^2$  — дисперсия.

Дисперсия определяет величину разброса случайной величины  $x$  относительно ее среднего значения  $x_0$ . Для нормального закона распределения среднее значение совпадает с медианным. Диапазон изменения  $x$  при нормальном законе от  $-\infty$  до  $+\infty$ . График распределения плотности вероятности при нормальном законе приведен на рис. 2.

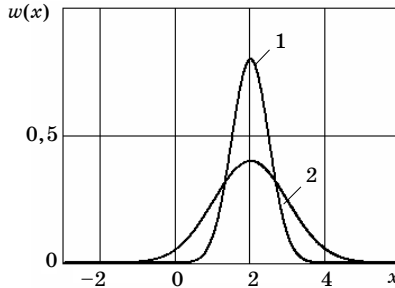


Рис. 2. Плотность вероятности при нормальном законе:  
1 —  $\sigma = 0,5$ ; 2 —  $\sigma = 1$ ,  $x_0 = 2$

Исследованиями установлено, что медленные замирания подчиняются логарифмически нормальному закону, при котором нормальному закону подчиняется логарифм напряженности поля. Таким образом, если в формуле (9) под  $x$  и  $\sigma$  понимать логарифмы этих величин и перейти к децибелам, то распределение плотности вероятности при логарифмически нормальном законе будет иметь вид

$$w(X) = \frac{20}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{X^2}{\sigma^2}\right), \quad (10)$$

где  $X$  и  $\sigma$  выражаются в децибелах, причем  $X = 20 \lg(x/x_0)$ .

Применительно к медленным замираниям обозначения в (10) имеют следующий смысл:  $x$  соответствует значению  $E$ ;  $x_0$  —  $E_{\text{мед}}$ ;  $\sigma$  — стандартному отклонению для случайной функции  $\lg E$ , выраженному в децибелах;  $X$  — значению  $E$ , выраженному в децибелах, по отношению к  $E_{\text{мед}}$ .

Функция распределения  $P(E_{\text{мин}})$  определяется, как и выше, по формуле (3):

$$P(E_{\text{мин}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{E_{\text{мин}}}^{\infty} \exp\left(-\frac{E^2}{2\sigma^2}\right) dE. \quad (11)$$

В этой формуле все величины ( $E_{\text{мин}}$  и  $\sigma$ ) выражаются в децибелах. Интеграл в (11), в отличие от распределения Релея, не выражается через известные функции, однако его вычисление не представляет трудности с помощью пакетов Matchad, Matlab и др.

**А.Е. Мандель, В.А. Замотринский,**

# **Распространение радиоволн**

Учебное пособие

по дисциплинам «Электродинамика и распространение радиоволн» и  
«Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн» для  
направлений подготовки Радиотехника – 210300, Телекоммуникации –  
210400

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л..

Тираж            экз.        Заказ

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники.

634050, Томск, пр. Ленина, 40.

Тел. (3822) 533018.