



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

**ФГОБУ ВПО
«ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ»**

В.П. КУБАНОВ

**ВЛИЯНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

Рекомендовано
методическим советом ФГОБУ ВПО
«Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики»
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по специальности
«Информационная безопасность
телекоммуникационных систем»
и по направлению
«Инфокоммуникационные технологии
и системы связи»

Самара 2015

УДК .621.371

Рецензент:

доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Электродинамики и антенн» ФГОБУ ВПО ПГУТИ **О.В. Осипов.**

Учебное пособие

Кубанов В.П.

Влияние окружающей среды на распространение радиоволн. — Самара: ПГУТИ, 2013. — 92 с., ил.

Кратко излагается процесс распространения радиоволн в идеализированной среде — свободном пространстве. Рассматриваются вопросы влияния естественных сред: области воздух — Земля, тропосферы, ионосферы, а также специфической среды — города на распространение радиоволн. Приводятся общие сведения о замираниях радиосигналов в процессе их распространения.

Формулируются условия ряда задач для практикума и самостоятельного решения. Для всех задач даны ответы. В качестве примера приводится подробное решение нескольких типовых задач.

Даются вопросы для самоконтроля качества усвоения материала.

Учебное пособие адресовано студентам, обучающимся по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», а также по направлению 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (бакалавриат — профиль подготовки «Сети и системы радиосвязи»).

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОВОЛНАХ, ОБЛАСТЯХ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ И РЕАЛЬНЫХ СРЕДАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ.....	6
1.1. Диапазоны радиоволн — классификация, области применения.....	6
1.2. Естественные среды распространения радиоволн	9
1.3. Основные типы радиоволн.....	10
2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ	15
2.1. Энергетические соотношения при распространении радиоволн в свободном пространстве	15
2.2. Понятие о потерях при передаче электромагнитной энергии по радиолинии	19
2.2.1. Потери при передаче в условиях свободного пространства.....	19
2.2.2. Дополнительные потери при передаче и множитель ослабления в условиях реальной среды.....	20
2.3. Область пространства, существенная для распространения радиоволн в свободном пространстве.....	21
3. ВЛИЯНИЕ ЗЕМЛИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН	29
3.1. Особенности процесса распространения радиоволн над Землей.....	29
3.2. Влияние Земли при высоко поднятых антеннах	32
3.2.1. Приближение плоской земной поверхности.....	32
3.2.2. Расчет коэффициента отражения радиоволн на границе раздела двух изотропных сред	36
3.2.3. Учет сферичности поверхности Земли.....	39
3.3. Влияния Земли при низко расположенных антеннах.....	40
3.3.1. Приближение плоской земной поверхности.....	40
3.3.2. Структура поля вблизи плоской однородной земной поверхности.....	42
3.3.3. Учет сферичности поверхности Земли при низко расположенных антеннах.....	43
4. ВЛИЯНИЕ ТРОПОСФЕРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН.....	44
4.1. Рефракция радиоволн.....	44
4.2. Ослабление радиоволн в осадках и газах.....	48
4.2.1. Ослабление в осадках.....	48
4.2.2. Ослабление в газах	52
4.3. Рассеяние радиоволн	55
5. ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН.....	58
5.1. Строение ионосферы.....	58
5.2. Диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость ионосферы	60

5.3. Основные свойства ионосферы.....	61
5.4. Формирование траектории радиоволн в ионосфере.....	63
6. ВЛИЯНИЕ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН.....	68
6.1. Город – специфическая среда распространения радиоволн.....	68
6.2. Общие сведения о моделях распространения радиоволн в городе.....	69
6.3. Модель Окумура-Хата	70
7. ЗАМИРАНИЯ СИГНАЛОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН.....	72
7.1. Общие сведения о причинах замираний.....	72
7.2. Характеристики замираний.....	73
8. ЗАДАЧИ	78
8.1. Задачи для самостоятельного решения.....	78
8.2. Примеры решения задач.....	83
9. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	88
ЛИТЕРАТУРА	89

ПРЕДИСЛОВИЕ

Ученое пособие условно можно разделить на три части. В первой части (раздел 1 и раздел 2) приводятся общие сведения о радиоволнах, областях их применения. Здесь же излагаются основы распространения радиоволн в идеализированной среде – свободном пространстве.

Во второй части (раздел 3 – раздел 7) рассматривается распространение радиоволн с учетом влияния существенных факторов естественных сред: наличие границы раздела воздух – земная поверхность, особенности структур тропосферы и ионосферы, городская застройка. Приводятся общие сведения о быстрых и медленных замираниях радиосигналов в процессе их распространения.

В третьей части (раздел 8 и раздел 9) сформулированы условия ряда задач для использования на практических занятиях и самостоятельного решения. Условия всех задачи снабжены ответами. Несколько типовых задач полностью решены, что во многом облегчит самостоятельную работу по решению задач раздела. Здесь же даются вопросы для самоконтроля качества усвоения материала. Самостоятельное формулирование ответов на вопросы поможет подготовиться к промежуточной аттестации (зачеты, экзамены), проводимой как в традиционной форме, так и форме тестирования.

Учебное пособие адресовано студентам, осваивающим основные профессиональные образовательные программы по специальности «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» (в учебном плане есть дисциплина «Антенны и распространение радиоволн») и по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (в учебном плане подготовки бакалавров по профилю «Сети и системы радиосвязи» есть дисциплина «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства»).

В учебных планах образовательных программ других направлений и специальностей, прежде всего радиотехнической ориентации, есть дисциплины, связанные с изучением электромагнитных полей, распространения радиоволн, антенно-фидерных устройств, радиосистем передачи. Обучающимся по таким программам также будет полезно познакомиться с содержанием предлагаемого учебного пособия.

В целом содержание пособия направлено на формирование необходимых профессиональных компетенций в сферах деятельности: сервисно-эксплуатационной, расчетно-проектной и экспериментально-исследовательской.

Автор приносит глубокую благодарность доктору технических наук профессору Сподобаеву Ю.М., внимательно прочитавшему рукопись и сделавшему ряд важных замечаний.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОВОЛНАХ, ОБЛАСТЯХ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ И РЕАЛЬНЫХ СРЕДАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

1.1. Диапазоны радиоволн — классификация, области применения

Общая шкала электромагнитных волн начинается от нескольких герц и простирается до 10^{22} Гц, что соответствует длинам волн от тысяч километров до 10^{-14} м. Электромагнитные волны общей шкалы с частотами до $3 \cdot 10^{12}$ Гц (до трех терагерц), распространяющиеся в среде без искусственных направляющих линий, принято называть радиоволнами [1]. В технологиях телекоммуникаций применение нашли радиоволны с частотами от $3 \cdot 10^3$ Гц до $3 \cdot 10^{12}$ Гц, что соответствует длинам волн от 100 км до 0,1 мм.

В виду огромного различия значений радиочастот (длин радиоволн) принято выделять их определенные непрерывные полосы. Эти полосы называются диапазонами и имеют условные наименования. По регламенту Международного союза электросвязи (МСЭ) радиоволны разделены на частотные диапазоны от $0,3 \cdot 10^N$ Гц до $3 \cdot 10^N$ Гц, где $N = (4 - 12)$ — номер диапазона. Российский ГОСТ 24375-80 [1] повторяет эту классификацию (табл. 1.1).

В практике эксплуатации технических радиосредств телекоммуникаций, в отечественной учебной и научной литературе сложилась несколько иная классификация диапазонов, согласно которой мириаметровые волны называют сверхдлинными волнами (СДВ), километровые — длинными волнами (ДВ), гектометровые — средними волнами (СВ), декаметровые — короткими (КВ), а все радиоволны с длинами волн короче 10 м относят к ультракоротким волнам (УКВ).

В табл. 1.1 помимо наименований диапазонов, значений частот и длин волн в справочном порядке указаны области их применения.

Вообще говоря, могут существовать радиоволны на частотах более низких, чем те, которые указаны в табл. 1.1 ($f < 3 \cdot 10^3$ Гц), однако технических приложений, в частности, в области телекоммуникаций, они пока не получили. Используемые в современной радиоэлектронике более высокие частоты ($f > 3 \cdot 10^{12}$ Гц) соответствуют волнам оптического диапазона (инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое излучение). Свободное распространение волн этого диапазона в рамках настоящего учебного пособия не рассматривается.

Табл. 1.1

$N = 4$		
Вид радиочастот	Очень низкие частоты (ОНЧ)	Диапазон 3 — 30 кГц
Вид радиоволн	Мириаметровые волны	Диапазон 100 — 10 км
Применение		
1. Радионавигация. 2. Связь с подводными лодками. 3. Геофизические исследования.		
$N = 5$		
Вид радиочастот	Низкие частоты (НЧ)	Диапазон 30 — 300 кГц
Вид радиоволн	Километровые волны	Диапазон 10 — 1 км
Применение		
1. Звуковое вещание (радиовещание). 2. Радиосвязь.		
$N = 6$		
Вид радиочастот	Средние частоты (СЧ)	Диапазон 300 — 3000 кГц
Вид радиоволн	Гектометровые волны	Диапазон 1000 — 100 м
Применение		
1. Звуковое вещание (радиовещание). 2. Радиосвязь. 3. Радионавигация.		
$N = 7$		
Вид радиочастот	Высокие частоты (ВЧ)	Диапазон 3 — 30 МГц
Вид радиоволн	Декаметровые волны	Диапазон 100 — 10 м
Применение		
1. Звуковое вещание (радиовещание). 2. Радиосвязь.		
$N = 8$		
Вид радиочастот	Очень высокие частоты (ОВЧ)	Диапазон 30 — 300 МГц
Вид радиоволн	Метровые волны	Диапазон 10 м — 1 м
Применение		
1. Телевизионное вещание. 2. Звуковое вещание (радиовещание). 3. Радиосвязь.		

Табл. 1.1 (продолжение)

$N = 9$		
Вид радиочастот	Ультравысокие частоты (УВЧ)	Диапазон 300 — 3000 МГц
Вид радиоволн	Дециметровые волны	Диапазон 1000 — 100 мм
Применение		
1. Телевизионное вещание. 2. Радиосвязь. 3. Мобильная радиосвязь.		
$N = 10$		
Вид радиочастот	Сверхвысокие частоты (СВЧ)	Диапазон 3 — 30 ГГц
Вид радиоволн	Сантиметровые волны	Диапазон 100 — 10 мм
Применение		
1. Спутниковое телевизионное вещание. 2. Радиосвязь (спутниковая и наземная). 3. Радиолокация. 4. Спутниковая радионавигация. 5. Беспроводные компьютерные сети.		
$N = 11$		
Вид радиочастот	Крайне высокие частоты (КВЧ)	Диапазон 30 — 300 ГГц
Вид радиоволн	Миллиметровые волны	Диапазон 10 мм — 1 мм
Применение		
1. Радиосвязь. 2. Радиолокация. 3. Радиоастрономия. 4. Медицина.		
$N = 12$		
Вид радиочастот	Гипервысокие частоты (ГВЧ)	Диапазон 300 — 3000 ГГц
Вид радиоволн	Децимиллиметровые волны	Диапазон 1 — 0,1 мм
Применение		
1. Научные исследования.		

1.2. Естественные среды распространения радиоволн

Радиосвязь – это электросвязь, осуществляемая посредством радиоволн [1]. Введем некоторые определения, следуя [3]. Радиоканал — совокупность технических средств и среды распространения радиоволн, делающих возможным процесс радиосвязи. Радиолиния — радиоканал, обеспечивающий радиосвязь в одном направлении. Радиосеть — совокупность радиолиний, работающих на одной, общей для всех абонентов, группе частот.

Радиоволны возбуждаются передающими антеннами и распространяются в той или иной естественной среде, поэтому среда распространения является неотъемлемой частью любой радиолинии или любой радиосети. Исторически так сложилось, что для большей части технических приложений радиоволн естественной средой распространения является атмосфера Земли.

Научные исследования и практика показали, что на распространение радиоволн влияет в основном часть атмосферы, простирающаяся до 1000 км. До некоторой степени условно в атмосфере можно выделить три области: тропосферу, стратосферу и ионосферу (рис. 1.1).

Тропосфера, самая нижняя область атмосферы, простирающаяся до высот 10...15 км. Стратосфера располагается над тропосферой до высот 50...80 км. Над стратосферой находится ионосфера. Она занимает область околоземного пространства от высоты 80 км до высоты 1000 км.

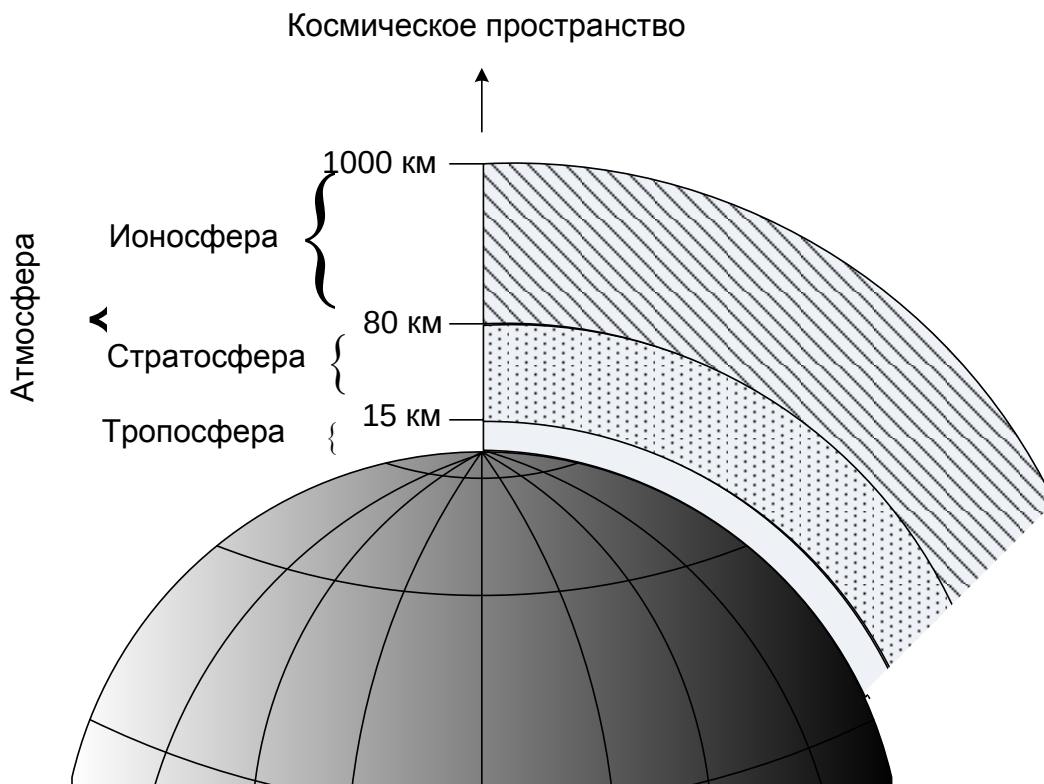


Рис. 1.1

Если радиоволны используются для связи с космическими аппаратами, то естественной средой их распространения будет не только атмосфера, но и космическое пространство. В технической литературе можно встретить разные определения термина «космическое пространство». Не вдаваясь в тонкости, будем считать космическим пространство за пределами атмосферы.

По аналогии можно говорить о естественной среде распространения радиоволн в виде толщи Земли, включая воду рек, озер, морей и океанов. Вопросы, связанные с распространением радиоволн в толще Земли, в настоящем учебном пособии не рассматриваются. Однако это не означает, что Земля вообще не влияет на процесс распространения радиоволн. Установленный факт — граница раздела между земной поверхностью и воздухом во многих случаях играет очень важную роль в распространении радиоволн (см. раздел 3). Полупроводящие свойства земной поверхности приводят к утечке энергии радиоволн в Землю. Из-за сферичности Земли возникает дифракция, то есть рассеяние волны за счет выпуклости земного шара. Различного рода неровности земной поверхности рассеивают и отражают радиоволны, изменяют их поляризацию, создают затенение пункта радиоприема. Более того, участки земной поверхности, находящиеся в непосредственной близости от антенн, могут существенно влиять на их параметры.

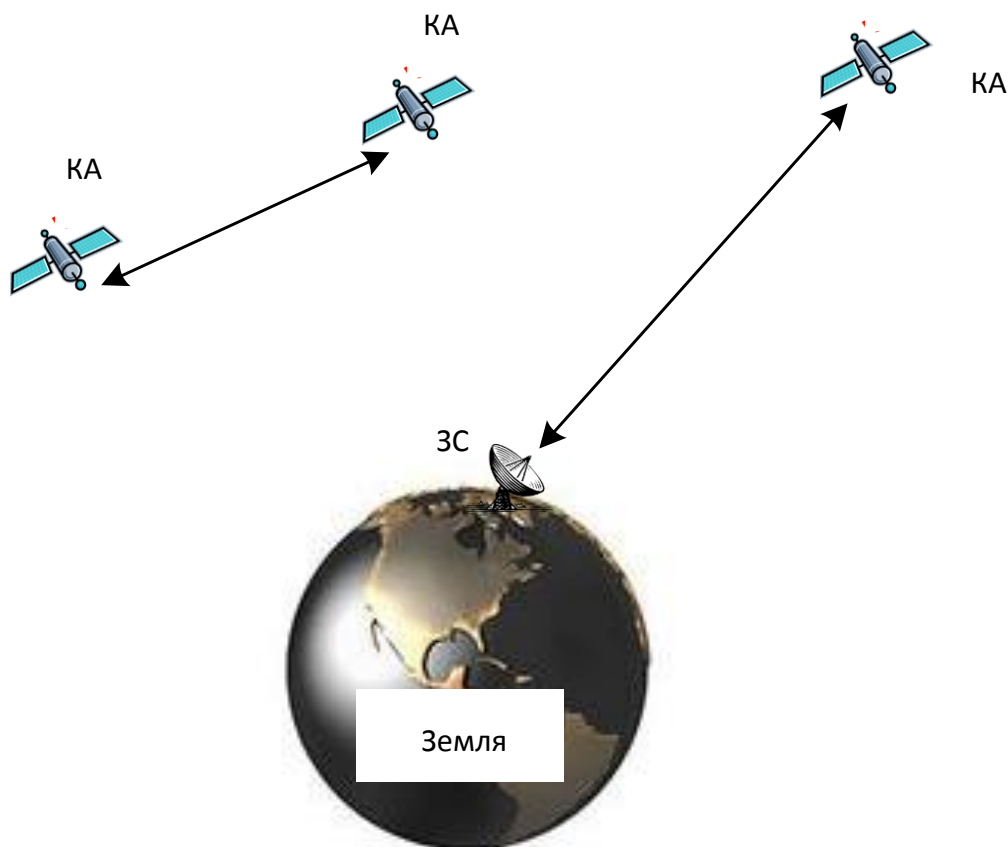
Тропосфера и ионосфера, являясь средой распространения радиоволн, характеризуются материальными параметрами: диэлектрической проницаемостью, магнитной проницаемостью и удельной проводимостью. В общем случае значения этих параметров являются функциями координат, времени и частоты распространяющейся волны. Перечисленные выше параметры в значительной степени определяют специфику (иначе — механизм) распространения радиоволн.

1.3. Основные типы радиоволн

В разделе 1.1 была приведена классификация радиоволн по диапазонам частот и диапазонам длин волн. Радиоволны принято также классифицировать по механизму их распространения. Данная классификация обусловлена некоторыми специфическими свойствами естественных сред распространения радиоволн. Эти вопросы будут подробнее рассмотрены ниже (см. раздел 3 — раздел 6). В настоящее время принято выделять четыре регулярных способа распространения радиоволн, которые, в свою очередь, определяют четыре типа радиоволн: прямые, земные, тропосферные и ионосферные. Самая общая информация об этих типах радиоволн приведена в табл. 1.2 — табл. 1.4.

Прямая радиоволна (допускается иной термин — прямая волна)

Определение: радиоволна, распространяющаяся непосредственно от источника к месту приема.

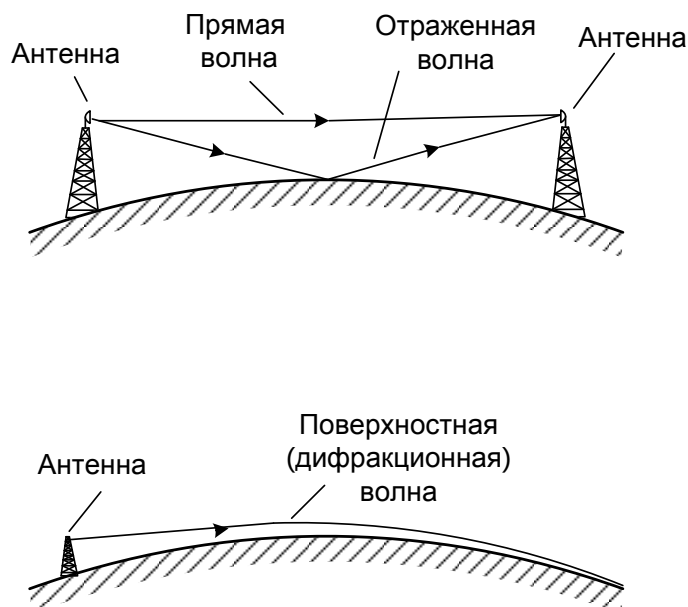
**Примеры применения:**

- ✓ радиосвязь в свободном пространстве (космосе) между космическими аппаратами (КА);
- ✓ радиосвязь между земной станцией (ЗС) и космическим аппаратом в тех случаях, когда влиянием относительно тонкого слоя атмосферы можно пренебречь.

Земная радиоволна (допускается иной термин — земная волна)

Определение: радиоволна, распространяющаяся вблизи земной поверхности и включающая прямую волну, волну, отраженную от земли, и поверхностную волну.

Примечание: в определении стандартизованного термина «земная радиоволна» поверхностную волну следует понимать как волну, частично огибающую выпуклость земного шара вследствие явления дифракции. Поскольку земная радиоволна по определению распространяется в непосредственной близости от поверхности Земли, то её часто называют поверхностной. Однако ГОСТ [1] применение такого термина - синонима считает недопустимым.



Примеры применения:

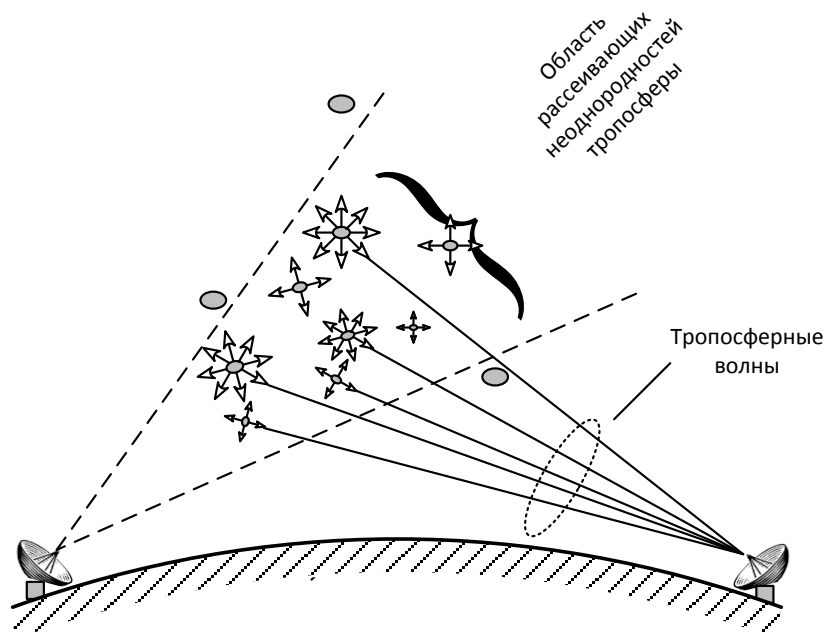
- ✓ линии наземной радиосвязи;
- ✓ сети звукового вещания (радиовещания);
- ✓ сети телевизионного вещания.

Примечание: земные радиоволны используются в тех случаях, когда радиопередающие и радиоприемные устройства расположены на (или вблизи) поверхности Земли.

Тропосферная радиоволна (допускается иной термин — тропосферная волна)

Определение: радиоволна, распространяющаяся между точками на (или) вблизи земной поверхности по траекториям, лежащим целиком в тропосфере.

Примечание: характер траекторий определяется неоднородностью тропосферы. Кроме общей плавно меняющейся неоднородности в атмосфере всегда присутствуют локальные неоднородности, которые рассеивают энергию радиоволны. Такое рассеяние, с одной стороны, ослабляет поле распространяющейся волны в прямом направлении, а с другой — способствует распространению рассеянной энергии далеко за линию горизонта, что используется в некоторых технологиях телекоммуникаций.



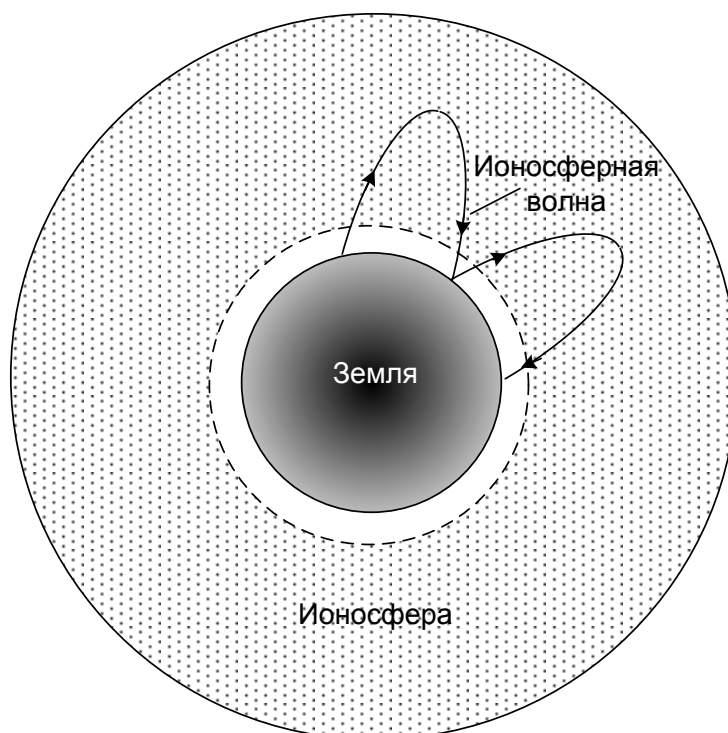
Применение: линии наземной радиосвязи в труднодоступных регионах.

Ионосферная радиоволна
(допускается иной термин — ионосферная волна)

Определение: радиоволна, распространяющаяся в результате отражения от ионосферы или рассеяния в ней.

Примечание: верхние слои атмосферы (ионосфера) содержат газ в ионизированном состоянии. Волны с частотами ниже 30 МГц испытывают сильное преломление в ионосфере. Траектории распространения этих волн искривляются настолько, что они (волны) возвращаются на Землю.

В атмосфере всегда присутствуют локальные неоднородности ионизации, которые также рассеивают энергию радиоволны.



Примеры применения:

- ✓ линии дальней радиосвязи;
- ✓ сети звукового вещания (радиовещания) для труднодоступных районов.

2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

2.1. Энергетические соотношения при распространении радиоволн в свободном пространстве

Под свободным пространством в теории распространения радиоволн обычно понимают однородную, безграничную среду, у которой абсолютная диэлектрическая проницаемость ε_a , абсолютная магнитная проницаемость μ_a , и удельная проводимость σ определяются выражениями:

$$\varepsilon_a = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 = \varepsilon_0 = 10^{-9}/(36\pi), \text{ Ф/м}, \quad (2.1)$$

$$\mu_a = \mu \cdot \mu_0 = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \text{ Гн/м}, \quad (2.2)$$

$$\sigma = 0, \text{ См/м}. \quad (2.3)$$

Из этих выражений видно, что в свободном пространстве относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 1$, относительная магнитная проницаемость $\mu = 1$. Такая среда является изотропной (свойства среды одинаковы по разным направлениям) и не поглощающей (радиоволны, распространяющиеся в такой среде, не испытывают потерь энергии) [2]. Строго говоря, подобных сред в природе не существует. Однако изучение особенностей распространения радиоволн в свободном пространстве является оправданным и необходимым. Дело в том, что общие свойства электромагнитного поля, определенные для свободного пространства, крайне важны для понимания сущности распространения радиоволн в любой естественной среде.

Именно в свободном пространстве в наиболее полной и точной форме проявляются законы геометрической оптики, знакомые из курса школьной физики. Любое отклонение от условий свободного пространства, например: наличие границы раздела земная поверхность-воздух, городская застройка, структура тропосферы или ионосферы и т.п. приводит к отклонению волнового процесса от законов геометрической оптики.

Следует понимать, что в некоторых случаях распространение радиоволн в атмосфере происходит при отсутствии существенного влияния границы раздела земная поверхность – воздух, городской застройки, а также тропосферы или ионосферы. В таких случаях атмосферу, в первом приближении, можно рассматривать как свободное пространство. Ещё с большим основанием космическое пространство, в силу чрезвычайной разреженности содержащихся в нем частиц, можно также рассматривать как свободное пространство.

Рассмотрим радиолинию между двумя космическими аппаратами КА 1 и КА 2 (рис. 2.1,а). С целью упрощения рассмотрим передачу радиосигналов в одном направлении — от КА 1 в сторону КА 2.

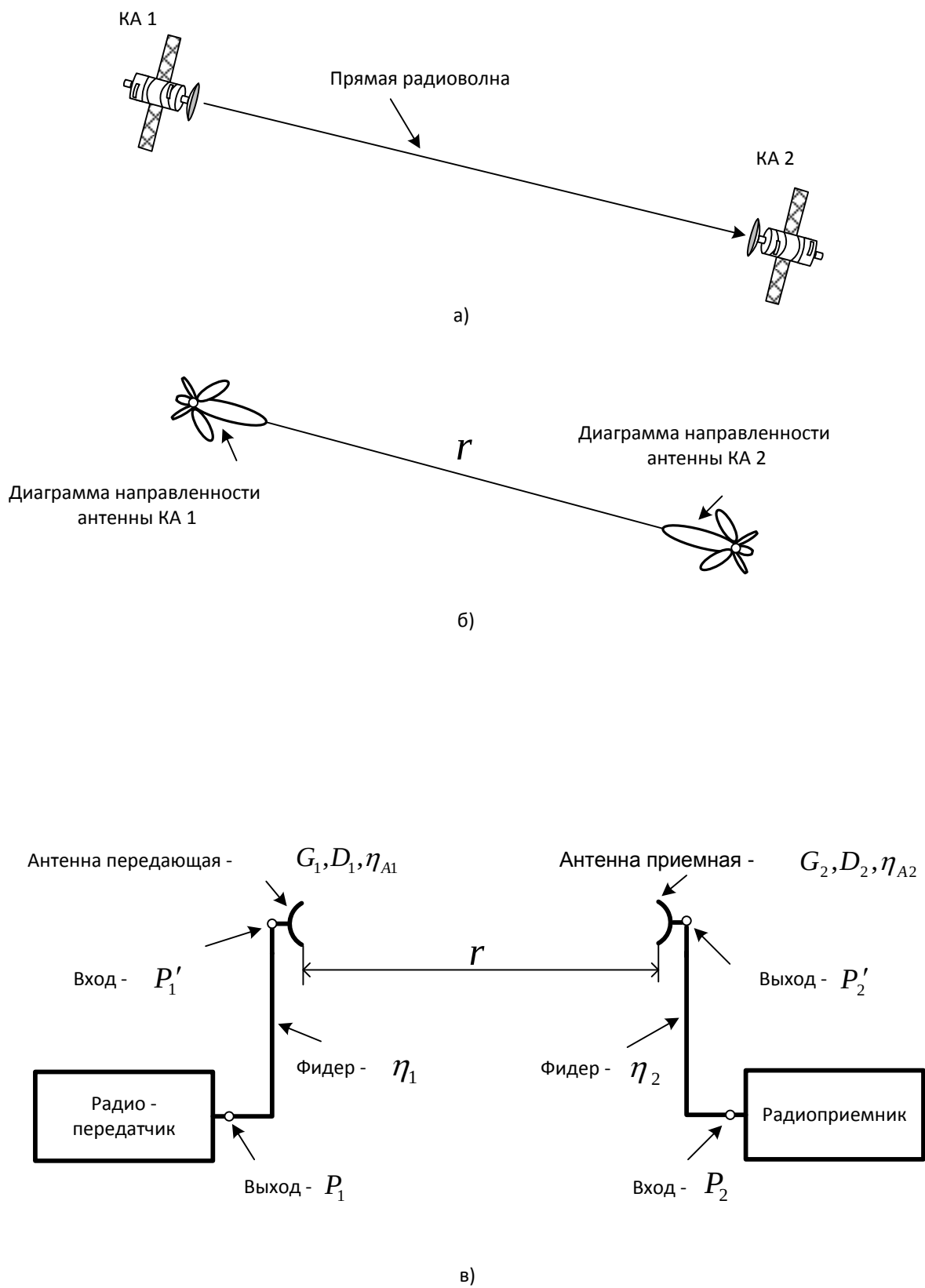


Рис. 2.1

В этом случае радиопередатчик и передающая антенна находятся на КА 1, а приемная антенна и радиоприемник — на КА 2. Такая радиолиния по определению использует прямую радиоволну.

Пусть диаграммы направленности передающей и приемной антенн ориентированы своими максимумами в направлении точек, где расположены соответственно КА 2 и КА 1 (рис. 2.1,б). Говорить о «точках» можно потому, что линейные размеры пространства, занятого каждым КА, несоизмеримо малы в сравнении с расстоянием r между ними.

Энергетические соотношения для рассматриваемой радиолинии удобно рассматривать с помощью обобщенной структурной схемы, приведенной на рис. 2.1,в. Термин «радиосигнал» будем понимать как сигнал в виде радиоизлучения или сигнал в электрической цепи на частоте радиоизлучения [1]. В дальнейшем будем исходить из того, что читатель знаком с назначением и параметрами передающих и приемных антенн, а также их фидеров [2], [21].

Введем обозначения, относящиеся к передающей стороне радиолинии (КА 1): P_1 — мощность радиосигнала на выходе радиопередатчика, η_1 — коэффициент полезного действия фидера передающей антенны, P'_1 — мощность радиосигнала на входе передающей антенны, η_{A1} — коэффициент полезного действия передающей антенны, D_1 — коэффициент направленного действия передающей антенны, G_1 — коэффициент усиления передающей антенны.

Введем обозначения, относящиеся к приемной стороне радиолинии (КА 2): P_2 — мощность радиосигнала на входе радиоприемника, η_2 — коэффициент полезного действия фидера приемной антенны, P'_2 — мощность радиосигнала на выходе приемной антенны, η_{A2} — коэффициент полезного действия приемной антенны, D_2 — коэффициент направленного действия приемной антенны, G_2 — коэффициент усиления приемной антенны.

Значение мощности P_1 обычно известно, так как это параметр радиопередатчика. Значение мощности P'_1 можно определить по формуле:

$$P'_1 = P_1 \eta_1. \quad (2.4)$$

Мощность излучения передающей антенны КА 1 связана с мощностью P'_1 соотношением:

$$P_\Sigma = P'_1 \eta_{A1}. \quad (2.5)$$

Формула (2.5) легко приводится к виду:

$$P_\Sigma = P_1 \eta_1 \eta_{A1}. \quad (2.6)$$

Любая передающая антенна, ориентированная максимумом излучения на пункт приема, создает в дальней зоне в точке приема среднее (во времени — за период) значение плотности потока энергии $\vec{\Pi}$. Модуль этого вектора определяется формулой:

$$|\vec{\Pi}| = \Pi = P_\Sigma D / (4\pi r^2), \quad (2.7)$$

где:

P_{Σ} – мощность излучения антенны;

D – максимальное значение КНД антенны;

r – расстояние между точками передачи и приема.

Применительно к рассматриваемой радиолинии (рис. 2.1,в) формулу (2.7) можно представить в следующем виде:

$$P_2 = P_{\Sigma} D_1 / (4\pi r^2) = P_1 \eta_1 \eta_{A1} D_1 / (4\pi r^2), \quad (2.8)$$

где:

P_2 – модуль среднего значения плотности потока энергии, создаваемого радиопередающим устройством КА 1, в месте (точке) расположения КА 2;

$P_1; \eta_1; \eta_{A1}; D_1$ – величины, характеризующие радиопередающее техническое средство на КА 1, суть которых определена в тексте выше и дополнительно пояснена надписями на рис. 2.1,в;

r – расстояние между КА 1 и КА 2.

Следует обратить внимание, что значение P_2 в (2.8) убывает как $1/r^2$. Это объясняется исключительно расходимостью излучаемых сферических радиоволн. В свободном пространстве, как уже отмечалось, отсутствует поглощение энергии радиоволн.

Из теории антенн известно, что произведение коэффициента полезного действия антенны на её КНД определяет коэффициент усиления антенны. С учетом этого коэффициент усиления G_1 передающей антенны на КА 1 следует записать в виде:

$$G_1 = D_1 \eta_{A1}. \quad (2.9)$$

В этом случае (2.8) с учетом (2.9) сводится к виду:

$$P_2 = P_1 \eta_1 G_1 / (4\pi r^2). \quad (2.10)$$

Далее перейдем к расчету мощности радиосигнала на входе радиоприемника P_2 . Для этого следует вспомнить, что способность приемной антенны извлекать энергию из электромагнитного поля радиоволны характеризуют эффективной площадью антенны S_{Σ} , которая является коэффициентом пропорциональности между значением мощности, отдаваемой антенной в согласованную с ней нагрузку, и модулем среднего значения плотности потока энергии. Таким образом, для рассматриваемой задачи имеем:

$$P'_2 = S_{\Sigma} P_2. \quad (2.11)$$

Эффективная площадь приемной антенны связана коэффициентом усиления G_2 соотношением:

$$S_{\Sigma} = D_2 \eta_{A2} (\lambda^2 / 4\pi) = G_2 (\lambda^2 / 4\pi). \quad (2.12)$$

Из формул (2.11) и (2.12) с учетом (2.8) нетрудно получить выражение для расчета P'_1 – мощности на выходе приемной антенны:

$$P'_2 = S_{\Sigma} P_2 = (P_1 \eta_1 G_1 G_2 \lambda^2) / (4\pi r)^2. \quad (2.13)$$

Переход к P_2 – мощности радиосигнала на входе радиоприемника очевиден:

$$P_2 = P'_2 \eta_2. \quad (2.14)$$

Подставив в (2.14) выражение (2.13), получаем окончательно:

$$P_2 = (P_1 \eta_1 \eta_2 G_1 G_2 \lambda^2) / (4\pi r)^2. \quad (2.15)$$

Выражение (2.15) определяет радиочастотную энергетику при передаче сигналов по радиолинии в условиях свободного пространства.

В заключение раздела приведем без вывода ещё одну весьма важную формулу, позволяющую рассчитать амплитуду напряженности электрического поля в точке приема, зная параметры радиотехнического средства: мощность на выходе передатчика, коэффициент полезного действия фидера передающей антенны и коэффициент усиления передающей антенны. Применительно к рассматриваемой задаче амплитуда напряженности электрического поля в точке, где расположена приемная антенна КА 2, будет определяться выражением:

$$E_m = \sqrt{60 P_1 \eta_1 G_1} / r = \sqrt{60 P'_1 G_1} / r. \quad (2.16)$$

Эту формулу читателю предлагается получить самостоятельно, используя (2.10), (2.4) и известную связь между модулем среднего значения плотности потока энергии Π и амплитудой напряженности электрического поля E для плоской электромагнитной волны, распространяющейся в свободном пространстве:

$$\Pi = E_m^2 / 2W_0, \quad (2.17)$$

где $W_0 = 120\pi = 377$ Ом – характеристическое сопротивление свободного пространства.

2.2. Понятие о потерях при передаче электромагнитной энергии по радиолинии

2.2.1. Потери при передаче в условиях свободного пространства

В теории распространения радиоволн широко используются понятия «потери при передаче» и «основные потери при передаче». Смысл понятия «потери при передаче» рассмотрим на примере рис. 2.1, в — это отношение мощности P'_1 на входе передающей антенны к мощности P'_2 на выходе приемной антенны. Приведенное определение, с учетом обозначения потерь при передаче в условиях свободного пространства как L_{CB} , позволяет записать:

$$L_{CB} = P'_1 / P'_2. \quad (2.18)$$

Индекс «св» в обозначении величины L_{CB} подчеркивает, что речь идет о потерях при передаче в условиях свободного пространства.

Подставим в (2.18) вместо P'_1 его значение из (2.4) а вместо P'_2 — из (2.14) и получим:

$$L_{CB} = P'_1 / P'_2 = P_1 \eta_1 \eta_2 / P_2. \quad (2.19)$$

В этой формуле потери при передаче выражаются через мощности на выходе радиопередатчика P_1 и входе радиоприемника P_2 . При этом учитываются коэффициенты полезного действия фидеров антенн (η_1 и η_2).

В предыдущем разделе было получено выражение для P_2 (формула 2.15). Если это выражение подставить в (2.19), то будем иметь:

$$L_{CB} = (4\pi r/\lambda)^2 / G_1 G_2. \quad (2.20)$$

Числитель в формуле (2.20) принято называть «основными потерями при передаче в условиях свободного пространства» и обозначать через L_{0CB} :

$$L_{0CB} = (4\pi r/\lambda)^2. \quad (2.21)$$

Таким образом, L_{0CB} — это потери при передаче также в свободном пространстве, но при условии применения изотропных антенн (воображаемых антенн, излучающих радиоволны равномерно по всем направлениям или принимающих радиоволны равномерно со всех направлений). Для таких антенн справедливо равенство:

$$G_1 = G_2 = 1. \quad (2.22)$$

Легко проверить, что подстановка (2.22) в (2.20) приводит к (2.21).

Поскольку абсолютное значение потерь может изменяться в весьма больших пределах, их удобно выражать в децибелах. В этом случае формулы (2.20) и (2.21) принимают вид:

$$L_{CB, \text{дБ}} = 10 \lg(L_{CB}) = 20 \lg(4\pi r/\lambda) - 10 \lg(G_1) - 10 \lg(G_2), \quad (2.23)$$

$$L_{0CB, \text{дБ}} = 10 \lg(L_{0CB}) = 20 \lg(4\pi r/\lambda). \quad (2.24)$$

Напомним, что основные потери при передаче в условиях свободного пространства характеризуют потери, обусловленные исключительно сферической расходимостью радиоволн.

2.2.2. Дополнительные потери при передаче и множитель ослабления в условиях реальной среды

В случае реальных сред, отличных по своим свойствам от свободного пространства, распространяющаяся радиоволна испытывает дополнительные потери при передаче — $L_{\text{доп}}$. При этом полные потери при передаче L будут определяться произведением:

$$L = L_{CB} L_{\text{доп}}. \quad (2.25)$$

Дополнительные потери возникают, например, при распространении радиоволн над поверхностью Земли, в тропосфере, ионосфере, в условиях городской застройки. Дополнительные потери — это дополнительное ослабление амплитуды напряженности поля по сравнению с её ослаблением в условиях свободного пространства.

Для количественной оценки дополнительного ослабления амплитуды вводят множитель ослабления поля свободного пространства $\tilde{V}$, который

везде ниже для краткости будем называть просто множителем ослабления. Множитель ослабления в общем случае является комплексной величиной:

$$\tilde{V} = \dot{E}_{mp} / \dot{E}_{m0} = V \exp(-j\varphi_V), \quad (2.26)$$

где:

$\dot{E}_{mp}$ и $\dot{E}_{m0}$ – комплексные амплитуды напряженности поля в точке приема при распространении радиоволны в реальной среде и в свободном пространстве, соответственно;

V и φ_V – модуль и фаза множителя ослабления.

В большинстве случаев модуль множителя ослабления V меньше единицы, но иногда (например, при интерференции волн) значение V может и превышать единицу.

Модуль множителя ослабления связан с величиной дополнительных потерь при передаче $L_{доп}$ соотношением:

$$L_{доп} = 1/V^2. \quad (2.25)$$

Если перейти к децибелам, то получим:

$$L_{доп}, \text{ дБ} = -20 \lg(V), \quad (2.26)$$

$$L, \text{ дБ} = L_{св}, \text{ дБ} + L_{доп}, \text{ дБ} = L_{св}, \text{ дБ} - 20 \lg(V), \text{ дБ}. \quad (2.27)$$

2.3. Область пространства, существенная для распространения радиоволн в свободном пространстве

Для дальнейшего знакомства с процессами, присущими распространению радиоволн, важно иметь представление о границах той области пространства, которая эффективно участвует в процессе передачи энергии радиоволны из одной точки свободного пространства в другую. Эту область иначе называют существенной (иначе, доминантной) для распространения радиоволн в свободном пространстве. Ниже пойдет речь о физической трактовке формирования указанной области и её границах.

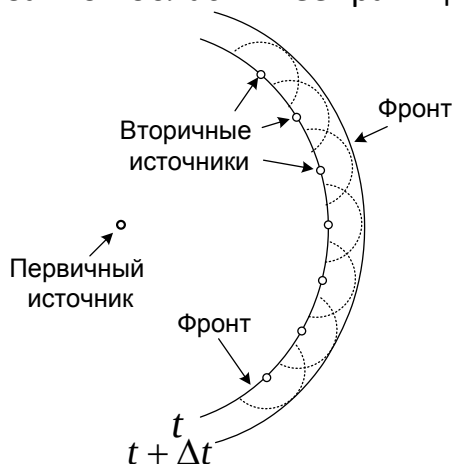


Рис. 2.2

Из школьного курса физики читатель знаком с принципом Гюйгенса. В соответствии с этим принципом в момент времени t каждая точка сферического фронта волны (рис. 2.2), распространяющейся от первичного источника, может рассматриваться как вторичный источник новой сферической волны. Новый фронт для момента времени $t + \Delta t$ находят как огибающую волновых фронтов от вторичных источников.

В реальных задачах, как правило, важно знать не форму волнового фронта радиоволны, а значения амплитуды и фазы напряженности поля в точке приема.

Пусть в точке A (рис. 2.3) расположен первичный излучатель (передающая антенна) и требуется определить напряженность электрического поля в точке B . Вокруг излучателя мысленно проведем произвольную замкнутую поверхность S (не обязательно сферическую). Согласно математической трактовке принципа Гюйгенса, сформулированной Кирхгофом, каждый элементарный участок ΔS на поверхности S можно заменить действием вторичных источников сферических волн. Таким образом, каждый элемент ΔS создает в точке B поле со своей амплитудой и фазой. Значение фазы пропорционально расстоянию $\rho + r$:

$$\psi = (2\pi/\lambda)(\rho + r). \quad (2.28)$$

Поле в точке B определяется путем векторного суммирования полей от вторичных источников по всей поверхности S .

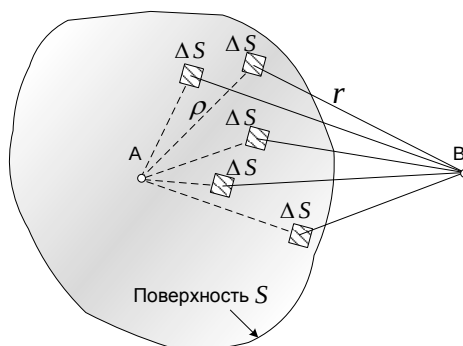


Рис.2.3

Чтобы проследить процесс формирования поля в точке B за счет излучения вторичных источников, обычно рассматривают наглядный случай, когда между точкой излучения радиоволн A и точкой их приема B находится непрозрачный для радиоволн экран бесконечных размеров (рис. 2.4). Пусть плоскость экрана перпендикулярна линии AB , а в центре экрана имеется круглое отверстие диаметра d . Произвольную поверхность S , замкнутую вокруг точки A , можно задать в виде трех частей: плоскости отверстия, плоскости экрана и бесконечно удаленной полусферы, опирающейся на экран.

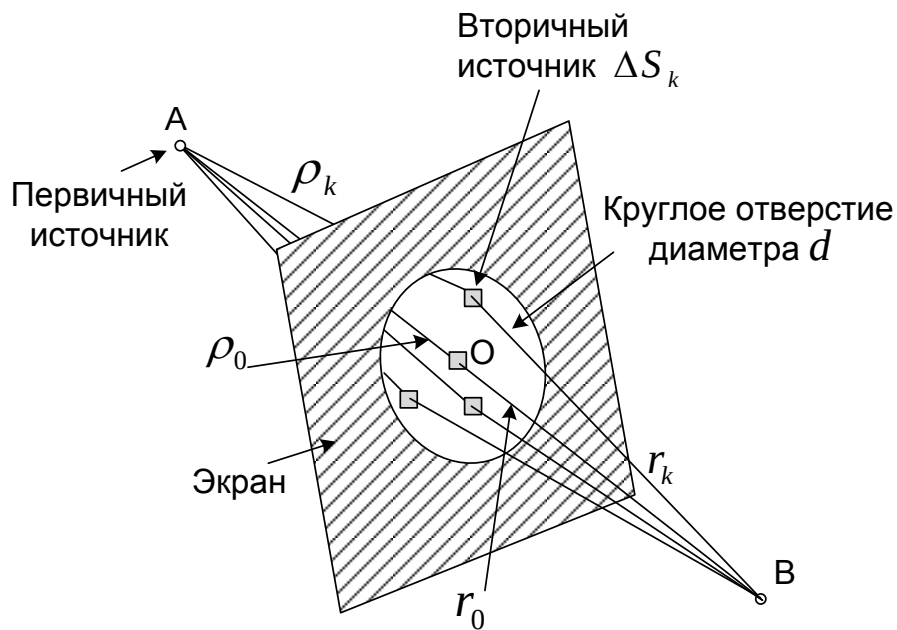


Рис. 2.4

Любой k -ый элементарный участок поверхности ΔS_k , расположенный на поверхности отверстия, представляет собой вторичный источник сферической волны. Этого нельзя сказать о той части поверхности, которая совпадает с непрозрачной для радиоволн плоскостью экрана (так называемые, краевые токи вблизи кромки экрана учитывать не будем). Другими словами на поверхности экрана вторичных источников нет.

На третьей части поверхности (бесконечно удаленной полусфере) вторичные источники теоретически есть, но они не влияют на формирование поля в точке B , потому что при удалении от точки излучения амплитуда напряженности электрического поля убывает пропорционально расстоянию, которое в данном случае стремится к бесконечности (экран по условию имеет бесконечные размеры).

Информацию о форме и размерах области пространства, существенного для переноса энергии радиоволны из точки A в точку B , можно получить с использованием представлений о зонах Френеля. Выше отмечалось, что напряженность поля в точке B определяется путем векторного суммирования полей от вторичных источников по всей поверхности круглого отверстия. Значение суммарной напряженности поля будет зависеть от расстояния AB , от места нахождения экрана (параметры ρ_0 и r_0), от диаметра отверстия в нем d (рис. 2.4). Если ρ_0 и r_0 оставить неизменными и мысленно увеличивать d , начиная с нулевого значения, то напряженность поля в точке B будет изменяться так, как это схематично показано на рис. 2.5. Рассмотрим подробнее процесс формирования напряженности поля в точке B .

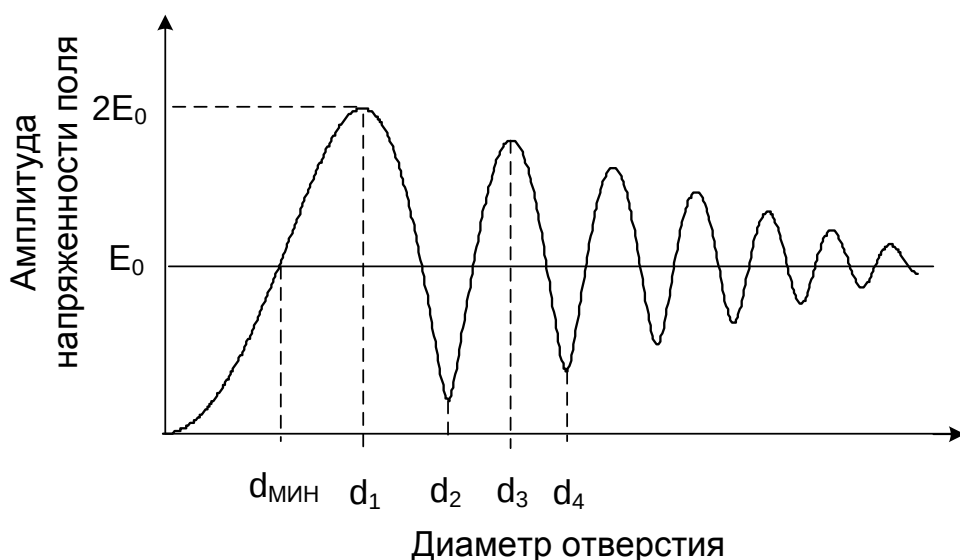


Рис. 2.5

При увеличении диаметра d , что равносильно увеличению площади отверстия, амплитуда напряженности поля сначала будет увеличиваться. При некотором значении $d = d_1$ (рис. 2.6,а) наступит такой момент, когда будет выполняться равенство:

$$(\rho_1 + r_1) - (\rho_0 + r_0) = 1 \cdot \lambda / 2. \quad (2.29)$$

В этом случае разность фаз радиоволн вторичных источников, находящихся от точки B на расстоянии r_1 (периферийная линия отверстия диаметра d_1) и r_0 (точка расположения вторичного источника в центре отверстия O), согласно (2.28) будет равна $\Delta\psi = (2\pi/\lambda) \cdot (\lambda / 2) = \pi$. Поверхность отверстия, ограниченная окружностью, для которой выполняется условие (2.29), называется первой зоной Френеля.

Все вторичные источники радиоволн, расположенные в пределах первой зоны, характеризуются тем, что фазы создаваемых ими полей в точке B отличаются от фазы поля, созданного вторичным излучателем, находящимся в точке O , не более чем на π (на 180°). Именно поэтому в точке B амплитуда напряженности поля при росте диаметра от 0 до d_1 (в пределах первой зоны Френеля) получается наибольшей — равной $2E_0$, где E_0 — напряженность поля, создаваемая первичным источником излучения в свободном пространстве, то есть при полном отсутствии экрана.

При дальнейшем увеличении диаметра отверстия от d_1 до d_2 (рис. 2.6,б) амплитуда напряженности поля в точке B будет уменьшаться. По мере увеличения диаметра отверстия наступит такой момент, когда будет выполняться равенство:

$$(\rho_2 + r_2) - (\rho_0 + r_0) = 2 \cdot \lambda / 2. \quad (2.30)$$

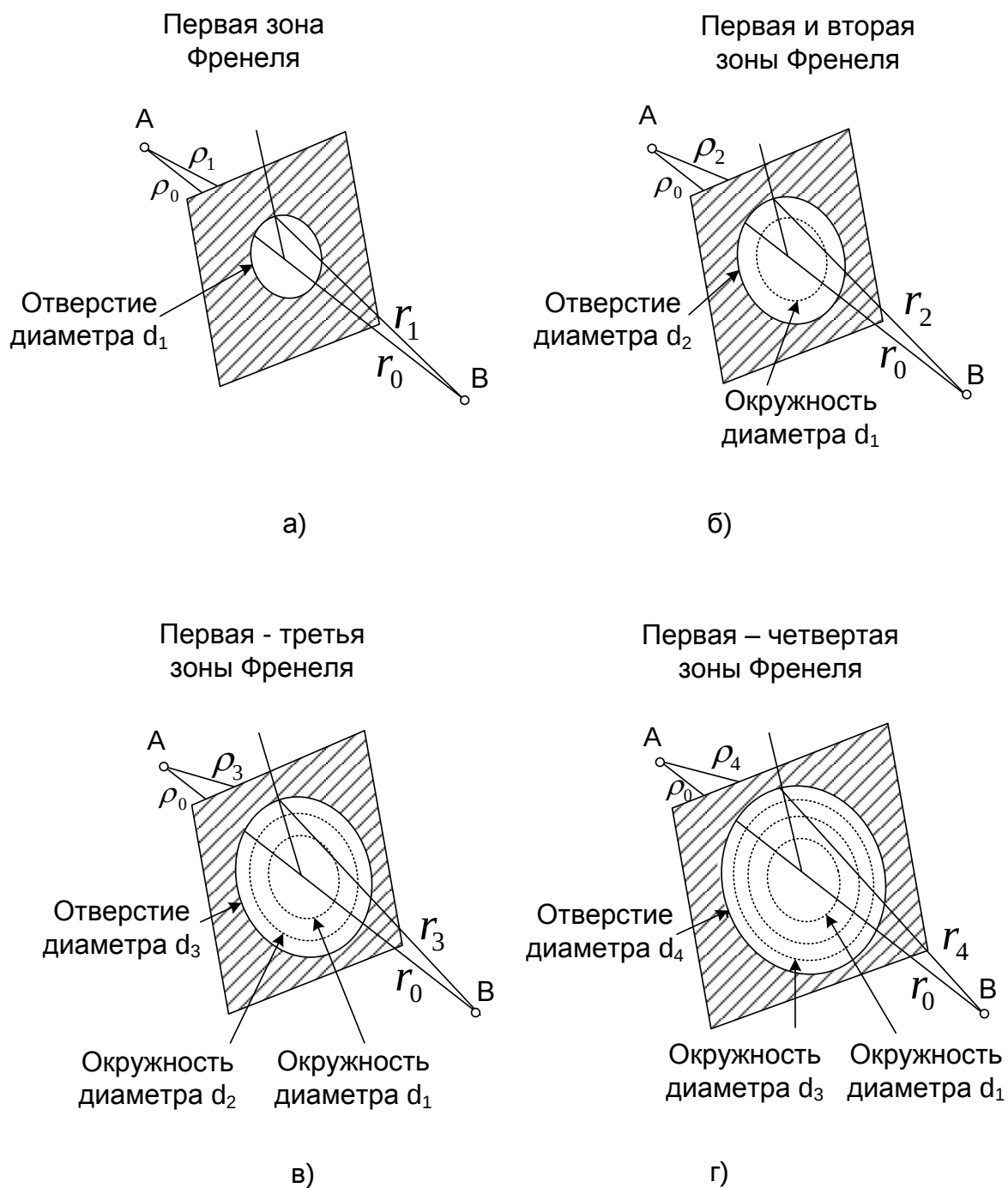


Рис. 2.6

В этом случае разность фаз радиоволн вторичных источников, находящихся от точки B на расстоянии r_2 (новая периферийная линия отверстия диаметра d_2) и r_0 (точка расположения вторичного источника в центре отверстия O), будет равна $\Delta\psi = 2\pi$, так как разности хода в одну длину волны (2.30) соответствует разность фаз 2π (360°).

Поверхность кольцевой части отверстия, ограниченная окружностями, для которых одновременно выполняются условия (2.29) и (2.30), носит название второй зоны Френеля.

Все вторичные источники радиоволн, расположенные в пределах второй зоны, характеризуются тем, что фазы создаваемых ими полей в точке B отличаются от фазы поля, созданного вторичным излучателем, находящимся в точке O , на величину от π до 2π (от 180° до 360°).

Можно сказать, что в целом (в интегральном смысле) фазы полей вторичных источников из второй зоны отличаются на 180° от фаз полей вторичных источников из первой зоной. Следует понимать, что поле в точке B теперь формируется двумя зонами Френеля — первой и второй. Именно противофазность полей, создаваемых вторичными источниками этих зон, является причиной уменьшения суммарной амплитуды напряженности поля до некоторого наименьшего значения.

При дальнейшем увеличении отверстия от d_2 до d_3 (рис. 2.6,в) значение амплитуды напряженности поля начнет снова возрастать и достигнет нового максимума, когда будет выполняться равенство:

$$(\rho_3 + r_3) - (\rho_0 + r_0) = 3 \cdot \lambda/2. \quad (2.31)$$

Кольцевая область отверстия, ограниченная окружностями с диаметрами d_2 и d_3 , соответствует третьей зоне Френеля. В целом фазы поля в точке B от вторичных источников из третьей и второй зон отличаются на 180° , а из третьей и первой — равны.

Очевидно, что следующий минимум значения амплитуды напряженности поля будет при выполнении равенства:

$$(\rho_4 + r_4) - (\rho_0 + r_0) = 4 \cdot \lambda/2. \quad (2.32)$$

Кольцевая область отверстия, ограниченная окружностями диаметров d_3 и d_4 , соответствует четвертой зоне Френеля (рис. 2.6,г).

Сравнивая выражения (2.29) – (2.32), можно заметить, что значения амплитуд напряженности поля в точке B принимают экстремальные значения в случаях, когда

$$(\rho_n + r_n) - (\rho_0 + r_0) = n \cdot \lambda/2. \quad (2.33)$$

Причем максимумы амплитуды будут при n нечетном, а минимумы при n четном.

Существенную область обычно ограничивают восемью зонами Френеля ($n = 8$). При таком приближении ошибка в вычислении поля не превышает 16%. Внешний диаметр n -ой зоны Френеля определяется соотношением [4]:

$$d_n = 2\sqrt{n\lambda[\rho_0 r_0 / (\rho_0 + r_0)]}, \quad (2.34)$$

где $n = 1, 2, 3 \dots$ – номер зоны Френеля, для которой рассчитывается диаметр.

Важным является вопрос о пространственной форме существенной области. При смещении экрана вдоль осевой линии AB (рис. 2.6) диаметр любой

зоны изменяется. Он будет максимален, когда $\rho_0 = r_0$, и уменьшается по мере приближения экрана к точкам A или B . Так как разница расстояний $(\rho_n + r_n) - (\rho_0 + r_0) = n \cdot \lambda/2$ постоянна, то концы диаметра любой зоны Френеля прочертят эллипс с фокусами в точках A и B . Геометрия рассматриваемой задачи (рис. 2.6) обладает круговой симметрией относительно прямой AB . Последнее позволяет утверждать, что распространение радиоволны из точки передачи в точку приема происходит в некоторой области пространства, имеющей форму эллипсоида вращения с фокусами в точках A и B . Этот эллипсоид ограничивает существенную область пространства распространения радиоволны.

На практике часто полагают, что при оценке существенной области достаточно ограничиться учетом только первой зоны Френеля ($n = 1$).

В инженерной практике существует понятие минимальной зоны — это отверстие в экране, при котором $E/E_0 = 1$, т. е. достигается амплитуда, равная напряженности поля при отсутствии экрана (рис. 2.5). Диаметр минимальной зоны определяется выражением:

$$d_{\text{МИН}} = 0,578d_1, \quad (2.35)$$

где d_1 — диаметр первой зоны Френеля, который вычисляется по формуле (2.29) при $n = 1$. Ее границы образуют более вытянутый эллипсоид по сравнению с эллипсоидами, соответствующими любому другому числу учитываемых зон Френеля.

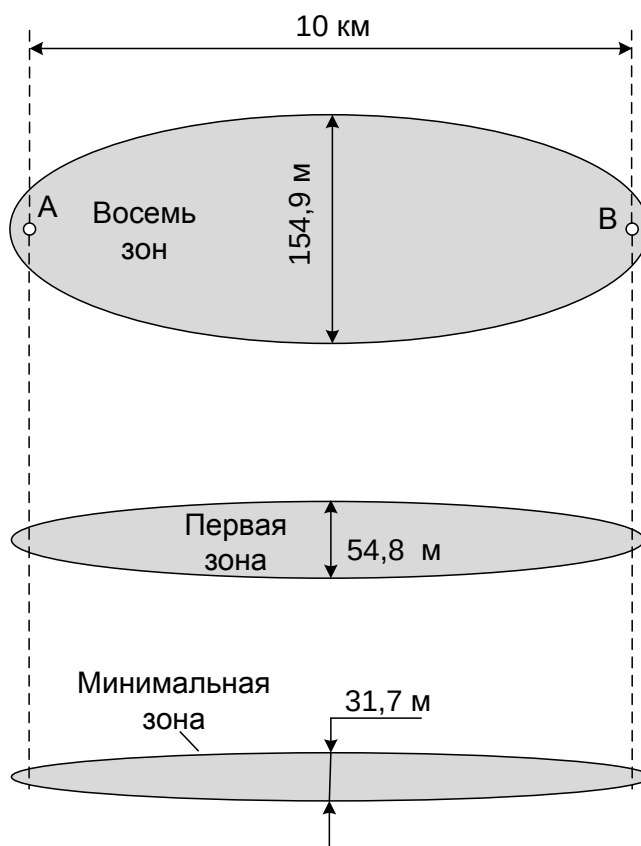


Рис. 2.7

На рис 2.7 показаны сечения существенных областей для $n = 8$ и $n = 1$, а также сечение минимальной области. Все они соответствуют радиолинии протяженностью 10 км и длине волны 30 см в условиях свободного пространства.

Естественные объекты (горы, холмы, лесные массивы) и объекты искусственного происхождения (здания, мачты, башни), оказавшиеся в области, существенной для распространения радиоволн, вызывают эффект ослабления радиосигнала. Задача проектировщика радиолинии, проходящей в пересеченной местности, заключается в таком выборе местоположения антенн и их высот, при которых существенная область (эллипсоид, соответствующий восьми зонам Френеля) целиком расположен над вершинами выступающих объектов. В подобных условиях объекты не будут порождать ослабления радиосигнала, а сама напряженность электрического поля будет равна напряженности поля в свободном пространстве.

На практике высоты антенн (точки А и В) выбирают, чтобы, как говорят, была обеспечена на всем пути распространения радиоволн «чистота первой зоны Френеля». На рис. 2.8,а показан пример неправильного выбора высот – один из объектов (здание) попадает в первую зону Френеля. На рис. 2.8,б показано, что увеличение высот антенн позволяет обеспечить чистоту первой зоны Френеля.

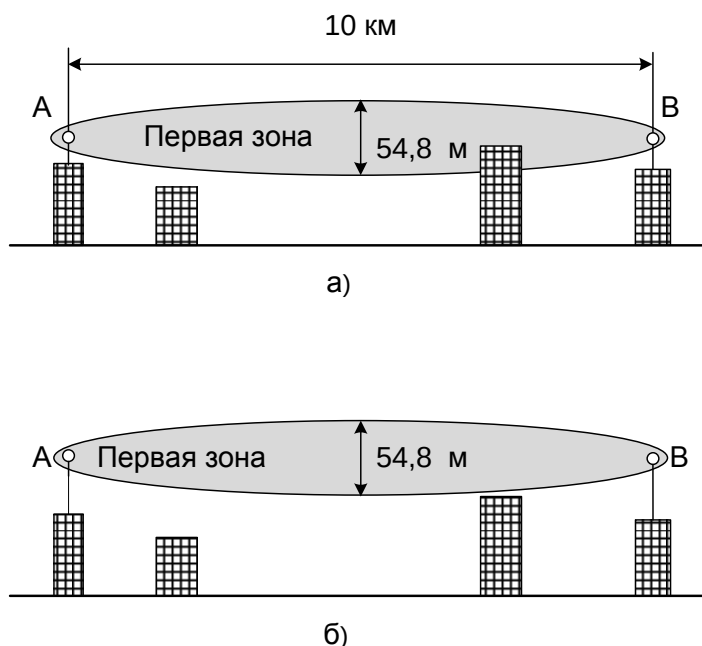


Рис. 2.8

Следует знать, что диаграммы направленности антенн в точках А и В влияют на форму и размеры существенной области. Особенно заметно это проявляется при достаточно узких диаграммах антенн на частотах $f > 300$ МГц.

3. ВЛИЯНИЕ ЗЕМЛИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

3.1. Особенности процесса распространения радиоволн над Землей

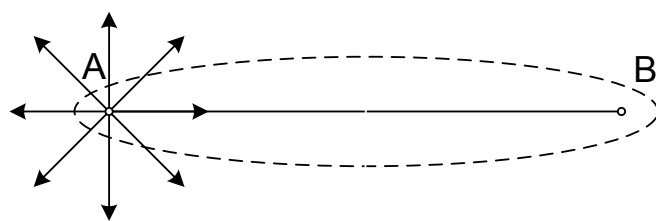
Радиопередающие и радиоприемные устройства технических средств линий наземной радиосвязи расположены на или вблизи поверхности Земли. В этом случае технология радиосвязи реализуется с использованием земных волн. Определение земной волны приведено выше (раздел 1, табл. 1.3).

Используем понятие существенной области (раздел 2.3.) для уяснения главных особенностей процесса распространения радиоволн над Землей и смысла возможных методов учета её влияния [4].

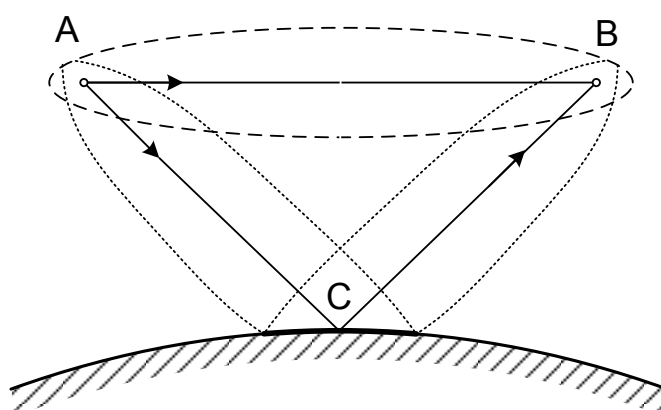
Само понятие существенной области возникло при рассмотрении радиолинии в свободном пространстве. В этом случае при излучении сферической волны из точки A поле в точке B достаточно полно определяется процессом внутри некоторого эллипсоида вращения, сечение которого обозначено на рис. 3.3,а эллипсом. Следует понимать, что в свободном пространстве идентичные эллипсы можно выделить на любом другом радиальном луче, исходящем из точки излучения A (в этом случае точки наблюдения должны быть также заданы на выбранных лучах). Однако электромагнитные поля, сосредоточенные в этих эллипсоидах, совершенно не будут влиять на поле в точке B .

Пусть далее, радиолиния расположена над Землей. При этом возможны разные случаи. Если обе антенны находятся достаточно высоко (рис. 3.3,б), то, очертив существенную область (пунктир), мы отмечаем, что между точками A и B существует прямая волна, распространяющаяся непосредственно от источника к месту приема. Если учитывать только эту волну, то в точке B создается точно такое же поле, которое было бы в отсутствие Земли. Однако в сравнении со случаем свободного пространства (рис. 3.3,а) появилась весьма существенная особенность. Дело в том, что энергия радиоволн, сконцентрированная в эллипсоиде, соответствующем лучу AC , повлияет на поле в точке B . Произойдет это за счет отражения радиоволны от поверхности Земли. Сечение «ломаного» эллипсоида соответствует падающей волне (направление AC) и волне отраженной (направление CB). Это сечение показано на рис. 3.3,б точечной линией. Полное поле в точке B складывается, таким образом, из двух составляющих, одна из которых соответствует прямой волне, а другая — отраженной от Земли.

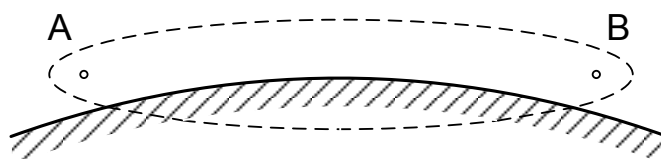
Заметим, что отражение радиоволны, в соответствии с волновой теорией, происходит не в одной точке (в данном случае в точке C), а от некоторого достаточно обширного участка поверхности, который называется областью существенной для отражения (на рис. 3.3,б он выделен в виде утолщенной линии). Расчет размеров существенной области отражения имеется в [17,19].



а)



б)



в)

Рис. 3.3

Обратимся теперь к принципиально иному случаю, когда передающая антенна (точка A) и приемная антенна (точка B) находятся в непосредственной близости от Земли, и существенная область для распространения радиоволн не лежит целиком над Землей (рис. 3.3, в). В этом случае поле в точке B уже нельзя представить как результат наложения прямой и отраженной волн.

Простая отражательная трактовка здесь неприменима, и нужна строгая постановка электродинамической задачи о возбуждении тела, имитирующего Землю. Такая задача относится к классу дифракционных.

В общем случае строгий расчет поля земной волны в точке приема с учетом реальных свойств Земли и атмосферы представляет собой чрезвычайно сложную задачу. Для облегчения её решения вводят некоторые упрощения. Во-первых, Землю считают правильным сферическим телом (в реальности земной шар является геоидом — телом, близким по форме к шару). Во-вторых, поверхность Земли считают идеально гладкой и однородной (в этом случае материальные параметры земной поверхности не зависят от пространственных координат). Материальные параметры атмосферы (воздуха) принимают такими же, как и параметры свободного пространства (см. раздел 2.1). Необходимые поправки, учитывающие влияние неровностей и шероховатости земной поверхности в настоящем учебном пособии не рассматривается.

Выше было показано, что особенности распространения земной волны между точками A и B определяются положением области, существенной для распространения радиоволн относительно поверхности Земли. Очевидно, что при заданной длине радиолинии r положение такой области определяется высотами подъема передающей и приемной антенн h_1 и h_2 (рис. 3.4,а).

Вернемся к практически важным случаям, уже рассмотренным в общих чертах. Первый случай – передающая и приемная антенны подняты высоко (в масштабе длины волны) над земной поверхностью (рис. 3.3,б). Это случай так называемых «высоко поднятых антенн». Он характерен при использовании частот 30..300 МГц (ОВЧ) и 300...3000 МГц (УВЧ). Типичными примерами высоко поднятых антенн являются антенны радиорелейных станций прямой видимости, антенны радиотелевизионных передающих станций, антенны базовых станций сотовой связи.

Второй случай – обе антенны расположены в непосредственной близости у поверхности Земли (рис. 3.3,в). Он характерен при использовании частот 0,3...3 МГц (СЧ) и 30...300 кГц (НЧ). Типичными примерами низко расположенных антенн являются антенны радиовещательных станций сетей звукового вещания в указанных диапазонах

При оценке условий распространения земной волны в случае высоко поднятых антенн, когда $h_1 \gg \lambda$ и $h_2 \gg \lambda$, длину радиолинии r часто сравнивают с предельным расстоянием прямой видимости $r_{пр}$ (рис. 3.4,б). Для высот подвеса антенн на передаче и приеме всегда выполняются неравенства $h_1 \ll a_{ЗМ}$ и $h_2 \ll a_{ЗМ}$, где $a_{ЗМ} = 6370$ км – радиус Земли, поэтому величина $r_{пр}$, отсчитываемая вдоль поверхности Земли, приближенно равна прямой AB , касательной к поверхности.

Из геометрии рис. 3.4,б следует, что

$$r_{пр} = \sqrt{2a_{ЗМ}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})}. \quad (3.1)$$

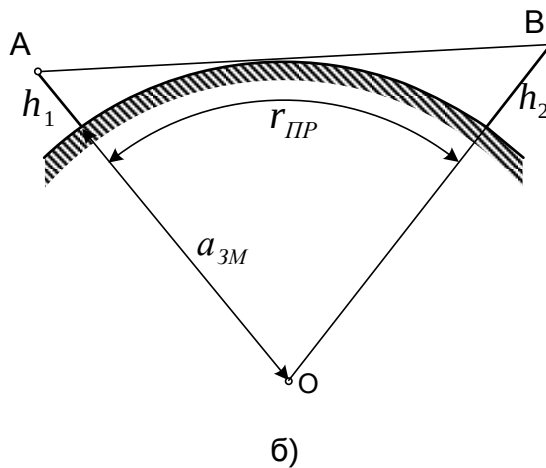
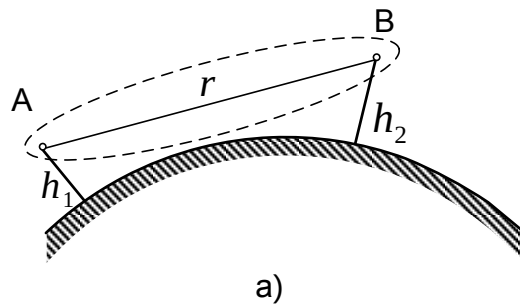


Рис. 3.4

Если r_{PP} выразить в километрах, h_1 и h_2 – в метрах, то после подстановки в (3.1) численного значения a_{3M} получим:

$$r_{PP} = 3,57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}). \quad (3.2)$$

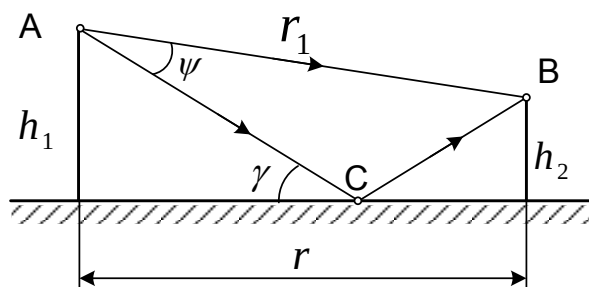
Зону действия земной волны принято делить на области – освещенную область и область тени. Освещенная область — это зона земной поверхности, окружающая передающую антенну и лежащая в границах предельного расстояния прямой видимости ($r < r_{PP}$). Область тени — это зона на земной поверхности, окружающая передающую антенну и лежащая за границами предельного расстояния прямой видимости ($r > r_{PP}$). Иногда используют понятие области полутени, для которой справедливо условие ($r \approx r_{PP}$).

3.2. Влияние Земли при высоко поднятых антеннах

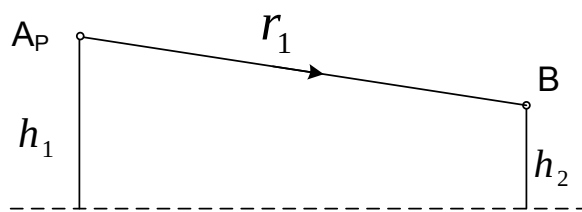
3.2.1. Приближение плоской земной поверхности

Пусть передающая антенна (точка A) и приемная антенна (точка B) находятся на такой высоте (рис. 3.5,а), что выполняется условие высоко

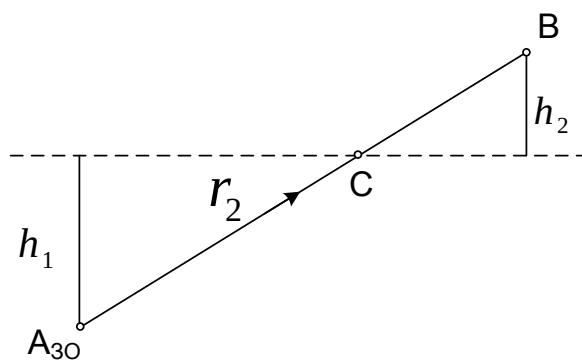
поднятых антенн ($h_1 \gg \lambda$ и $h_2 \gg \lambda$). Если радиолиния имеет небольшую протяженность ($r < 0,2r_{\text{пр}}$), то земную поверхность приближенно можно считать плоской. Из материала предыдущего раздела следует, что полное поле в точке B складывается из двух составляющих. Одна из них соответствует прямой волне, прошедшей путь AB , а другая — отраженной от Земли волне, прошедшей путь ACB .



а)



б)



в)

Рис. 3.5

Прямая волна распространяется непосредственно от передающей антенны к точке приема. Если учитывать только эту волну, то в точке B создается такое поле, которое было бы в отсутствие Земли (рис. 3.5,б). Выражение для

комплексной амплитуды напряженности поля прямой волны можно записать в виде:

$$\dot{E}_m^{PP} = (\sqrt{60PG} / r_1) e^{-jkr_1}, \quad (3.3)$$

где:

P – мощность радиосигнала на входе передающей антенны (в точке A);

G – коэффициент усиления передающей антенны в направлении максимального излучения (на точку B);

$k = 2\pi/\lambda$ – волновое число для радиоволны (коэффициент распространения);

r_1 – расстояние AB .

Сложнее записать выражение для комплексной амплитуды напряженности поля отраженной волны. При падении сферической волны от передающей антенны на реальную земную поверхность часть энергии проникает в поверхностный слой Земли и поглощается в нем. Следовательно, напряженности электрических полей отраженной и падающей волн будут иметь разные амплитуды и фазы. Строгое решение задачи определения поля отраженной волны оказывается сложным.

Для приближенного решения используют метод зеркальных отображений. Суть этого метода заключается в замене реальной антенны её зеркальным отображением за поверхностью раздела (точка A_{30}). При этом сама поверхность раздела исключается из рассмотрения (рис. 3.5,в).

Выражение для комплексной амплитуды напряженности поля, создаваемого в точке приема B зеркальным отображением (по сути дела отраженной волной), можно записать в виде:

$$\dot{E}_m^{OTP} = (\sqrt{60PG}/r_2) \tilde{R} e^{-jkr_2}, \quad (3.4)$$

где:

r_2 – расстояние $A_{30}B = AC + CB$ (рис. 3.5,в);

$\tilde{R} = R e^{j\theta}$ – комплексный коэффициент отражения сферической волны от плоской земной поверхности (R – модуль коэффициента отражения, θ – фаза коэффициента отражения).

Формулы (3.3) и (3.4) требуют некоторых пояснений. Прежде всего, в настоящем разделе мы ограничились рассмотрением случая, когда выполняются неравенства $r \gg h_1$ и $r \gg h_2$. В этих условиях вертикальный масштаб на рис. 3.5 пришлось для наглядности очень растянуть, поэтому углы на рисунке не отображают действительных значений. В действительности углы γ и ψ очень малы и обычно измеряются долями градуса. Направления AB и $A_{30}B$ в реальности почти совпадают. Именно это обстоятельство позволило предположить при написании формул (3.3) и (3.4), что коэффициенты усиления для обеих антенн имеют одно и то же значение.

В формулах (3.3) и (3.4), как отмечалось выше, через r_1 обозначена длина пути AB , проходимого прямой волной, а через r_2 – длина пути $A_{30}B$,

проходимого отраженной волн. Разность длин путей $r_2 - r_1 = \Delta r$. В силу неравенств $r \gg h_1$ и $r \gg h_2$, длина пути AB , проходимого прямой волной, очень незначительно отличается от горизонтально расстояния r . Следовательно, можно считать $r_1 = r$, а $r_2 = r + \Delta r$.

Учитывая это обстоятельство и подставляя в выражение (3.4) значение $\tilde{R}$, находим:

$$\dot{E}_m^{PP} = (\sqrt{60PG} / r) e^{-jkr}, \quad (3.5)$$

$$\dot{E}_m^{OP} = (\sqrt{60PG} / (r + \Delta r)) R e^{-jk(r+\Delta r)} e^{j\theta}. \quad (3.6)$$

Сравнение формул (3.5) и (3.6) показывает, что поле отраженной волны отличается от поля прямой волны по амплитуде и по фазе. Отличие по амплитуде определяется модулем R комплексного коэффициента отражения и разностью длин путей Δr в знаменателе. Отличие по фазе наблюдается вследствие двух причин: во-первых, в результате отставания фазы за счет разности длин путей волн Δr и, во-вторых, в результате сдвига фазы при отражении на угол θ .

Во всех практических случаях $\Delta r \ll r$, что позволяет пренебречь значением Δr рядом с величиной r в знаменателе (3.6). Однако ни в коем случае нельзя пренебречь значением Δr рядом с величиной r в показателе степени.

Учитывая изложенное, для комплексной амплитуды результирующего поля будет справедливо:

$$\dot{E}_m = \dot{E}_m^{PP} + \dot{E}_m^{OP} = (\sqrt{60PG} / r) (1 + R e^{-j(k\Delta r - \theta)}) e^{-jkr}. \quad (3.7)$$

В выражении (3.7) величины P, G, r обычно известны — они характеризуют радиолинию. Неизвестными величинами являются: Δr — разность длин путей, проходимых прямой волной и отраженной, модуль комплексного коэффициента отражения R , фазовый сдвиг при отражении θ (фаза комплексного коэффициента отражения). Можно показать, что

$$\Delta r = r_2 - r_1 \approx 2h_1 h_2 / r. \quad (3.8)$$

Для рассматриваемой радиолинии выполняются условия $r \gg h_1$ и $r \gg h_2$. Поэтому сферическую волну, излучаемую передающей антенной, на большом расстоянии, в частности, в окрестности точки C , можно считать плоской волной. Это означает, что мы имеем дело с отражением плоской волны от плоской границы раздела двух однородных изотропных сред.

Следует обратить внимание на следующий факт — в формуле (3.7) множитель в первых круглых скобках определяет значение амплитуды прямой волны (волны распространяющейся в воздухе или, что, практически равнозначно, в свободном пространстве). Функция во вторых круглых скобках называется множителем ослабления (см. раздел 2.2.2). В общем случае это комплексная величина, имеющая модуль и фазу:

$$\tilde{V} = 1 + R e^{-j(k\Delta r - \theta)} = V e^{-j\varphi_v}. \quad (3.9)$$

В количественной оценке множителя ослабления ключевую роль играет коэффициент отражения. Следующий раздел содержит сведения по расчету этого коэффициента.

3.2.2. Расчет коэффициента отражения радиоволн на границе раздела двух изотропных сред

Рассмотрим отражение плоской линейно поляризованной волны от плоской границы раздела двух изотропных сред (рис. 3.6). Первая среда (воздух) характеризуется материальными параметрами свободного пространства: $\varepsilon_{a1} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_0 = \varepsilon_0$, $\mu_{a1} = \mu_1 \cdot \mu_0 = \mu_0$, $\sigma_1 = 0$. Вторая среда (земля) имеет параметры: $\varepsilon_{a2} = \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_0$, $\mu_{a2} = \mu_0$, $\sigma_2 \neq 0$.

Для учета проводимости второй среды σ_2 и длины волны λ (частоты) обычно вводится понятие комплексной относительной диэлектрической проницаемости [5,6]:

$$\tilde{\varepsilon}_2 = \varepsilon_2 - j60\sigma_2\lambda. \quad (3.10)$$

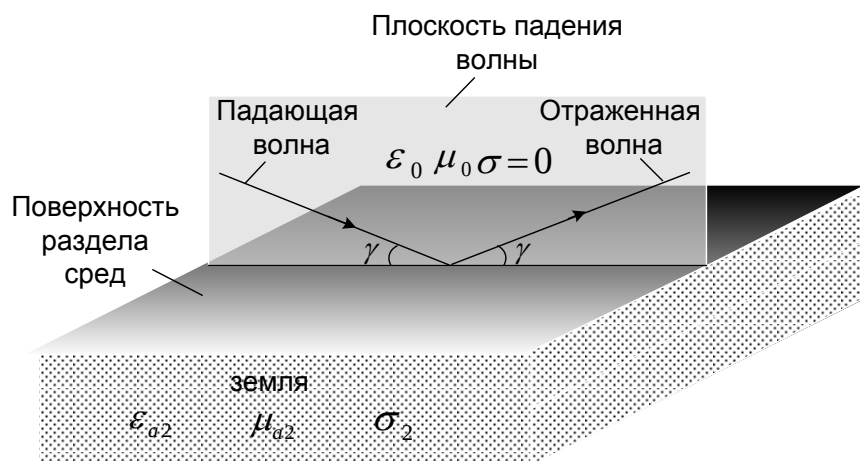


Рис. 3.6

На рис. 3.6. не показана преломленная волна, проникающая во вторую среду. Для реальных типов почвы амплитуда преломленной волны существенно меньше по сравнению с амплитудой волны отраженной. По этой причине преломленную волну в подобных задачах, как правило, не учитывают.

Количественно явление отражения характеризуют комплексным коэффициентом отражения. Об этой величине уже шла речь в предыдущем разделе – это комплексный коэффициент отражения $\tilde{R}$, то есть отношение комплексной амплитуды отраженной волны $\dot{E}_{отр}$ к комплексной амплитуде падающей $\dot{E}_{пад}$:

$$\tilde{R} = \dot{E}_m^{отр} / \dot{E}_m^{пад}. \quad (3.11)$$

Подставляя в последнюю формулу выражения комплексных амплитуд в показательной форме, получим:

$$\tilde{R} = (|\dot{E}_m^{OTP}|e^{j\varphi_{отр}})/(|\dot{E}_m^{ПАД}|e^{j\varphi_{пад}}) = (|\dot{E}_m^{OTP}|/|\dot{E}_m^{ПАД}|)e^{j(\varphi_{отр}-\varphi_{пад})},$$

или

$$\tilde{R} = Re^{j\theta}, \quad (3.12)$$

где $R = |\dot{E}_m^{OTP}|/|\dot{E}_m^{ПАД}|$ — модуль коэффициента отражения, $\theta = \varphi_{отр} - \varphi_{пад}$ — фазовый угол коэффициента отражения. Важно помнить — отраженная волна сохраняет тип поляризации волны падающей.

Вывод расчетных формул для определения коэффициента отражения в настоящем учебном не приводится. В [5,6] показано что касательные и нормальные составляющие векторов полей на поверхности раздела оказываются различными в зависимости от вида поляризации падающей волны. Поэтому формулы для расчета коэффициента отражения при разных поляризациях падающей волны получаются разными. В общем случае падающую волну можно представить в виде суммы двух волн. Одна из этих волн поляризована горизонтально, другая — вертикально.

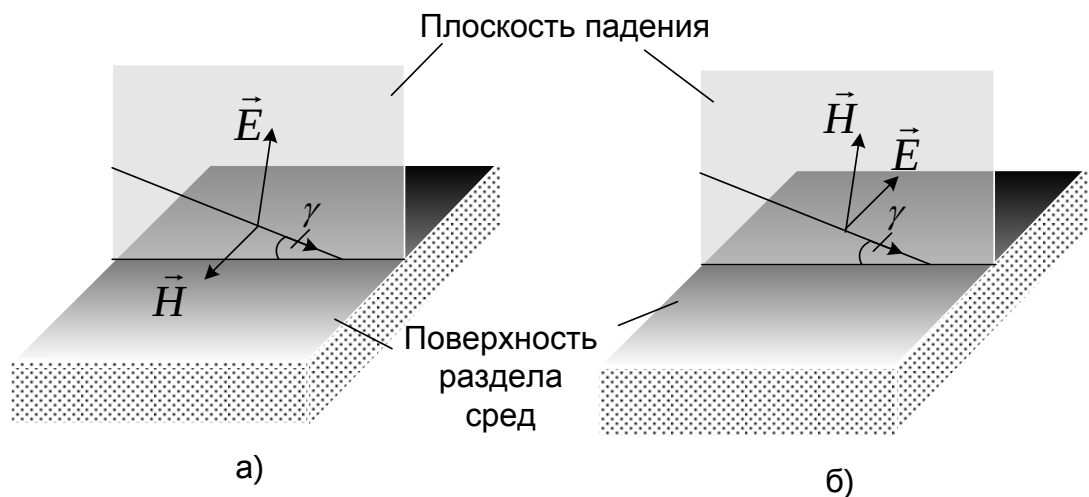


Рис. 3.7

У вертикально поляризованной волны вектор $\vec{E}_{ПАД}$ расположен в плоскости падения (рис. 3.7,а). Вертикально поляризованную волну иногда иначе называют параллельно поляризованной.

У горизонтально поляризованной волны вектор напряженности электрического поля $\vec{E}_{ПАД}$ перпендикулярен плоскости падения волны (рис. 3.7,б). Горизонтально поляризованную волну иногда иначе называют нормально (перпендикулярно) поляризованной.

Выражения для комплексных коэффициентов отражения с учетом обозначения (3.10) имеют вид [6]:

$$\tilde{R}_r = \left(\sin \gamma - \sqrt{\tilde{\varepsilon}_2 - (\cos \gamma)^2} \right) / \left(\sin \gamma + \sqrt{\tilde{\varepsilon}_2 - (\cos \gamma)^2} \right) = R_r e^{j\theta_r}, \quad (3.13)$$

$$\tilde{R}_B = \left(\tilde{\varepsilon}_2 \sin \gamma - \sqrt{\tilde{\varepsilon}_2 - (\cos \gamma)^2} \right) / \left(\tilde{\varepsilon}_2 \sin \gamma + \sqrt{\tilde{\varepsilon}_2 - (\cos \gamma)^2} \right) = R_B e^{j\theta_B}. \quad (3.14)$$

Выражение (3.13) соответствует горизонтально поляризованной волне, выражение (3.14) — вертикально поляризованной.

Обозначим действительную часть $\tilde{R}_r$ или $\tilde{R}_B$ через x , а мнимую — через y . С учетом этих обозначений модули комплексных коэффициентов отражения можно записать в виде:

$$R_{B,r} = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (3.15)$$

Фазу коэффициента отражения в диапазоне углов от 0 до 2π можно рассчитать по формуле:

$$\theta_{B,r} = \arctg(y/x) + F(x, y), \quad (3.16)$$

где:

$$\begin{aligned} F(x, y) &= 0 \text{ при } x \geq 0 \text{ и } y \geq 0, \\ F(x, y) &= \pi \text{ при } x < 0 \text{ и } y \geq 0, \\ F(x, y) &= \pi \text{ при } x < 0 \text{ и } y < 0, \\ F(x, y) &= 2\pi \text{ при } x \geq 0 \text{ и } y < 0. \end{aligned} \quad (3.17)$$

На рис. 3.8 приведены результаты расчета модуля и фазы коэффициента отражения в зависимости от значения угла скольжения γ (рис. 3.7) для случаев вертикальной и горизонтальной поляризации падающей плоской волны. Исходные данные, использованные при расчетах: волна падает из воздуха (1-ая среда с параметрами $\varepsilon_1 = 1$, $\mu_1 = 1$, $\sigma_1 = 0$.); длина волны $\lambda = 3,5$ м; параметры 2-ой среды: $\varepsilon_2 = 3$, $\mu_2 = 1$, $\sigma_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ См/м.

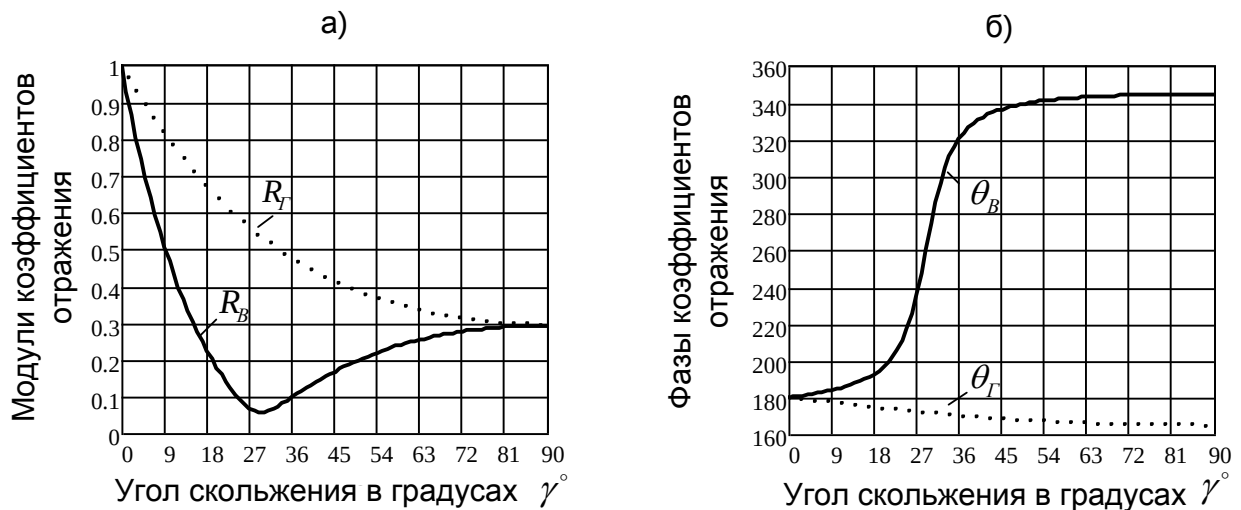


Рис. 3.8

3.2.3. Учет сферичности поверхности Земли

Сферичность земной поверхности необходимо учитывать в тех случаях, когда расстояние между передающей и приемной антеннами r находится в пределах $0,2r_{\text{ПР}} < r < 0,8r_{\text{ПР}}$. Сферичность приводит к заметному расхождению отраженной волны. Рассмотрим рис. 3.9, на котором показана геометрия отражения радиоволн от плоской поверхности (рис. 3.9,а) и выпуклой сферической поверхности (рис. 3.9,б).

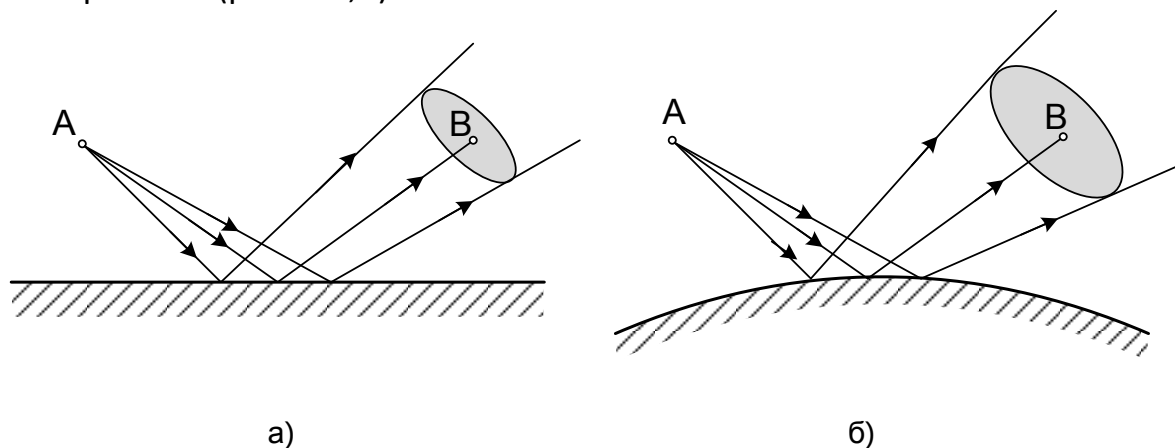


Рис. 3.9

Из точки передачи А в обоих случаях падает пучок волн, заключенных в некотором телесном угле, под одним и тем же углом скольжения. При отражении от плоской поверхности телесный угол, в котором заключены отраженные волны, будет равен телесному углу падающих волн. Сечение телесного угла отображено на рис. 3.9,а затененным эллипсом. При отражении от сферической поверхности телесный угол, заключающий в себе отраженные волны, будет больше телесного угла падающих волн. Сечение телесного угла отображено на рис. 3.9,б также затененным эллипсом.

Расхождение отраженных волн, вызванное сферичностью отражающей поверхности, снижает значение плотности потока энергии отраженных волн и, следовательно, уменьшает значение напряженности поля отраженной волны в точке приема В. Последнее, по существу, означает уменьшение модуля коэффициента отражения.

Для учета этого явления вводят понятие коэффициента расходимости D_p . При высоко поднятых антеннах влияние сферичности земной поверхности учитывают путем уточнения отдельных величин, входящих в формулу (3.7). Расчетные выражения в настоящем пособии не приводятся. Их можно найти, например, в [17].

3.3. Влияние Земли при низко расположенных антеннах

3.3.1. Приближение плоской земной поверхности

В разделе 3.2.1 рассматривался случай $h_1 \gg \lambda$ и $h_2 \gg \lambda$, когда поле в точке приема представлялось в виде суммы полей прямой и отраженной от Земли волн. В данном разделе рассматривается случай, когда обе антенны, как на передаче, так и на приеме, расположены либо на поверхности Земли ($h_1 = 0$ и $h_2 = 0$) рис. 3.10,б, либо на высоте $h_1 \ll \lambda$ и $h_2 \ll \lambda$. Такие высоты наиболее характерны для диапазонов дециметровых, километровых и гектометровых волн. При подобном расположении антенн интерференционная формула (3.7) дает неправильный результат. В самом деле, при $h_1 = 0$ и $h_2 = 0$, значение угла скольжения $\gamma = 0$, а, как следует из формул (3.13) и (3.14), а также из рис. 3.8, $R_{B,\Gamma} = 1$, $\theta_{B,\Gamma} = 180^\circ$. Подставляя эти значения в (3.7), получаем нулевое значения поля в точке приема, что не соответствует действительности. Отсюда следует вывод, что при низко расположенных антеннах земная волна не может быть разделена на волну прямую и волну отраженную. В данном случае существует единая волна, распространяющаяся вдоль поверхности Земли.

Задача расчета амплитуды напряженности поля такой волны, излучаемой вертикальным элементарным электрическим вибратором, решена более 100 лет назад. Решение для амплитудного значения напряженности поля представляется в виде:

$$E_{3M} = E_\infty V_{3M}(\rho), \quad (3.18)$$

где:

E_∞ — амплитуда напряженности поля, создаваемого вертикальным электрическим вибратором над идеально проводящей плоскостью ($\sigma = \infty$);

$V_{3M}(\rho)$ — модуль множителя ослабления, оценивающий, во сколько раз значение напряженности поля над реальной Землей E_{3M} меньше значения напряженности поля над идеально проводящей плоскостью E_∞ при прочих равных условиях.

Формула (3.18), в частности, величина E_∞ , требует некоторых дополнительных пояснений. Прежде всего, рассмотрим простейший случай, когда вертикальный электрический вибратор, расположенный в точке A , находится в свободном пространстве (рис. 3.10,а). Если к нему подвести мощность P , то значение амплитуды напряженности поля E_0 в точке B , удаленной на расстояние r , будет определяться формулой, справедливой для свободного пространства:

$$E_0 = \sqrt{60PG}/r, \quad (3.19)$$

где:

G — коэффициент усиления вибратора;

P – мощность сигнала на входе вибратора.

Далее усложним задачу, расположив этот же вибратор вертикально на идеально проводящей поверхности (рис. 3.10,б). При той же мощности P значение амплитуды поля в точке B , возрастет и будет определяться формулой:

$$E_{\infty} = \sqrt{120PG}/r. \quad (3.20)$$

Рост значения амплитуды напряженности поля объясняется распределением излученной мощности только в верхнее полупространство. В этом случае плотность потока энергии возрастет в 2 раза, а напряженность поля — в $\sqrt{2}$ по сравнению со свободным пространством, то есть $E_{\infty} = \sqrt{2}E_0$.

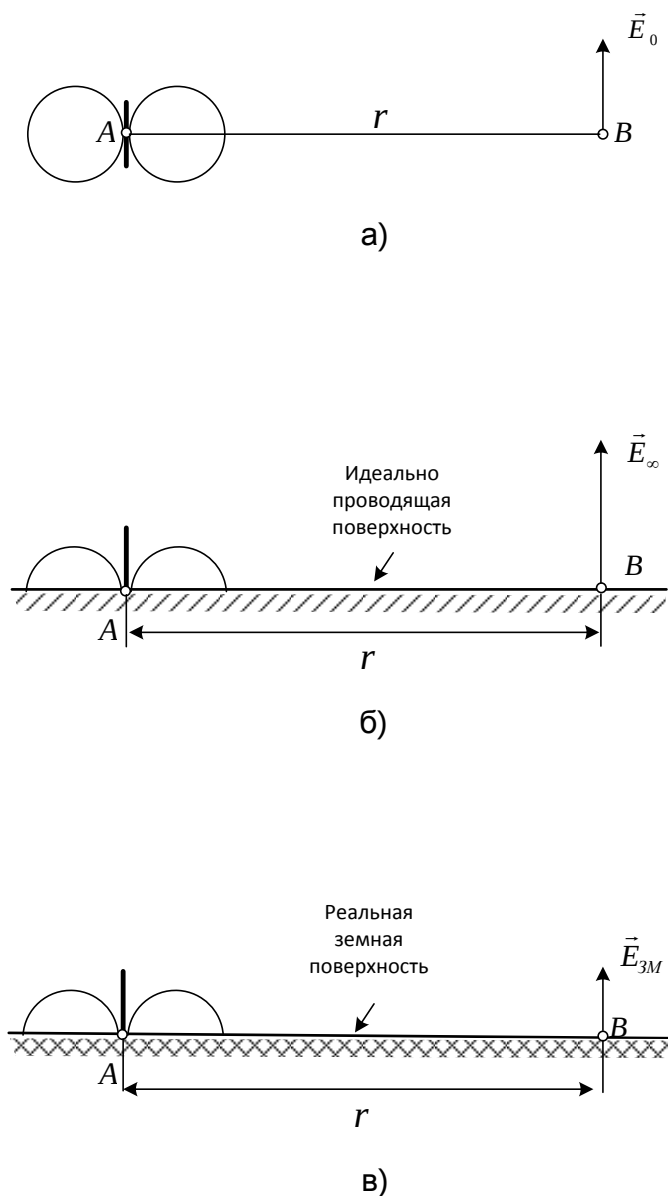


Рис. 3.10

Наконец, рассмотрим вариант расположения вибратора вертикально на реальной земной поверхности (рис. 3.10,в). Приведем без вывода формулу для множителя ослабления $V_{3M}(\rho)$, заимствованную из [2]:

$$V_{3M}(\rho) = \left| 1 - j\sqrt{\pi\rho}e^{-\rho} - 2e^{-\rho}\sqrt{\rho} \int_0^{\sqrt{\rho}} e^{x^2} dx \right|, \quad (3.21)$$

где ρ — параметр, называемый численным расстоянием (безразмерная величина) $\rho \approx \pi r / [\lambda |\tilde{\epsilon}_2|]$;

$\tilde{\epsilon}_2 = \epsilon_2 - j60\sigma_2\lambda$ — комплексная относительная диэлектрическая проницаемость земной поверхности (3.10).

Формулу (3.18), в которой $V_{3M}(\rho)$ определяется через (3.21), принято называть формулой Шулейкина – Ван-дер-Поля. Приближение плоской Земли для применения этой формулы справедливо для расстояний:

$$r < 7 \cdot 10^3 \lambda^{1/3}. \quad (3.22)$$

3.3.2. Структура поля вблизи плоской однородной земной поверхности

Если земная поверхность является идеальным проводником, то вектор напряженности поля, модуль которого определялся формулой (3.20), ориентирован вертикально по отношению к земной поверхности (рис. 3.10,б). Если же земная поверхность не является идеальным проводником, то наблюдается отток электромагнитной энергии радиоволны из атмосферы в толщу Земли, вследствие чего напряженность поля вдоль поверхности раздела непрерывно уменьшается по сравнению с полем над идеально проводящей поверхностью. Строгий анализ показывает, что в действительности вектор электрического поля в каждой точке земной поверхности наклоняется в направлении движения волны (рис. 3.11) и, следовательно, помимо вертикальной составляющей (вектор $\vec{E}_B$) возникает горизонтальная составляющая напряженности поля (вектор $\vec{E}_T$), направленная параллельно земной поверхности. Амплитуда и фаза горизонтальной составляющей определяются электрическими параметрами земной поверхности. Появление горизонтальной составляющей напряженности электрического поля, отличающейся по фазе от вертикальной составляющей, приводит к тому, что результирующее поле оказывается эллиптически поляризованным в вертикальной плоскости. Полупроводящая земная поверхность существенно изменяет структуру вертикально поляризованного поля не только над земной поверхностью, но и в её толще (горизонтальная составляющая в толще земли на рис. 3.11 не показана).

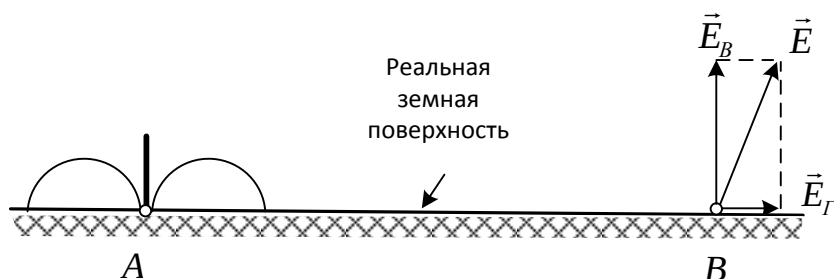


Рис. 3.11

Для большого значения модуля относительной диэлектрической проницаемости Земли выполняется неравенство:

$$|\tilde{\varepsilon}_2| = |\varepsilon_2 - j60\sigma_2\lambda| = \sqrt{\varepsilon_2^2 + (60\sigma_2\lambda)^2} \gg 1. \quad (3.23)$$

Для реальных почв неравенство (3.23) выполняется всегда. При этом, если модуль вертикальной составляющей напряженности электрического поля над земной поверхностью равен E_B , то модуль горизонтальной составляющей E_r , обусловленной конечной проводимостью Земли, определяется соотношением:

$$E_r \approx E_B / |\sqrt{\varepsilon_2 - j60\sigma_2\lambda}|. \quad (3.24)$$

Методика расчета напряженности поля, проникающей внутрь толщи Земли, основана на применении приближенных граничных условий Щукина-Леонтовича [6]. В настоящем учебном пособии эта методика не рассматривается.

3.3.3. Учет сферичности поверхности Земли в случае низко расположенных антенн

При оценке условий распространения вблизи и за линией горизонта, то есть в зонах тени и полутени (см. раздел 3.1.), нельзя пользоваться ни отражательной трактовкой (при $h_1 \gg \lambda$ и $h_2 \gg \lambda$ — см. раздел 3.2.), ни приближением плоской земной поверхности ($h_1 \ll \lambda$ и $h_2 \ll \lambda$ — см. раздел 3.3.1.). Условия распространения земной волны в зонах полутени и тени определяется процессом дифракции волны вокруг выпуклой поверхности полупроводящего земного шара. Строгое решение этой чрезвычайно сложной задачи было получено В.А. Фоком в 1945 г. Однако для инженерной практики применение формул В.А. Фока, как правило, весьма затруднительно. Ассамблея радиосвязи международного союза электросвязи (МСЭ), учитывая сложность расчетов, опубликовала семейство кривых распространения земной волны для ряда типичных значений частот и параметров почвы. Эти кривые и условия их применения можно найти в [7].

4. ВЛИЯНИЕ ТРОПОСФЕРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

4.1. Рефракция радиоволн

Как уже отмечалось в разделе 1.2, тропосфера – это самая нижняя по высоте область атмосферы, простирающаяся до 10...15 км. Несмотря на сравнительно небольшой слой по сравнению с атмосферой, в тропосфере сосредоточена основная масса всей атмосферы (около 80%) и почти вся масса водяных паров. Кроме того, в тропосфере могут наблюдаться различного рода гидрометеоры (туман, дождь, снег, град), а также частицы пыли, поднятые воздушными течениями с поверхности Земли.

Специфика распространения радиоволн в тропосфере Земли, как и в любой естественной среде, определяется пространственно-временным распределением значений материальных параметров этой среды. Для тропосферы такими параметрами являются: $\varepsilon_A^T = \varepsilon^T \varepsilon_0$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость, $\mu_A^T = \mu^T \mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость и σ^T – удельная проводимость. В практике исследования распространения радиоволн в тропосфере μ^T и σ^T обычно считают константами: $\mu^T = 1$, $\sigma^T = 0$. Таким образом, параметром тропосферы, зависящим от координат пространства и времени, является относительная диэлектрическая проницаемость ε^T . Известно [6], что относительная диэлектрическая проницаемость среды связана с её коэффициентом преломления n^T простым соотношением, которое с учетом введенного обозначения ε^T будет иметь вид:

$$n^T = \sqrt{\varepsilon^T}. \quad (4.1)$$

Значения n^T весьма мало отличаются от единицы и даже у поверхности Земли в разных метеорологических условиях лежат в пределах 1,00024...1,00046. Оперировать такими значениями не всегда удобно, поэтому часто вводят так называемый приведенный коэффициент преломления тропосферы N^T , связанный с n^T соотношением:

$$N^T \equiv (n^T - 1) \cdot 10^6. \quad (4.2)$$

Приведенный коэффициент преломления в средних широтах у земной поверхности в зависимости от метеорологических условий принимает значения 240...460. В научной и учебной литературе приведенный коэффициент преломления часто называют иначе – индекс преломления или индекс рефракции.

В большинстве случаев зависимость относительной диэлектрической проницаемости тропосферы от высоты точки наблюдения над земной поверхностью $\varepsilon^T(h)$ близка к экспоненциальной:

$$\varepsilon^T(h) = \Delta \varepsilon_{h=0}^T \exp(g^T h / \Delta \varepsilon_0), \quad (4.3)$$

где:

$\Delta \varepsilon_{h=0}^T$ – приземное ($h = 0$) отклонение значения ε^T от единицы:

g^T – вертикальный градиент диэлектрической проницаемости тропосферы у земной поверхности:

$$g^T = d\varepsilon^T(h)/dh. \quad (4.4)$$

Существует понятие «стандартная радиоатмосфера», которая характеризует среднестатистическое, наиболее вероятное состояние тропосферы в умеренных климатических условиях. Для стандартной радиоатмосферы вертикальный градиент диэлектрической проницаемости $g^T = -7,85 \cdot 10^{-8} \text{ 1/м}$, а $\Delta\varepsilon_{h=0}^T = 5,78 \cdot 10^{-4} \text{ Ф/м}$. Реальные значения g^T и $\Delta\varepsilon_{h=0}^T$ претерпевают сезонные изменения и различны для разных климатических условий.

Прямым следствием плавного изменения диэлектрической проницаемости тропосферы (формула (4.3)) является плавное искривление траектории распространения радиоволны — явление рефракции.

Рассмотрим механизм возникновения рефракции, полагая, что значение относительной диэлектрической проницаемости тропосферы определяется формулой (4.3). Для этого разобьем условно всю толщу тропосферы по высоте на большое число сферических, концентричных земной поверхности слоев (рис. 4.1), таких, чтобы в пределах каждого диэлектрическая проницаемость могла рассматриваться как постоянная величина (при этом для первого слоя справедливо $\varepsilon_1^T = \Delta\varepsilon_{h=0}^T$). Тогда в каждом слое траектория волны будет прямолинейной, а при переходе от слоя к слою происходит её преломление. Если число слоев разбиения устремить к бесконечности, то траектория волны превращается в плавную кривую. Кривизна траектории зависит от значения вертикального градиента диэлектрической проницаемости с увеличением высоты над Землей. При этом, если $g^T < 0$, то траектория распространения вдоль земной поверхности обращена выпуклостью вверх, если $g^T > 0$, то траектория обращена выпуклостью вниз. В соответствии с этим различают три вида тропосферной рефракции: положительная рефракция, когда $g^T < 0$ (рис. 4.2а), нулевая рефракция — $g^T = 0$ (рис. 4.2б), отрицательная рефракция — $g^T > 0$ (рис. 4.2в).

Чаще всего на практике приходится встречаться с положительной рефракцией. При этом различают несколько видов положительной рефракции: стандартная рефракция при $g^T = -7,85 \cdot 10^{-8} \text{ 1/м}$ (рис. 4.3а), повышенная рефракция при $g^T < -7,85 \cdot 10^{-8} \text{ 1/м}$ (рис. 4.3б), критическая рефракция при $g^T = -31,4 \cdot 10^{-8} \text{ 1/м}$, когда траектория распространения радиоволны параллельна земной поверхности (рис. 4.3в), сверхрефракция, или волноводная рефракция, при $g^T < -31,4 \cdot 10^{-8} \text{ 1/м}$, когда волна за счет рефракции падает на поверхность земли и отражается от неё, а далее вновь искривляется и вновь падает на поверхность земли (рис. 4.3г).

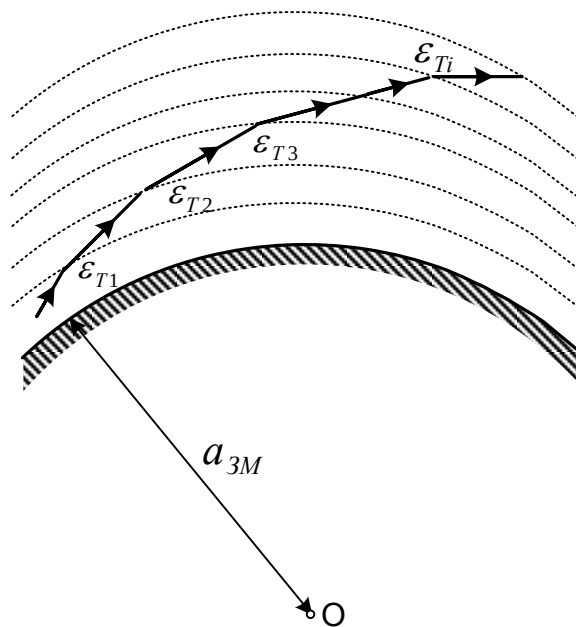
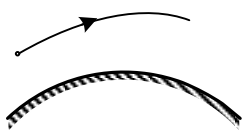


Рис. 4.1

Положительная
рефракция

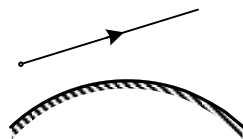
$$g^T < 0$$



а)

Нулевая
рефракция

$$g^T = 0$$



б)

Отрицательная
рефракция

$$g^T > 0$$



в)

Рис. 4.2



Рис. 4.3

Чтобы учесть рефракцию в тропосфере при расчетах напряженности поля в областях освещенности, тени и полутени (см. раздел 3.1 и раздел 3.2) вместо истинного радиуса Земли a_{3M} вводят эквивалентный радиус $a_{\text{э}}$:

$$a_{\text{э}} = a_{3M} / (1 + a_{3M} \cdot g^T / 2). \quad (4.5)$$

С учетом рефракции эквивалентное предельное расстояние прямой видимости $r_{\text{ПРЭ}}$, можно определить из формулы (3.1), заменив a_{3M} на $a_{\text{э}}$:

$$r_{\text{ПРЭ}} = \sqrt{2a_{\text{э}}}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}). \quad (4.6)$$

Следует обратить внимание на то, что в случае учета рефракции сами понятия областей освещенности, тени и полутени становятся условными. Точка приема, находящаяся при определенном значении g^T , например, в области полутени, при других значениях g^T может оказаться или в области освещенности или в области тени. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчетах.

4.2. Ослабление радиоволн в осадках и газах

4.2.1. Ослабление в осадках

Радиоволны при распространении в тропосфере могут проходить сквозь осадки: дождь, град, снег, туман, которые иначе называют гидрометеорами. Они являются причиной дополнительных потерь передачи (дополнительного ослабления) при распространении радиоволн, а, следовательно, и уменьшения напряженности поля в точке приема. Опыт эксплуатации радиосистем передачи показал, что ослабление сигнала в осадках начинает сказываться на частотах $f > 6$ ГГц ($\lambda < 5$ см) и особенно существенно на частотах $f > 10$ ГГц. При этом основное значение имеет ослабление в дожде, а также в тумане и в облаках.

В разделе 3.2.1 уже вводилось понятие множителя ослабления $\tilde{V}$. Напомним, что для некоторой точки радиотрассы этот множитель определяется отношением комплексной амплитуды напряженности поля при распространении радиоволны в реальных условиях к комплексной амплитуде напряженности поля в этой же точке при распространении в свободном пространстве. Если тем или иным способом определен модуль множителя ослабления $V = |\tilde{V}|$, то амплитуда напряженности поля вычисляется по формуле:

$$E = (\sqrt{60PG}/r) \cdot V, \text{ В/м}, \quad (4.7)$$

где:

P – мощность на входе антенны в ваттах;

G – коэффициент усиления передающей антенны (величина безразмерная);

r – расстояние между точкой передачи и точкой приема (длина радиолинии) в метрах;

V – модуль множителя ослабления (величина безразмерная).

Ослабление в дожде. Множитель ослабления радиоволны, распространяющейся в дожде, имеет вид:

$$V_D = 10^{-\frac{\gamma_D l_D}{20}}, \quad (4.8)$$

где:

γ_D – погонное ослабление радиоволны в дожде в децибелах на километр (дБ/км);

l_D – длина трассы дождя, то есть часть длины трассы радиолинии, проходящая на зону дождя, в километрах.

Таким образом, если радиоволна проходит в тропосфере путь r и из этого пути на зону дождя приходится отрезок l_D , то напряженность поля с учетом (4.7) и (4.8) можно рассчитать по формуле:

$$E = (\sqrt{60PG}/r) \cdot 10^{-\frac{\gamma_D l_D}{20}}, \text{ В/м}. \quad (4.9)$$

Во втором множителе произведение $\gamma_D l_D$, стоящее в числителе показателя степени, имеет четкий физический смысл – это дополнительные потери при передаче из-за дождя, выраженные в децибелах:

$$L_D = \gamma_D l_D, \text{ дБ.} \quad (4.10)$$

Процедура расчета погонного ослабления приведена в [8]. Соотношение между погонным ослаблением γ_D (дБ/км) и интенсивностью дождя I_D (мм/ч) описывается степенной функцией:

$$\gamma_D = k I_D^\alpha. \quad (4.11)$$

Значения коэффициентов k и α являются сложными функциями частоты и зависят от вида поляризации радиоволны. Эти значения для частот от 1 ГГц до 1000 ГГц можно найти в [8]. Усредненные значения указанных коэффициентов для частот 10 ...40 ГГц приведены в табл. 4.1.

Табл. 4.1

Коэффициенты для оценки погонного ослабления в дожде
с использованием уравнения (4.11)

f , ГГц	k	α	f , ГГц	k	α
10	0,012	1,209	26	0,17	0,967
12	0,024	1,161	28	0,200	0,952
14	0,039	1,109	30	0,235	0,930
16	0,056	1,064	32	0,271	0,915
18	0,074	1,042	34	0,31	0,898
20	0,094	1,018	36	0,350	0,884
22	0,116	1,003	38	0,392	0,869
24	0,142	0,979	40	0,435	0,865

При использовании формулы (4.9) остается открытым вопрос количественной оценки значения l_D . Дело в том, что распределение интенсивности дождя, как вдоль поверхности Земли, так и по вертикали, отличается существенной неравномерностью. В этой связи вводят понятие эффективной длины трассы $r_{ЭД}$ [9], а дополнительные потери из-за дождя, выраженные в децибелах, рассчитываются по формуле:

$$L_D = \gamma_D r_{ЭД}. \quad (4.12)$$

Эффективная длина трассы радиолинии вычисляется путем умножения длины трассы r на коэффициент дальности k_r . Таким образом, можно записать:

$$l_D = r_{ЭД} = k_r r. \quad (4.13)$$

В [9] приведена формула для коэффициента дальности в виде функции двух аргументов – протяженности трассы r и интенсивности дождя I_D :

$$k_r = 1/(1 + 0,02857re^{0,015I_D}). \quad (4.14)$$

Значения функции, рассчитанные по формуле (4.14) при различных значениях длины радиолинии и интенсивности дождя приведены в табл. 4.2.

Табл. 4.2

I_D , мм/час	Длина радиотрассы r , км						
	10	15	20	25	30	35	40
10	0,751	0,668	0,601	0,546	0,501	0,463	0,430
20	0,722	0,634	0,565	0,509	0,464	0,426	0,393
30	0,691	0,598	0,527	0,472	0,427	0,389	0,358
40	0,658	0,562	0,490	0,434	0,390	0,354	0,324

Ослабление в тумане. Следующим по своему значению фактором ослабления радиоволн является туман. В соответствии с [10], погонное ослабление в тумане можно записать как:

$$\gamma_T = k_T M_T, \text{ дБ/км}, \quad (4.15)$$

где:

γ_T – погонное ослабление в тумане (дБ/км);

k_T – коэффициент погонного ослабления (дБ/км)/(г/м³);

M_T – плотность жидкой воды в тумане, иначе называемая водностью тумана (г/м³),.

Плотность жидкой воды в тумане составляет около 0,05 г/м³ при среднем тумане (оптическая видимость 300 м) и 0,5 г/м³ воды при густом тумане (оптическая видимость 50 м). Плотность жидкой воды в туманах в среднем оценивается значением 0,25 г/м³.

Для вычисления значений k_T в [10] приведена математическая модель диэлектрической проницаемости воды, на основании которой выполнены расчеты k_T на частотах от 5 до 200 ГГц и при температурах между –8°С и 20°С.

В табл. 4.3 приведены значения k_T на частотах от 10 до 40 ГГц при температуре –8°С. При этой температуре коэффициент погонного ослабления k_T принимает максимальные значения. В этой же таблице приводятся значения погонного ослабления в тумане γ_T при среднем значении плотности жидкой воды в тумане $M_T = 0,25$ г/м³.

Табл. 4.3

Коэффициент для оценки погонного ослабления в тумане (k_T) и погонное ослабление в тумане (γ_T)

f , ГГц	k_T , $\frac{(\text{дБ/км})}{\text{г/м}^3}$	γ_T , дБ/км	f , ГГц	k_T , $\frac{(\text{дБ/км})}{\text{г/м}^3}$	γ_T , дБ/км
10	0,12	0,030	26	0,730	0,180
12	0,19	0,048	28	0,830	0,208
14	0,260	0,065	30	0,940	0,235
16	0,320	0,080	32	1,060	0,250
18	0,390	0,098	34	1,190	0,296
20	0,470	0,118	36	1,320	0,330
22	0,550	0,140	38	1,460	0,365
24	0,640	0,160	40	1,600	0,400

Вероятность появления туманов в равнинной местности в холодное время года равна 0,03...0,05, а в теплое время 0,006...0,02. Приземные туманы могут захватывать большие районы, при этом горизонтальные размеры таких туманов могут лежать в пределах нескольких сот километров, а вертикальные от 300 м до 2,3 км.

На наземных линиях радиосвязи путь, проходимый волной в тумане (l_T) примерно равняется длине трассы радиолинии (r). На линиях спутниковой связи Земля – космос или космос – Земля этот путь зависит от угла возвышения траектории Δ относительно горизонта и вертикального размера тумана h_T :

$$r_T(\Delta) = h_T(1/\sin \Delta), \quad (4.16)$$

где $h_T \approx 0,3 \dots 2,3$ км.

Ослабление в облачности. Его оценка достаточно сложна и не рассматривается в рамках настоящего учебного пособия, поэтому ограничимся лишь общими сведениями.

Согласно [10], для получения с заданной вероятностью значения ослабления из-за облачности следует знать статистику общего столбчатого объема жидкой воды L_{OB} (кг/м²), или, что то же самое, количество в миллиметрах влагосодержания для данного места расположения. Годовые значения общего столбчатого объема жидкой воды L_{OB} (кг/м²), содержащейся в облаках, превышаемые на 0,1 99% относительно среднегодовых значений, доступны в форме цифровых карт, размещенных на веб-сайте 3-ей Исследовательской комиссии по радиосвязи МСЭ.

На наземных линиях радиосвязи путь, проходимый волной в облаках ($l_{об}$), примерно равняется длине трассы радиолинии (r). На линиях спутниковой связи Земля – космос или космос – Земля этот путь зависит от угла возвышения траектории Δ относительно горизонта и вертикального размера облаков $h_{об}$:

$$r_{об}(\Delta) = h_{об}(1/\sin \Delta), \quad (4.17)$$

где $h_{об} \leq 10$ км.

Ослабление в граде. Ослабление в граде составляет лишь несколько процентов ослабления в дожде той же интенсивности. Если интенсивность не чрезмерно велика, то ослаблением в граде можно пренебречь.

Ослабление в снеге. Ослабление в снеге весьма мало, если снег сухой. Ослабление, вызываемое мокрым снегом, примерно такое же, как в дожде той же интенсивности, однако в отдельных случаях при выпадении крупных хлопьев мокрого снега оно может оказаться большим, чем в дожде. Учитывая, что это явление наблюдается достаточно редко, оно при проектировании линий радиосвязи практически не учитывается.

4.2.2. Ослабление в газах

При распространении радиоволн в тропосфере, наряду с потерями при передаче в свободном пространстве (см. раздел 2), потерями в осадках (см. раздел 4.3.2), имеют место потери при передаче за счет поглощения энергии в газах. Установлено, что основное ослабление поля определяется кислородом и водяным паром.

Процедура расчета погонного ослабления в атмосферных газах приведена в [11]. Там же имеются рассчитанные зависимости погонного ослабления в кислороде — γ_{O_2} , дБ/км и в водяных парах — γ_{H_2O} , дБ/км от частоты в диапазоне от 1 до 1000 ГГц при средних метеорологических условиях.

На рис. 4.4 показаны результаты расчета погонных ослаблений для диапазона от 10 до 100 ГГц. Из рисунка видно, что в этом диапазоне водяной пар имеет полосу поглощения с центром вблизи частоты 22 ГГц, а кислород — вблизи 60 ГГц. Если бы на рис. 4.4 были представлены погонные ослабления для частот $f > 100$ ГГц, то у водяных паров можно увидеть ещё две полосы поглощения с центрами вблизи 183 и 320 ГГц, а у кислорода — вблизи 120 кГц.

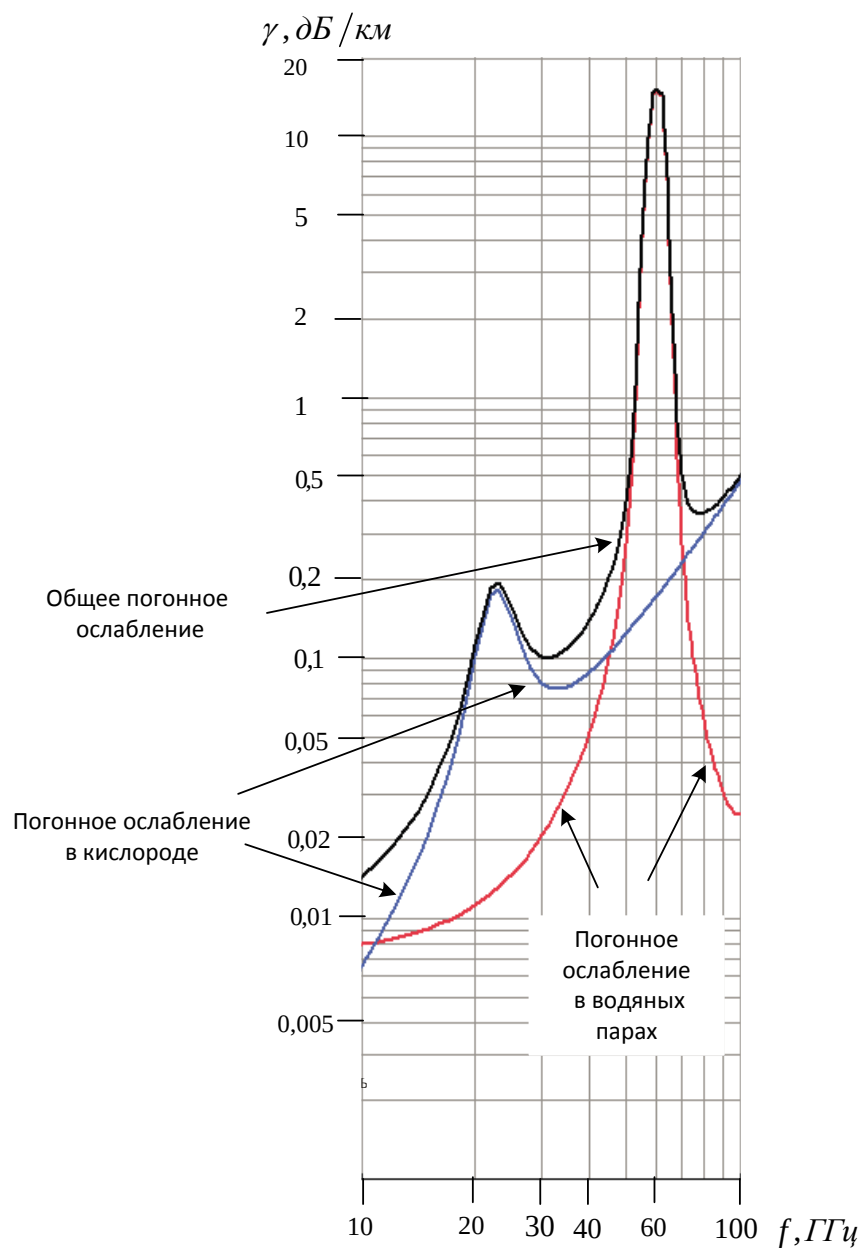


Рис. 4.4

В табл. 4.4 приведены значения погонных ослаблений γ_{O_2} , γ_{H_2O} и общее погонное ослабление $\gamma_{\Sigma} = \gamma_{O_2} + \gamma_{H_2O}$ в диапазоне частот от 10 до 40 ГГц.

Дополнительные потери при передаче, обусловленные кислородом и водяным паром, обычно выражаются в децибелах:

$$L_r = \gamma_{H_2O} l_{H_2O} + \gamma_{O_2} l_{O_2}, \text{ дБ}, \quad (4.18)$$

где:

γ_{O_2} и γ_{H_2O} — погонные ослабления в дБ/км вблизи поверхности Земли, соответственно, для кислорода и водяного пара;

l_{H_2O} и l_{O_2} — эффективные длины трасс для водяного пара и кислорода, соответственно.

Табл. 4.4

Погонные ослабления в кислороде (γ_{O_2}), водяных парах (γ_{H_2O}) и общее (γ_{Σ}) в дБ/км

$f, \text{ГГц}$	γ_{O_2}	γ_{H_2O}	γ_{Σ}	$f, \text{ГГц}$	γ_{O_2}	γ_{H_2O}	γ_{Σ}
10	0,0070	0,007	0,014	26	0,014	0,113	0,127
12	0,0075	0,011	0,0185	28	0,016	0,089	0,105
14	0,0080	0,017	0,025	30	0,018	0,080	0,098
16	0,0087	0,027	0,036	32	0,021	0,077	0,098
18	0,0094	0,050	0,0594	34	0,025	0,079	0,104
20	0,010	0,101	0,111	36	0,029	0,082	0,111
22	0,011	0,177	0,188	38	0,036	0,087	0,123
24	0,013	0,161	0,174	40	0,044	0,093	0,137

Степень общего ослабления электромагнитного поля радиоволны в газах оценивают множителем:

$$V_r = 10^{-\frac{L_r}{20}}. \quad (4.19)$$

В формуле (4.19) значение L_r должно выражаться в дБ.

Таким образом, если радиоволна проходит в тропосфере путь r , то амплитуду напряженности поля можно рассчитать по формуле:

$$E = (\sqrt{60PG}/r)V_r, \text{ В/м}. \quad (4.20)$$

На наземных линиях радиосвязи $l_{H_2O} \approx l_{O_2} \approx r$, где r — геометрическая длина трассы. На линиях спутниковой связи «Земля — космос» или «космос — Земля» радиотрасса проходит через всю толщу тропосферы. На такой трассе распределение кислорода и водяных паров изменяется по высоте. Кроме того, космический аппарат перемещается относительно земной станции. В итоге длина радиотрассы изменяется в зависимости от угла возвышения её траектории Δ относительно горизонта. Представление о значениях потерь передачи на различных частотах при разных углах Δ , справедливые для

спокойной тропосферы (без дождя), когда волна проходит всю её толщу, можно получить из табл. 4.5.

Табл.4.5

Потери передачи на радиолинии,
проходящей через толщу спокойной тропосферы

f , ГГц	Потери передачи (ослабление) в дБ		
	$\Delta = 90^\circ$	$\Delta = 30^\circ$	$\Delta = 3^\circ$
10	0,08	0,9	1,2
20	0,5	1,3	9,0
40	0,55	3,0	20

4.3. Рассеяние радиоволн

В разделе 4.1 отмечалось, что в большинстве случаев зависимость относительной диэлектрической проницаемости тропосферы от высоты точки наблюдения над земной поверхностью $\varepsilon^T(h)$ близка к экспоненциальной (см. формулу (4.1)). Однако эта зависимость не отражает микроструктуры тропосферы, в которой непрерывно происходят сложные турбулентные (вихревые) процессы движения воздушных масс. Вихревое движение порождает в тропосфере возникновение локальных неоднородностей относительной диэлектрической проницаемости. Такие неоднородности представляют собой небольшие объемы воздуха с отличающимися значениями диэлектрической проницаемости. Мгновенная картина распределения неоднородностей в тропосфере схематически показана на рис. 4.5,а.

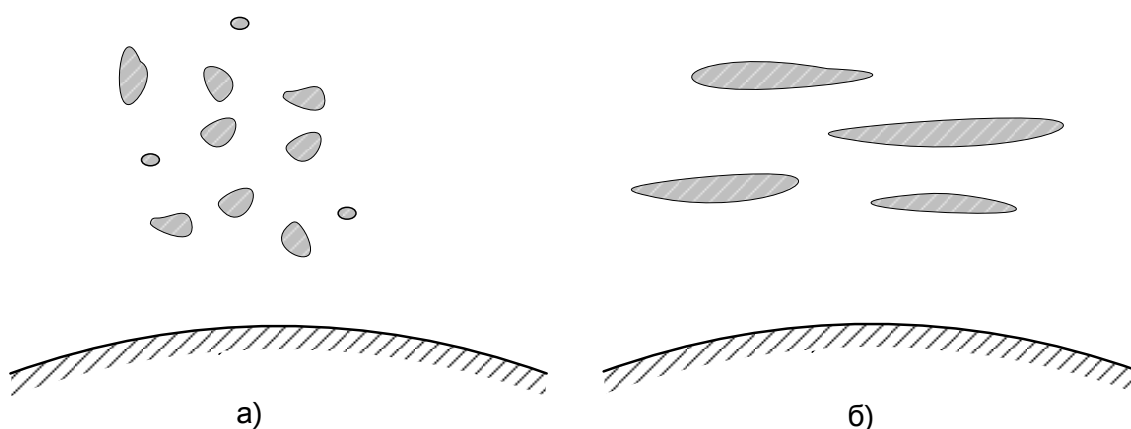


Рис. 4.5

Помимо неоднородностей вихревого характера, в тропосфере существуют слоистые неоднородности, вызываемые формированием в тропосфере

инверсных слоев, образованием облаков, метеорологическими фронтами и другими процессами. Такого рода неоднородности слоистого характера схематически показаны на рис. 4.5,б. В реальных условиях вихревые и слоистые неоднородности существуют одновременно и в своей совокупности делают тропосферу с точки зрения распределения диэлектрической проницаемости, следовательно, и коэффициента преломления (4.1), средой оптически неоднородной. Важно отметить, что при любой погоде и при любых условиях всегда имеют место неоднородности тропосферы. Они могут быть более сильно или менее сильно выражены, но они существуют при всех условиях. Это обстоятельство стало ключевым для объяснения механизма распространения радиоволн диапазонов ОВЧ, УВЧ и СВЧ на расстояния, которые значительно превышают предельное расстояние прямой видимости даже с учетом рефракции. Факты подобного распространения были впервые зафиксированы экспериментально в середине прошлого века.

Как вихревые, так и слоистые неоднородности являются источниками рассеяния радиоволн. Процессом рассеяния называют процесс переизлучения электромагнитного поля в неоднородной среде по направлениям, отличным от направления распространения первичного поля. В зависимости от свойств неоднородностей различают два вида рассеяния: некогерентное и когерентное.

Локальные вихревые неоднородности хаотически перемещаются в тропосфере. В этом случае фазы электромагнитных полей, рассеянных отдельными неоднородностями, меняются во времени по случайным независимым законам. Такое рассеяние называют некогерентным.

Слоистые неоднородности формируют поля, изменяющиеся по детерминированному (неслучайному) закону. Такое рассеяние называют когерентным.

Распространение радиоволн в тропосфере на расстояния, превышающие предельное расстояние прямой видимости, называют дальним тропосферным распространением радиоволн (ДТР). Механизм подобного распространения радиоволн обусловлен, в первую очередь, рассеянием радиоволн на неоднородностях коэффициента преломления воздуха. Подобные неоднородности всегда существуют в области тропосферы, нижняя граница которой ограничивается плоскостями, касательными к Земле в точках вблизи расположения передатчика и приемника (рис. 4.6).

Реальное поле ДТР формируется в результате как когерентного, так и некогерентного рассеяний. Результирующее поле подвержено замираниям (флуктуациям) во времени и в пространстве (см. раздел 7). Распределение амплитуд поля носит характер сложного нестационарного случайного процесса. На радиолиниях ДТР используется диапазон частот от 0,4 до 15 ГГц. Реализуемая длина таких линий до 700 км. Первые линии ДТР применялись в тех случаях, когда строительство радиорелейных линий с интервалами прямой

видимости по тем или иным причинам (экономического или технического характера) было нецелесообразно или невозможно: при необходимости преодолеть протяженные водные препятствия, в малозаселенной необжитой местности и т.д.

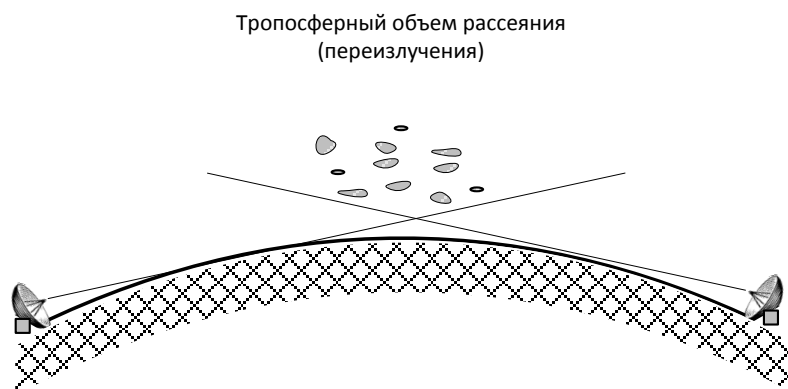


Рис. 4.6

Интенсивное внедрение спутниковых систем связи резко снизило интерес к стационарным радиолиниям ДТР. Однако создание мобильных тропосферных систем для работы на интервалах, не имеющих прямой видимости, протяженностью до 100-150 км представляется и сегодня одним из перспективных для ведомственных сетей связи [14,15]. Обычно приемопередающее оборудование, включая антенны, размещается на передвижной платформе, например, на мощном грузовом автомобиле. Оптимальный диапазон частот для мобильных тропосферных радиолиний лежит в пределах 2...5 ГГц. Большинство выпускаемых мобильных станций тропосферной связи работают в диапазоне 4...5 ГГц.

Энергетический расчет радиолиний ДТР (называемых в последнее время загоризонтными) базируется в основном на статистически обобщенных результатах измерений [14]. Расчет достаточно сложен и не рассматривается в рамках настоящего учебного пособия.

5. ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

5.1. Строение ионосферы

Как уже отмечалось в разделе 1.2, ионосфера – это верхняя область атмосферы, находящаяся на высоте приблизительно от 80 до 1000 км. В ионосфере под действием облучения космическими лучами, идущими, в первую очередь, от Солнца, происходит расщепление молекул кислорода и азота на атомы. Кроме того, действует процесс ионизации атомов – отрыв одного или нескольких электронов от атома. В результате ионизации в области ионосферы образуется большое число свободных заряженных частиц – электронов и ионов. Таким образом, ионосфера состоит из смеси газа нейтральных молекул (в основном азота и кислорода) и плазмы – смеси заряженных частиц, несущих отрицательный или положительный заряд. Носителями отрицательных зарядов являются электроны и отрицательные ионы. Носителями положительного заряда являются положительные ионы. В целом ионосферную плазму на любой высоте можно считать электрически нейтральной. Наряду с ионизацией происходит и обратный процесс исчезновения свободных электронов и положительных ионов вследствие их воссоединения (рекомбинации). Чем медленнее происходит рекомбинация, тем большее число свободных электронов в единице объема. Число N^3 свободных электронов в единице объема носит название электронной плотности (электронной концентрации). Специфика распространения радиоволн в ионосфере определяется в основном распределением электронной плотности по высоте.

Экспериментальное изучение ионосферы позволило выявить характерные области повышенной электронной плотности, называемые иногда ионосферными слоями. Ионосферные слои принято обозначать буквами: D, E, F_1, F_2 . Эти слои являются регулярными. Слои F_1 и F_2 иногда рассматриваются как единый слой – F . В областях E и F спонтанно могут образоваться локальные области повышенной плотности электронов, которые принято называть спорадическими слоями.

Распределение электронной плотности по высоте зависит от ряда факторов: времени суток (день, ночь), времени года, 11-летнего периода солнечной активности, географических координат. Картины усредненного распределения электронной плотности по высоте, характерные для дневного и ночного времени, изображены на рис. 5.1.

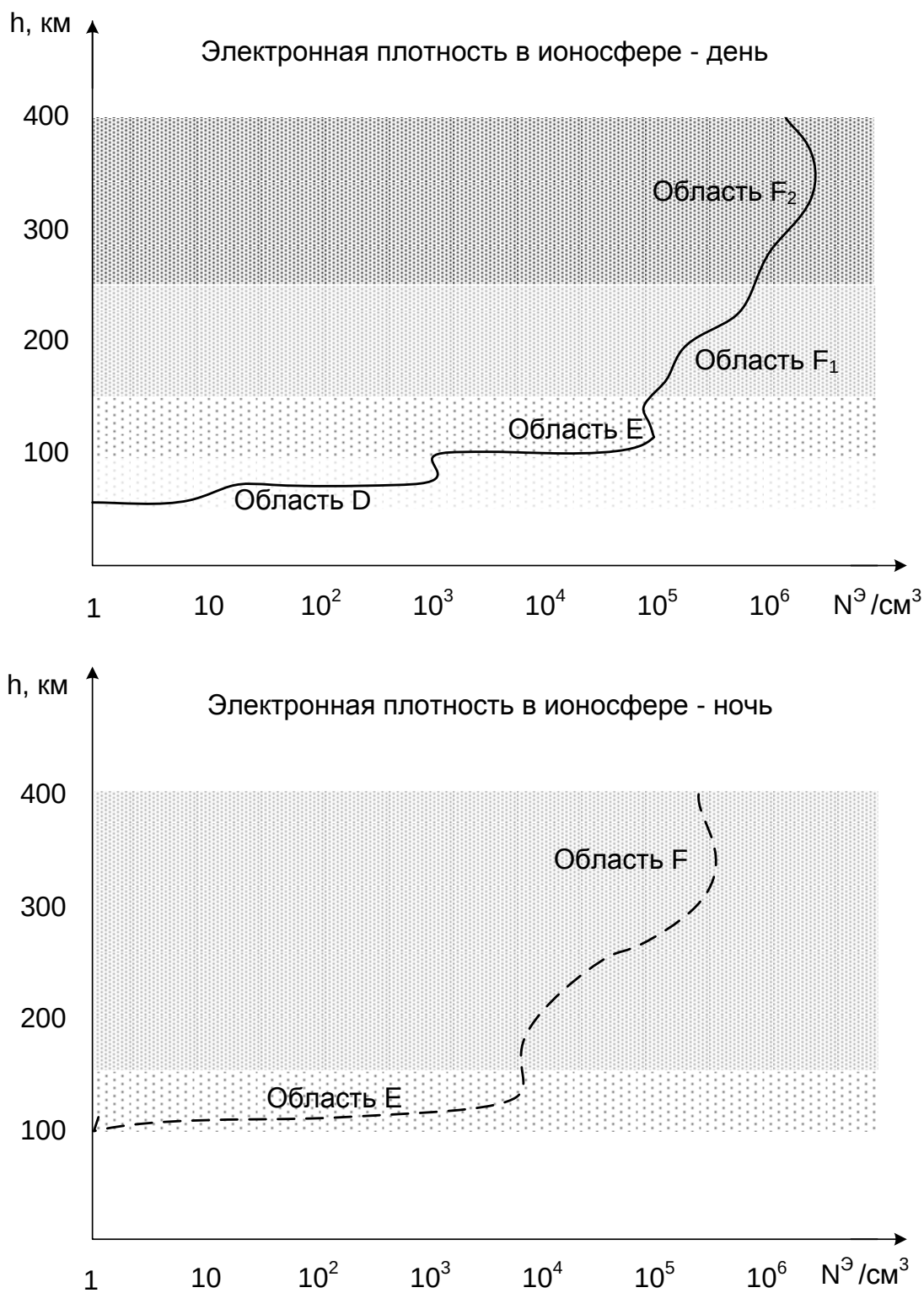


Рис. 5.1

Каждый слой не имеет определенно выраженных верхних и нижних границ. Принято определять границу и полутолщину z слоя – расстояния от нижней границы до максимума электронной плотности. В табл. 5.1 приведены данные для регулярных слоев ионосферы. Для максимальной электронной

плотности приведены два значения наибольшее, наблюдаемое в дневное время, и наименьшее – в ночное время. Также в таблице приведено значение среднего числа столкновений электронов с нейтральными молекулами ионосферы – ν . От значения ν зависит проводимость ионосферы, а, следовательно, ослабление радиоволн.

Табл. 5.1

Ионосферные слои

Слой	Высота нижней границы слоя h , км	Полу–толщина слоя z , км	Максимальная электронная плотность в слое $N^{\text{э}}, 1/\text{м}^3$		Число столкновений электронов ν , 1/с
			День	Ночь	
D	50...60	–	$8 \cdot 10^9$	0	10^7
E	100...120	15...20	$2 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^9$	10^5
F_1	160...180	20...100	$4 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^9$	10^4
F_2	200...250	50...300	$2 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{11}$	10^3

В ночные часы за счет процессов рекомбинации электронов и положительных ионов слои D и F_1 исчезают и остаются только слои E и F (точнее F_2), но их электронная плотность существенно уменьшается.

Компьютерное моделирование ионосферы осуществляется с помощью сложной программы, которая основана на физических законах, определяющих распределение характеристик плазмы в пространстве. В модели также используется статистическое усреднение большого количества измерений, выполненных с помощью ионосферных станций, геофизических ракет, космических аппаратов.

5.2. Диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость ионосферы

Специфика распространения радиоволн в ионосфере, как и в любой естественной среде, определяется значениями макроскопических параметров этой среды. Для ионосферы такими параметрами являются:

- абсолютная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_A^{\text{и}} = \varepsilon^{\text{и}} \varepsilon_0$; (5.1)

- абсолютная магнитная проницаемость $\mu_A^{\text{и}} = \mu^{\text{и}} \mu_0$; (5.2)

- удельная проводимость $\sigma^{\text{и}}$.

В выражении (5.1) величина $\varepsilon^И$ – относительная диэлектрическая проницаемость ионосферы, ε_0 – диэлектрическая постоянная. В выражении (5.2) величина $\mu^И$ – относительная магнитная проницаемость ионосферы, μ_0 – магнитная постоянная. В практике исследования распространения радиоволн в ионосфере считают $\mu^И = 1$. Таким образом, параметрами ионосферы, влияющими на распространение радиоволн, являются $\varepsilon^И$ и $\sigma^И$.

В настоящем учебном пособии выражения для $\varepsilon^И$ и $\sigma^И$ приведем без вывода (с выводом можно познакомиться в [2]):

$$\varepsilon^И = 1 - (3190 \cdot N^3) / (\nu^2 + \omega^2), \quad (5.3)$$

$$\sigma^И = 2,82 \cdot 10^{-8} [(\nu \cdot N^3) / (\nu^2 + \omega^2)], \quad (5.4)$$

где:

N^3 – число свободных электронов в единице объема – электронная плотность ($1/\text{м}^3$);

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота (1/с);

f – линейная частота (Гц);

$\sigma^И$ – удельная проводимость (См/м);

ν – число столкновений электронов (1/с).

На достаточно высоких частотах, когда $\omega^2 \gg \nu^2$, выражения для $\varepsilon^И$ и $\sigma^И$ упрощаются:

$$\varepsilon^И \approx 1 - 80,8(N^3/f^2), \quad (5.5)$$

$$\sigma^И = 7,17 \cdot 10^{-10} [(\nu \cdot N^3)/f^2]. \quad (5.6)$$

Из табл. 5.1 следует, что максимальное значение ν наблюдается в ионосферном слое D и имеет порядок 10^7 , 1/с. Упрощенные формулы (5.5) и (5.6) можно использовать для частот выше примерно 3 МГц, то есть в диапазонах ВЧ, ОВЧ, СВЧ и КВЧ.

5.3. Основные свойства ионосферы

Рассмотрим основные свойства ионосферы, вытекающие из формул (5.3) и (5.5). Материал настоящего раздела во многом заимствован из [2].

Формула для $\varepsilon^И$ показывает, что относительная диэлектрическая проницаемость ионосферы:

а) всегда меньше единицы ($\varepsilon^И < 1$), то есть меньше относительной диэлектрической проницаемости свободного пространства;

б) зависит от электронной плотности N^3 и частоты столкновений электронов с нейтральными молекулами ν (см. табл. 5.1); значения N^3 и ν претерпевают пространственные и временные изменения, следовательно, ионосфера является неоднородной средой;

в) зависит от частоты f , то есть ионосфера является диспергирующей средой; с повышением частоты свойства ионосферы приближаются к свойствам свободного пространства ($\varepsilon^И \rightarrow 1$); практически основное влияние

ионосферы на условия распространения радиоволн наблюдается на частотах ниже 100 МГц;

г) может принимать нулевые значения, если частота поля радиоволны f будет равна так называемой собственной частоте ионосферной плазмы $f_0 = \sqrt{80,8 \cdot N^3}$;

д) на частотах $f < f_0$ относительная диэлектрическая проницаемость ионосферы принимает отрицательные значения ($\varepsilon^И < 0$).

На рис. 5.2,а показано качественное изменение электронной плотности по высоте, а на рис. 5.2,б показано качественное изменение $\varepsilon^И$ ионосферного слоя по высоте h для трех частот, удовлетворяющих условию $f_3 < f_2 < f_1$. Видно, что на всех частотах относительная диэлектрическая проницаемость сначала уменьшается, а затем, выше максимума электронной плотности, возрастает с высотой. Для некоторой частоты f_3 на высотах от h_1 до h_2 значения $\varepsilon^И$ отрицательны. Распространение радиоволны с частотой f_3 в указанном интервале высот невозможно. Это объясняется тем, что коэффициент распространения $k = 2\pi f_3 \sqrt{\varepsilon^И \varepsilon_0 \mu_0}$ при $\varepsilon^И < 0$ и отсутствии потерь становится величиной чисто мнимой. Следовательно, амплитуда поля убывает по экспоненциальному закону, а волновой процесс разрушается.

Для определенности по формуле (5.5) рассчитаем относительную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon^И$ ионосферного слоя E ($N^3 = 2 \cdot 10^{11}$, 1/м³) и слоя F_2 ($N^3 = 2 \cdot 10^{12}$, 1/м³) для частоты $f = 10$ МГц, принадлежащей диапазону ВЧ (3...30) МГц. После проведенных вычислений имеем $\varepsilon^И = 0,84$ для слоя E и $\varepsilon^И = -0,616$ для слоя F_2 . Результаты расчета показывают, что радиоволна с частотой $f = 10$ МГц может распространяться в слое E , но не может распространяться в слое F_2 . Согласно закону сохранения энергии, от слоя F_2 волна должна отразиться и поменять направление распространения.

Формулы (5.4) и (5.6) для удельной проводимости в совокупности с данными табл. 5.1 (значения N^3 и ν) позволяют говорить о следующем:

а) удельная проводимость прямо пропорциональна произведению $\nu \cdot N^3$, которое принимает максимальное значение в ионосферном слое D и нижней части слоя E ; учитывая, что слой D существует только в дневное время, можно утверждать – проводимость, а, следовательно, и потери передачи (ослабление) в ионосфере в дневное время больше, чем в ночное;

б) удельная проводимость, характеризующая потери в процессе распространения радиоволн в ионосфере, обратно пропорциональна частоте; последнее означает, что с ростом частоты потери в ионосфере уменьшаются; практически потери передачи в ионосфере малы на частотах выше 100 МГц;

в) при выполнении условия $\omega^2 \ll \nu^2$ удельная проводимость, а, следовательно, и потери при передаче (ослабление) при распространении радиоволны практически не зависят от частоты; такая ситуация характерна для диапазонов НЧ (300...3000) кГц и ОНЧ (30...300) кГц.

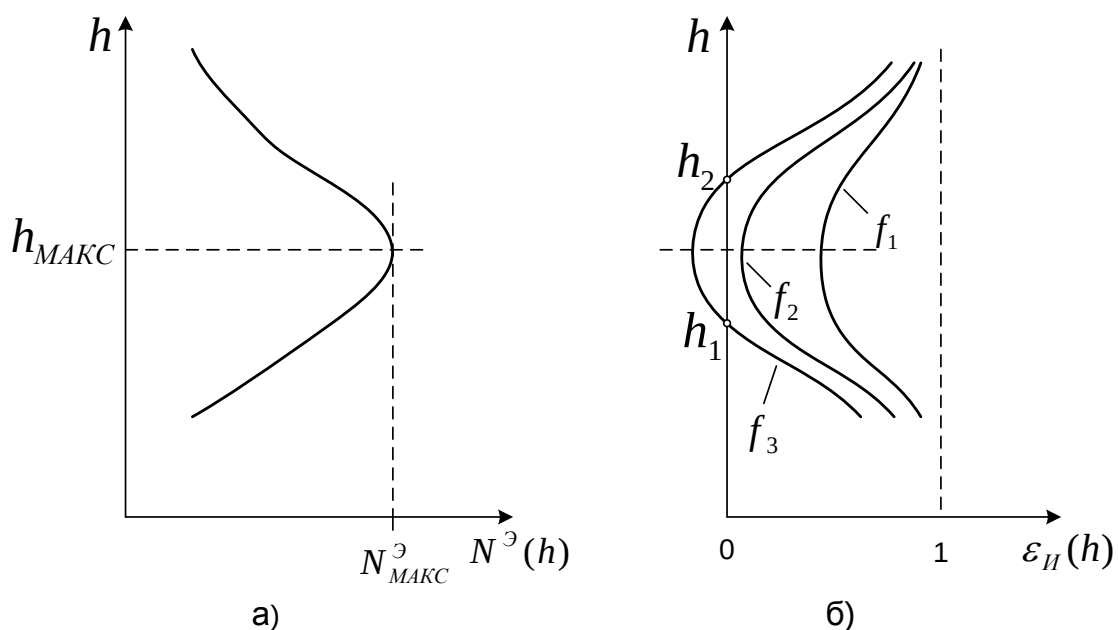


Рис. 5.2

Результаты научных исследований структуры ионосферы показали, что её диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость зависят от напряженности постоянного магнитного поля Земли. В результате такой зависимости ионосфера приобретает свойства анизотропной среды – значения ε^H и k определяются направлением распространения радиоволны.

Определение параметров анизотропной ионосферы является весьма сложной задачей, которая в настоящем учебном пособии не рассматривается. Отметим лишь, что под влиянием магнитного поля возникает явление двойного лучепреломления, когда электромагнитная волна расщепляется на две – обыкновенную и необыкновенную, распространяющиеся по разным траекториям с различными скоростями и испытывающие разные потери (ослабления).

5.4. Формирование траектории радиоволн в ионосфере

По отношению к радиоволнам, излучаемым наземной антенной и попадающим в ионосферу снизу вверх (рис. 5.3), ионосфера ведет себя как среда с постепенно изменяющимся значением электронной плотности N^{ϑ} . На рис. 5.3 пунктиром показаны уровни одинаковых значений электронной плотности. Нижний индекс в обозначении электронной плотности соответствует заданному уровню. Например, уровень $N_0^{\vartheta} = 0$ на высоте h отвечает нижней границе отражающего слоя, уровень N_{MAKC}^{ϑ} – максимальному значению электронной плотности в слое.

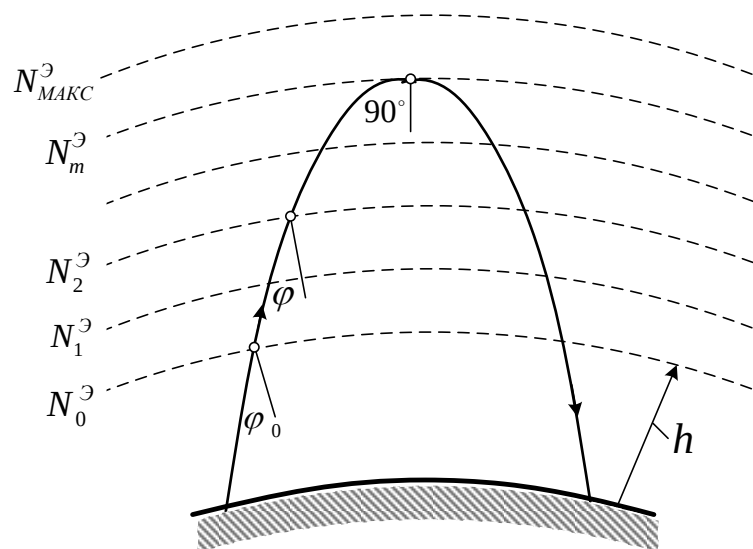


Рис. 5.3

Качественное изменение электронной плотности по высоте показано на рис. 5.2,а. Относительная диэлектрическая проницаемость ионосферы $\varepsilon^И$, как было показано в разделе 5.3, меняется в пределах толщи атмосферы (см. рис. 5.2,б). Принципиально важным является тот факт, что для некоторой фиксированной частоты значение функции $\varepsilon^И(h)$ сначала уменьшается, а затем на высотах, превышающих высоту расположения уровня максимальной электронной плотности, возрастает.

Учитывая известную связь между коэффициентом преломления любой среды n и её относительной диэлектрической проницаемостью ε в виде $n = \sqrt{\varepsilon}$, для ионосферы будет справедливо [2]:

$$n^И(N^э) = \sqrt{\varepsilon^И(N^э)} = \sqrt{1 - 80,8(N^э/f^2)}. \quad (5.7)$$

Из (5.7) следует, что для фиксированной частоты f коэффициент преломления определяется электронной плотностью.

О траектории радиоволны, показанной на рис. 5.3, обычно говорят в приближении геометрической оптики – луч входит в ионосферу и на некоторой высоте отражается от неё. В действительности всё гораздо сложнее. Во-первых, за счет явления ионосферной рефракции, луч отклоняется от прямолинейной траектории. Во-вторых, имеет место явление полного внутреннего отражения в неоднородной среде с плавно уменьшающимся коэффициентом преломления. Попадающий в такую среду луч движется по криволинейной траектории, в каждой точке которой выполняется условие:

$$\sin \varphi \cdot n = const, \quad (5.8)$$

где:

φ – угол падения, характеризующий направление прихода волны в данную точку;

n – коэффициент преломления в этой точке.

Для точки траектории, где волна из свободного пространства входит в ионосферу, имеем: угол $\varphi = \varphi_0$, электронная плотность $N_0^{\exists} = 0$, коэффициент преломления $n_0^{\exists} = 1$. Таким образом, можно записать:

$$\sin \varphi \cdot n = \sin \varphi_0 \cdot 1. \quad (5.9)$$

В точке вершины траектории, где луч испытывает поворот: $\varphi = 90^\circ$,

$$N^{\exists} = N_m^{\exists}, \quad n_m^{\exists} = \sqrt{1 - 80,8(N_m^{\exists}/f^2)}. \quad \text{Следовательно, можно записать}$$

$$\sin \varphi \cdot n = \sin 90^\circ \cdot \sqrt{1 - 80,8(N_m^{\exists}/f^2)}. \quad (5.10)$$

Принимая во внимание (5.8), можно приравнять правые части (5.9) и (5.10) и получить:

$$\sin \varphi_0 \cdot 1 = \sqrt{1 - 80,8(N_m^{\exists}/f^2)}. \quad (5.11)$$

Выражение (5.11) представляет собой условие поворота луча u -го уровня электронной плотности. Следует обратить внимание на то, что поворот луча и соответствующее ему отражение радиоволны от ионосферы происходит не от её нижней границы с воздухом ($N_0^{\exists} = 0$) и не от границы максимальной электронной плотности ($N_{\text{МАКС}}^{\exists}$), а на некоторой высоте в её толще. Уровень электронной плотности, при котором обеспечивается поворот (отражение), отвечает условию $N_0^{\exists} < N_m^{\exists} < N_{\text{МАКС}}^{\exists}$. Заметим, что если условие поворота радиоволны (5.11) не выполняется вплоть до высоты максимальной электронной плотности, то волна в сторону Земли не отразится, а уйдет в космическое пространство.

Если решить уравнение (5.11) относительно f , то можно записать:

$$f = \sqrt{(80,8 \cdot N_m^{\exists})/(\cos \varphi_0)^2}. \quad (5.12)$$

Из этой формулы следует, что чем выше электронная плотность u -го уровня, тем больше частота, при которой траектория радиоволны испытывает поворот (полное внутренне отражение) на этом уровне. Обозначая через $N_{\text{МАКС } F_2}^{\exists}$ максимальное значение электронной плотности ионосферного слоя F_2 , находим максимальную (предельную) частоту, при которой радиоволна, падающая на ионосферу под углом φ_0 , может отразиться от этого слоя:

$$f_{\text{ПРЕД}} = \sqrt{(80,8 \cdot N_{\text{МАКС } F_2}^{\exists})/(\cos \varphi_0)^2} \approx \left(9 \sqrt{N_{\text{МАКС } F_2}^{\exists}}\right)/\cos \varphi_0. \quad (5.13)$$

При данном значении угла φ_0 радиоволны на частотах, превышающих $f_{\text{ПРЕД}}$, не отражаются – они пронизывают ионосферу насквозь, как это показано на рис. 5.4 для частот f_5 и f_6 .

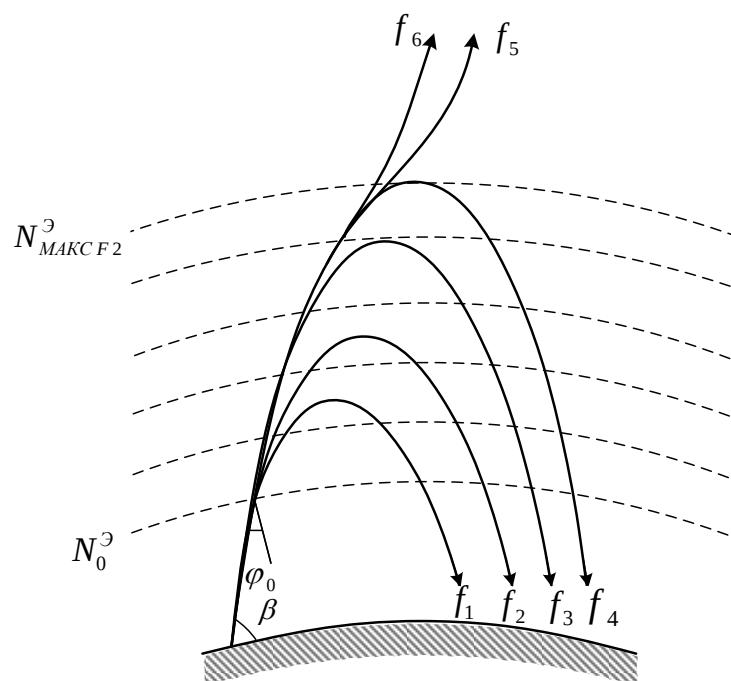


Рис. 5.4

Чем меньше частота радиоволны (на рисунке $f_1 < f_2 < f_3 < f_4 < f_5 < f_6$), тем ниже уровень электронной плотности, от которого радиоволна этой частоты отражается. Через f_4 обозначена предельная частота радиоволны, которая способна изменить свою траекторию так, чтобы вернуться на Землю. Радиоволны частот $f_5 > f_4$ и $f_6 > f_4$ проходят через ионосферу и от неё не отражаются.

Предельная частота $f_{\text{ПРЕД}}$ для вертикального направления падающей радиоволны получила название критической частоты. Из (5.13) следует:

$$f_{\text{КР}} = f_{\text{ПРЕД}, \varphi_0=0} \approx 9 \sqrt{N_{\text{МАКС } F_2}^{\text{Э}}} \quad (5.14)$$

Сопоставление выражений (5.13) и (5.14) показывает, что предельная и критическая частоты связаны между собой соотношением, которое принято называть законом секанса:

$$f_{\text{ПРЕД}} = \frac{f_{\text{КР}}}{\cos \varphi_0} = f_{\text{КР}} \cdot \sec \varphi_0. \quad (5.15).$$

При расчете радиотрасс в диапазоне ВЧ (3...30) МГц удобнее оперировать не углом падения φ_0 , а углом возвышения (углом места) β и расстоянием между передающей и приемной антеннами. Это расстояние для краткости называют скачком радиоволны, а определенную для заданного скачка и заданной высоты ионосферного слоя предельную частоту $f_{\text{ПРЕД}}$ — максимально применимой частотой (МПЧ). Так, наибольший скачок для слоя F_2 равен 4000 км, а соответствующую ему максимально применимую частоту обозначают $f_{\text{МПЧ-4000}}$, критическая же частота обозначается $f_{\text{МПЧ-0}}$.

Следует обратить внимание на очень важное обстоятельство – радиоволны, испытавшие отражение в ионосфере, достигают поверхности Земли и отражаются от неё, повторяя свой путь вперед за счет многократных отражений от ионосферы и земли.

В общем случае МПЧ зависит от длины трассы, высоты отражения от ионосферы, закона распределения электронной плотности слоя по высоте и критической частоты слоя. По условиям необходимости отражения от заданного слоя ионосферы рабочая частота f_p в диапазоне ВЧ (3...30 МГц) не должна превышать МПЧ, то есть должно выполняться условие $f_p \leq \text{МПЧ}$.

Нижняя граница рабочих частот определяется с учетом того, что с уменьшением частоты увеличивается удельная проводимость ионосферы (см. формулу (5.6)), и, соответственно, увеличивается поглощение энергии радиоволны. В результате уменьшается напряженность поля и ухудшается качество приема. Наименьшая частота, при которой качество приема снижается до минимально допустимого уровня, называется наименьшей применяемой частотой (НПЧ).

В конечном счете рабочая частота f_p выбирается так, чтобы выполнялось условие:

$$\text{НПЧ} \leq f_p \leq \text{МПЧ}. \quad (5.16)$$

В практических случаях для связи используется оптимальная рабочая частота (ОРЧ), которая выбирается на 15% меньше МПЧ. Суточные и сезонные изменения состояния слоев ионосферы вызывают необходимость смены рабочих частот, так как изменяются НПЧ, МПЧ. Для качественной работы радиолиний ВЧ диапазона в непрерывном режиме необходима периодическая смена рабочих частот (длин волн) в соответствии с частотным (волновым) расписанием.

Для практического расчета напряженности поля в точке приема на радиолиниях с ионосферными волнами необходимо располагать ионосферной картой поглощающих областей или суточным ходом критических частот этих областей и суточным ходом действующих высот отражающей области.

В настоящем учебном пособии методика расчета ионосферных радиолиний не приводится. Краткое изложение сущности методики можно найти, например, в [15].

6. ВЛИЯНИЕ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

6.1. Город – специфическая среда распространения радиоволн

До сих пор мы рассматривали распространение радиоволн в естественных средах: свободном пространстве, воздушном пространстве вблизи поверхности Земли, тропосфере и ионосфере. Город, с точки зрения взаимодействия радиоволн с городской застройкой, представляет собой специфическую неоднородную структуру, простирающуюся иногда на десятки километров.

Механизм распространения радиоволн в каждой среде свой. В этом смысле и город, с присущей ему застройкой, не является исключением. Для условий города характерны явления: затенения, отражения, дифракции и рассеяния радиоволн. Эти факторы придают процессу распространения радиоволн в условиях города существенно многолучевой характер и формируют сложную интерференционную структуру напряженности поля с глубокими и резкими перепадами уровней напряженности поля. Измерения показывают, что напряженность поля за отдельно стоящим кирпичным зданием на 20...30 дБ ниже, чем перед ним, за железобетонным строением уровень сигнала падает на 30...40 дБ. В целом внутри городской застройки имеются зоны, где напряженность поля значительно ослаблена.

Для городской инфраструктуры характерно применение телекоммуникационных радиосредств диапазонов УВЧ (300...3000 МГц) и ОВЧ (30...300 МГц), в первую очередь, средств сетей сотовой связи и телевизионного вещания.

При организации телевизионного вещания в условиях города передающая и приемная антенны находятся над уровнем городской застройки, и между ними, как правило, имеется прямая видимость.

Принципиально иная ситуация при организации сотовой связи. Между мобильной станцией (терминалом) абонента и сетевой базовой станцией прямой видимости чаще всего нет. Основной вклад в формирование поля вносят многократные отражения первичного поля стенами зданий, а также многократными дифракционными процессами на конструкциях строительных объектов.

В мировой практике исследований в области распространения радиоволн обычно используются усредненные характеристики городской застройки:

1. Плотная городская застройка (большой город) – застройка в основном высокими зданиями (выше 20 этажей) с малой площадью зеленых насаждений. Покрываемость зон обслуживания в значительной мере определяется дифракцией и рассеянием сигнала на ближайших к мобильному терминалу зданиях.

2. Городская застройка – многоэтажная административная и жилая застройка, индустриальные районы. Плотность зданий достаточно высокая, но может быть разбавлена зелеными насаждениями, небольшими скверами.

Помимо городской застройки иногда применяют и другие усредненные характеристики местности, например:

1. Пригород – одиночные жилые дома, административные здания, магазины высотой 1-3 этажа. Большие площади зеленых насаждений (деревьев), парковые зоны с отдельными группами зданий плотной застройки.

2. Сельская местность – открытое пространство с несколькими зданиями, фермы, кустарниковые насаждения, шоссе.

3. Открытое пространство – озера, водохранилища, открытые участки без насаждений, неплодородные земли.

В настоящем учебном пособии рассматриваются вопросы распространения радиоволн в условиях усредненной характеристики «городская застройка» применительно к подвижной радиосвязи.

6.2. Общие сведения о моделях распространения радиоволн в городе

Качество связи зависит от многих технических параметров радиолинии, которые находятся под контролем проектировщиков объектов радиосвязи. Контроль предполагает возможность изменить параметры с целью улучшения качества связи. Одним из универсальных параметров являются потери при передаче в процессе распространения радиоволн.

Если мы сумели тем или иным способом определить потери при передаче в условиях города L , то действующее значение напряженности поля вычисляется по формуле:

$$E_d = (\sqrt{30PG} / r)(1/L), \text{ В/м}, \quad (6.1)$$

где:

P – мощность на входе передающей антенны в ваттах;

G – коэффициент усиления передающей антенны (величина безразмерная);

r – расстояние между антеннами базовой и мобильной станции в метрах.

Заметим, что в (6.1) выражение $\sqrt{30PG} / r$ определяет действующее значение напряженности поля в условиях свободного пространства, а выражение $1/L$ – это множитель, характеризующий ослабление поля радиоволны при распространении в условиях городской застройки.

В силу объективно случайного характера городской застройки по отношению к траектории перемещения и точки нахождения абонента значение потерь L является случайной величиной, что предопределяет случайный

характер значений напряженности поля. В этих условиях оценку влияния городской застройки на распространение радиоволн следует строить на основе предсказания среднего (медианного) значения напряженности поля в точке приема (см. раздел 7).

Для расчета среднего значения разработаны и продолжают разрабатываться так называемые статистические модели распространения радиоволн, представляющие собой системы графиков или достаточно простых математических выражений, содержащих в качестве параметров некоторые статистически усредненные характеристики городской застройки.

В любой модели, естественно, должно быть учтено влияние частоты и значения коэффициентов усиления антенн. В конечном итоге модель позволяет оценить зависимость от расстояния потерь при передаче или уровней напряженности поля.

Модель распространения может разрабатываться как на основе теоретико-вероятностного подхода, так и путем обработки результатов экспериментальных исследований. Такие модели называются статистическими или эмпирическими соответственно. Кроме того, существуют модели, называемые полудетерминированными, основанные на определении поля в каких-либо структурах, поддающихся математическому анализу. Как правило, подобные структуры являются идеализацией некоторых характерных участков городской застройки.

Следует отметить, что, несмотря на многочисленные результаты, полученные при проведении исследований по распространению радиоволн в городских условиях, не существует единой модели, позволяющей с высокой степенью достоверности определить значение поля в заданной точке приема [12, 20].

6.3. Модель Окумура-Хата

Одна из популярных и широко используемых моделей основана на экспериментальных данных, полученных японским исследователем Окумурой в процессе измерений уровней радиосигналов в г. Токио. Другой японский специалист – Хата – представил экспериментальные данные Окумуры в математической форме. В конечном итоге получившаяся эмпирическая модель описания графических данных получила название модели Окумуры-Хаты.

В соответствии с этой моделью стандартная формула для расчета средних (медианных) потерь при передаче в условиях городской застройки имеет вид:

$$L = 69,55 + 26,16 \cdot \lg(f) - 13,82 \cdot \lg(h_{\text{БС}}) - a(h_{\text{МС}}) + (44,9 - 6,55 \cdot \lg(h_{\text{БС}})) \lg(r), \text{ дБ}, \quad (6.2)$$

где:

f – частота (МГц) в диапазоне 150...1500 МГц;

$h_{\text{БС}}, h_{\text{МС}}$ – эффективные высоты соответственно базовой станции и мобильной станции над уровнем земли (м) в диапазоне 30...200 м;

r – расстояние (км) в пределах 1...20 км;

$$a(h_{\text{МС}}) = (1,1 \cdot \lg(f) - 0,7)h_{\text{МС}} - (1,56 \cdot \lg(f) - 0,8).$$

Если параметры f и r , а также усредненная характеристика местности (городская застройка) отличаются от рекомендаций, соответствующих выражению (6.2), следует применять иные модели [12, 20].

Модель Окумура-Хата для среднего (медианного) значения напряженности поля имеет следующий вид [13]:

$$E = 39,82 + P_{\text{БС}} + G_{\text{БС}} - 6,16 \cdot \lg(f) + 13,82 \cdot \lg(h_{\text{БС}}) + a(h_{\text{МС}}) - (44,9 - 6,55 \cdot \lg(h_{\text{БС}})) \lg(r), \text{ дБ/мкВ/м}, \quad (6.3)$$

где:

$P_{\text{БС}}$ – мощность на входе передающей антенны базовой станции (дБВт);

$G_{\text{БС}}$ – коэффициент усиления передающей антенны базовой станции относительно полуволнового вибратора без потерь (дБд).

В уравнении (6.3) коэффициент усиления передающей антенны задан по отношению к коэффициенту усиления полуволнового симметричного вибратора (диполя) без потерь и выражен в дБд. Если коэффициент усиления задать по отношению к коэффициенту усиления изотропного излучателя и выразить его в дБи, то (6.3) приводится к виду:

$$E = 37,67 + P_{\text{БС}} + G_{\text{БС}} - 6,16 \cdot \lg(f) + 13,82 \cdot \lg(h_{\text{БС}}) + a(h_{\text{МС}}) - (44,9 - 6,55 \cdot \lg(h_{\text{БС}})) \lg(r), \text{ дБ/мкВ/м}, \quad (6.4)$$

где:

$P_{\text{БС}}$ – мощность на входе передающей антенны базовой станции (дБВт);

$G_{\text{БС}}$ – коэффициент усиления передающей антенны базовой станции относительно изотропного излучателя (дБи).

Переход от (6.3) к (6.4) осуществляется с использованием известного факта теории антенн – значение коэффициента усиления антенны G , выраженное в дБд, на 2,15 дБ меньше значения коэффициента усиления этой же антенны, выраженного в дБи, то есть:

$$G, \text{ дБи} - G, \text{ дБд} = 2,15 \text{ дБ}. \quad (6.5)$$

Произведение мощности на коэффициент усиления, измеренный по отношению к полуволновому симметричному вибратору (диполю), называют эффективно излучаемой мощностью (PG , Вт) или (P , дБВт + G , дБд). В (6.3) сумма второго и третьего слагаемого и есть эффективно излучаемая мощность.

Если в произведении PG значение коэффициента усиления измерено относительно изотропного излучателя, то речь идет об эквивалентной изотропно-излучаемой мощности (P , дБВт + G , дБи). В этом случае в (6.4) сумма второго и третьего слагаемого будет иметь смысл эквивалентной изотропно-излучаемой мощности.

7. ЗАМИРАНИЯ СИГНАЛОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН

7.1. Общие сведения о причинах замираний

В предыдущих разделах настоящего учебного пособия были рассмотрены вопросы теории распространения радиоволн в свободном пространстве, над земной поверхностью, в тропосфере, в ионосфере и в условиях городской застройки. Однако при этом не обсуждалась очень важная проблема, связанная с флуктуацией амплитуды принимаемого сигнала во времени. Такие флуктуации обычно протекают как случайный процесс и называются замираниями. Замирания приводят к беспорядочным колебаниям напряженности поля в месте приема.

Радиолиния, работающая полностью в условиях свободного пространства, например, космического, обеспечивает условия приема радиосигнала без замираний. В этом смысле свободное пространство можно считать идеализированной средой.

Влияние Земли на распространение радиоволн (см. разделы 3.2 и 3.3) сводится к введению некоторой функции, которая, в частности, зависит от абсолютной диэлектрической проницаемости и удельной проводимости земной поверхности. Изменения этих параметров в зависимости от времени суток, месяца, времени года приводят к соответствующим регулярным изменениям сигнала, которые, строго говоря, не являются замираниями.

Флуктуации абсолютной диэлектрической проницаемости тропосферы (см. раздел 4.1) порождают изменения условий процесса рефракции радиоволн, что приводит к, так называемым, рефракционным замираниям принимаемого сигнала.

Использование эффекта тропосферного рассеяния (на радиолиниях дальнего тропосферного распространения радиоволн) сводится к приему множества волн, амплитуды и фазы которых непрерывно меняются (см. раздел 4.3). При этом в точке приема проявляется ярко выраженный интерференционный процесс, порождающий замирания сигнала.

На радиолиниях, использующих механизм ионосферного распространения радиоволн (см. раздел 5.4), замирания обусловлены одновременным проявлением двух факторов. Первый – многолучевость, из-за которой происходит интерференция нескольких (чаще всего двух) волн, второй – флуктуации высоты отражающей области ионосферы. Одна многолучевость (при фиксированном положении отражателя) или одни флуктуации ионосферы (при строго одном отражении) привести к замираниям не могут.

Ещё одной причиной замираний сигналов являются случайные изменения поворота плоскости поляризации радиоволн, проходящих сквозь

ионосферу. Этот вид замираний – результат случайного характера рассогласования поляризации приемной антенны и принимаемого поля.

Для радиолиний сотовой связи с подвижными объектами (раздел 6) многолучевость проявляется всегда и, как следствие, всегда наблюдаются значительные замирания сигналов.

В теории распространения радиоволн принято различать быстрые и медленные замирания. Быстрые замирания имеют длительность от долей до десятков секунд. Природа быстрых замираний (иначе их называют интерференционными) обусловлена многолучевой структура сигнала, которая формируется из волн, приходящих в точку приема по различным траекториям. Фазовые соотношения между отдельными лучами в принимаемом многолучевом сигнале могут изменяться за счет случайных пространственно-временных вариаций абсолютной диэлектрической проницаемости среды, а также за счет движения одного или обоих корреспондирующих пунктов.

Медленные замирания имеют длительность от единиц до нескольких десятков минут. Они в основном обусловлены случайными изменениями рефракции в тропосфере, рассеянием крупномасштабными неоднородностями ионосферы, кратковременным поглощением энергии радиоволн, например, в ионизированных слоях ионосферы, в осадках и газах тропосферы и т.п.

7.2. Характеристики замираний

Наличие замираний требует ввести специальное определение для характеристики среднего уровня принимаемого сигнала и степени отклонения мгновенных значений уровня от указанного среднего значения. Наиболее распространенным является выражение среднего уровня в медианных значениях напряженности поля. Медианным принято называть такой уровень сигнала, который превосходится в течение 50% времени приема. Этот уровень принято обозначать через E_M или $E_{0,5}$. Предположим, что сигнал принимается в течение времени T , причем изменения напряженности поля во времени представляются графиком на рис. 6.1. Для нахождения медианного значения напряженности поля необходимо провести прямую, параллельную оси абсцисс, на таком уровне, чтобы сумма промежутков времени, в течение которых фактическое значение напряженности поля превышает указанный уровень, была равна сумме промежутков, в течение которых фактическое значение меньше этого уровня. На рис. 7.1. медианный уровень обозначен через E_M . Интервалы превышения заштрихованы. Общая длина заштрихованных интервалов равна общей длине интервалов не заштрихованных.

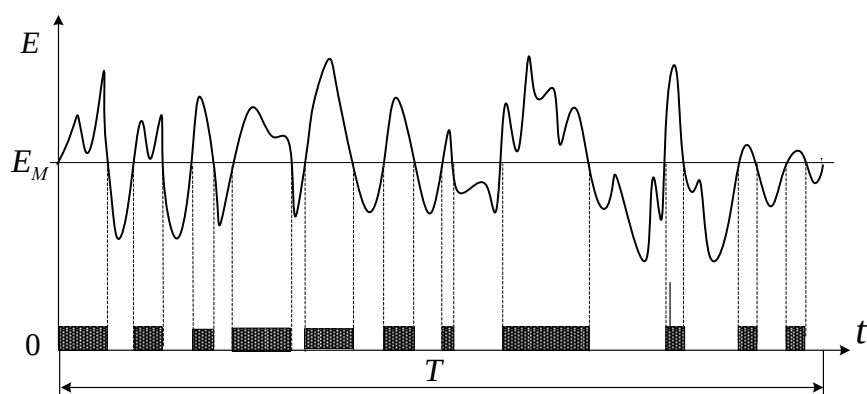


Рис. 7.1

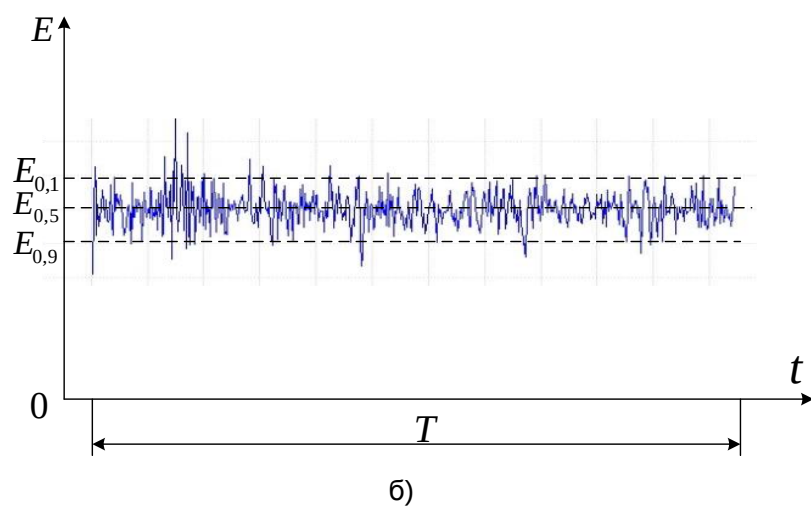
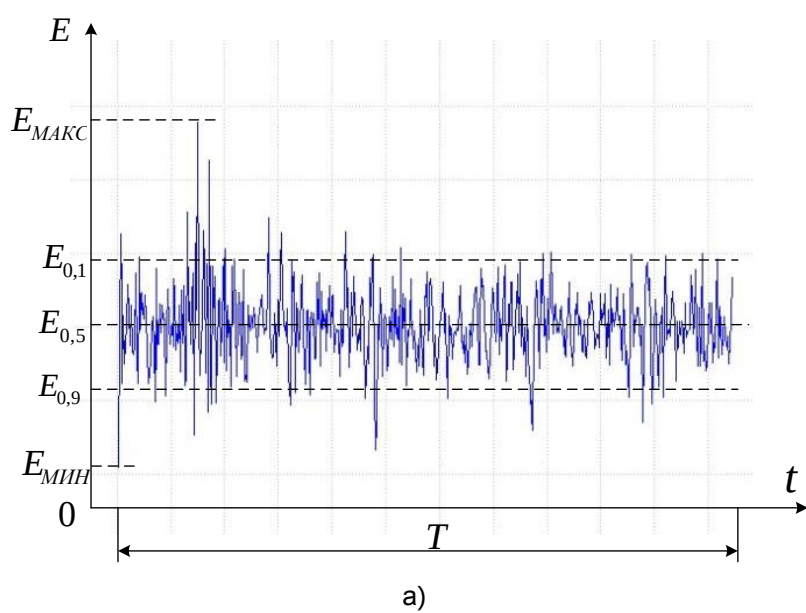


Рис. 7.2

На рис. 7.2,а показана реализация некоторого случайного сигнала, имеющего медианный уровень $E_M = E_{0.5}$. Другой случайный сигнал, имеющий прежний медианный уровень показан на рис. 7.2,б. Масштаб по осям ординат и абсцисс на этих рисунках одинаков. Видно, что хотя оба сигнала имеют одно и то же медианное значение, но сигнал, представленный на рис. 7.2,б, имеет существенно меньшее отклонение от медианного уровня.

Таким образом, характеризуя средний уровень принимаемого сигнала, медианное значение напряженности поля, конечно, никак не отражает глубины замираний. Глубину замираний можно оценить только весьма условно. Прежде всего, нельзя под глубиной замираний понимать отношение максимального к минимальному значению напряженности поля за время T , т.е. $E_{\text{МАКС}}/E_{\text{МИН}}$ (см. рис. 7.2,а). Дело в том, что отдельные пики могут достигать весьма больших значений, однако с малой вероятностью. С другой стороны, глубокие минимумы могут маскироваться шумовым фоном. Поэтому обычно под глубиной замираний понимают отношение $(E_{0,1}/E_{0,9})$, выраженное в децибелах по отношению к 1 мкВ/м, то есть разность $(20\lg E_{0,1} - 20\lg E_{0,9})$ дБ/мкВ/м. Через $E_{0,1}$ и $E_{0,9}$ обозначены уровни поля, превышаемые соответственно в течение 10% и 90% времени наблюдения T .

Сравнивая отношения $E_{0,1}/E_{0,9}$, соответствующие рис. 7.2,а и рис. 7.2,б, можно видеть, что глубина замираний, показанных на рис. 7.2,а, больше глубины замираний, представленных на рис. 7.2,б.

Как всякая случайная величина, уровень замирающего сигнала может быть оценен только статистически. Измерения показали, что замирания представляют собой нестационарный случайный процесс. Однако с приемлемой для практики точностью в течение ограниченных интервалов времени замирания можно считать стационарным случайным процессом. Длительность таких интервалов не постоянна и зависит от многих факторов, в частности, от присущего данной радиолинии механизма распространения радиоволн. Флуктуации уровня сигнала относительно некоего медианного уровня в течение такого ограниченного интервала времени — это и есть быстрые замирания.

Наиболее часто встречающаяся функция распределения (иначе — закон распределения) вероятностей случайной величины (действующего значения напряженности поля) при быстрых (интерференционных) замираниях удовлетворительно аппроксимируется законом распределения Рэлея:

$$P(E > E_{\Pi}) = \exp(-0,693 E_{\Pi}^2 / E_M^2), \quad (7.1)$$

где:

$P(E > E_{\Pi})$ — вероятность того, что значение случайной величины E превышает заданный (пороговый) уровень E_{Π} ;

E_M — медианное значение случайной величины E .

В теории распространения радиоволн функции распределения часто выражают в процентах времени. В этом случае вместо (7.1) будем иметь:

$$T(E > E_{\Pi}) = 100 \exp(-0,693 \cdot E_{\Pi}^2 / E_M^2), \quad (7.2)$$

где $T(E > E_{\Pi})$ читается как «процент времени, в течение которого значение случайной величины E превышает заданный уровень E_{Π} , ...» или как «процент устойчивой связи...». Так, если в качестве E_{Π} выбрать, например, само медианное значение, то оказывается, что $P(E > E_{\Pi}) = 0,5$, а $T(E > E_{\Pi}) = 50\%$, то есть устойчивость связи в этом случае составит всего 50%.

Обычно в качестве заданного уровня берется минимальное значение E , при котором обеспечивается требуемое качество приема. Часто требуется, особенно при передаче данных, чтобы устойчивость связи составляла не менее 99,9%, что означает $T(E > E_{\Pi}) = 99,9\%$ или, в вероятностной оценке, $P(E > E_{\Pi}) = 0,999$. С помощью соотношений (7.1) или (7.2) нетрудно подсчитать, что для этого необходимо, чтобы медианное значение превышало требуемый пороговый уровень не менее чем на 28,4 дБ. Для вероятности 0,995 превышение должно составлять 21,4 дБ, а для вероятности 0,99 – 8,4 дБ.

Функция распределения вероятностей случайной величины – усредненных в пределах определенных интервалов времени действующих значений напряженности поля – при медленных замираниях примерно соответствует логарифмически нормальному закону:

$$P(E > E_{\Pi}) = 1 - (1/\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt, \quad (7.3)$$

где:

$$x = 20 (lg(E_{\Pi}) - lg(E_M)) / \sigma - \text{верхний предел интеграла}, \quad (7.4)$$

$$\sigma = 20 (lg(E_{0,16}) - lg(E_M)) \quad (7.5)$$

или

$$\sigma = 20 (lg(E_M) - lg(E_{0,84})). \quad (7.6)$$

В выражениях (7.5) и (7.6) через $E_{0,16}$ и $E_{0,84}$ обозначены уровни поля, превышаемые в течение соответственно 16% и 84% времени наблюдения или, другими словами, $P(E > E_{0,16}) = 0,16$ и $P(E > E_{0,84}) = 0,84$.

Формулу (7.3) можно привести к виду, удобному для практических расчетов:

$$P(E > E_{\Pi}) = 0,5 - 0,5 \operatorname{erf}(x/\sqrt{2}), \quad (7.7)$$

где

$$\operatorname{erf}(x/\sqrt{2}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x/\sqrt{2}} \exp(-t^2) dt \quad (7.8)$$

хорошо известная функция, называемая интегралом вероятности, которая входит в набор встроенных функций системы Mathcad [16]. Значение x , входящее в верхний предел интеграла в формуле (7.7), определяется выражением (7.4).

Следует еще раз обратить внимание на то, что в (7.3) функции (закону) нормального распределения подчиняется не сама случайная величина E , а её логарифм – lgE .

Логарифмически нормальная функция распределения, как это следует из выражений (7.3) – (7.6), характеризуется двумя параметрами: медианным значением E_M , выраженном в децибелах по отношению, например, к 1 мкВ/м, и стандартным квадратическим отклонением (иначе – просто стандартным отклонением) – σ , выраженном также в децибелах.

Важно понимать, что на реальных трассах радиолиний быстрые и медленные замирания могут проявляться одновременно. В качестве примера на рис. 7.3 показан характер изменений напряженности поля в точке приема сигнала радиолинии дальнего тропосферного распространения.

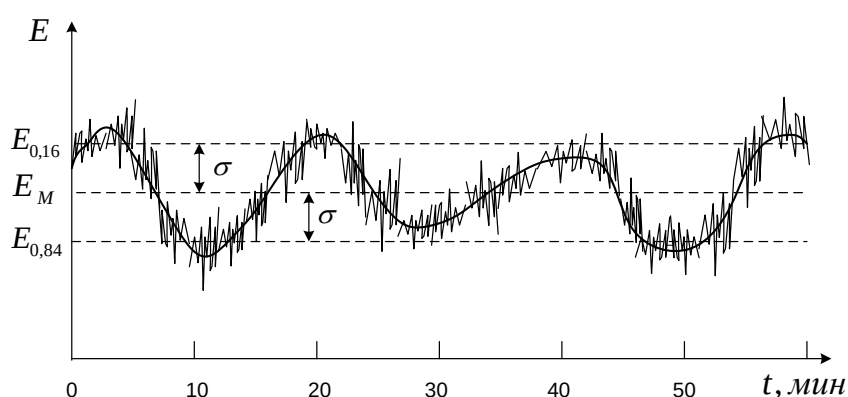


Рис. 7.3

Случайной величиной здесь является действующее значение напряженности поля сигнала, то есть сугубо положительная величина. Именно к таким величинам можно применять логарифмически нормальную функцию распределения. Величина, функцию распределения которой мы рассматриваем, представляет собой медианные значения действующей напряженности поля, определенные за одно- пятиминутные интервалы. В пределах этих интервалов наблюдаются быстрые замирания (они отображены на рис.7.3 в виде быстро меняющейся линии). Действие быстрых замираний при операции вычисления медианного значения уровня в пределах каждого интервала сглаживается. Именно эти медианные значения напряженности поля, соответствующие одно- пятиминутным интервалам времени, подчинены логарифмически нормальному закону распределения, который аппроксимирует медленные случайные колебания уровня принимаемого сигнала вследствие влияния изменяющихся метеорологических условий (сплошная, плавно меняющаяся линия на рис. 7.3).

8. ЗАДАЧИ

8.1. Задачи для самостоятельного решения

1. Для линии радиосвязи Земля/космический аппарат определить для условий свободного пространства: основные потери при передаче L_{0CB} и потери при передаче L_{CB} , а также необходимую мощность передатчика земной станции $P_{ЗС}$. Исходные условия: длина линии 40000 км; длина волны 3 см; коэффициент усиления передающей антенны земной станции 46 дБ; коэффициент полезного действия фидера передающей антенны 1,0; необходимая мощность сигнала на входе приемника космического аппарата 10^{-10} Вт; коэффициент усиления приемной антенны космического аппарата 18 дБ; коэффициент полезного действия фидера приемной антенны 1,0. (Ответ: $L_{0CB} = 204,5$ дБ; $L_{CB} = 140,5$ дБ; $P_{ЗС} = 1,118$ кВт).

2. Для линии радиосвязи Земля/космический аппарат определить: основные потери при передаче в свободном пространстве L_{0CB} и полные потери при передаче L , а также необходимую мощность передатчика земной станции $P_{ЗС}$. Исходные условия: длина линии 40000 км; длина волны 3 см; коэффициент усиления передающей антенны земной станции 46 дБ; коэффициент полезного действия фидера передающей антенны 0,9; необходимая мощность сигнала на входе приемника космического аппарата 10^{-10} Вт; коэффициент усиления приемной антенны космического аппарата 18 дБ; коэффициент полезного действия фидера приемной антенны 0,9. На участке линии длиной 200 км существуют дополнительные потери в атмосфере $L_{доп}$, значение которых оценивается погонным коэффициентом поглощения 0,015 дБ/км. (Ответ: $L_{0CB} = 204,5$ дБ; $L = 143,5$ дБ; $P_{ЗС} = 2,753$ кВт).

3. Для линии радиосвязи Земля /космический аппарат определить: предельное расстояние r , на котором земная станция будет принимать сигналы космического аппарата, основные потери при передаче в свободном пространстве L_{0CB} и потери при передаче в свободном пространстве L_{CB} . Исходные условия: мощность передатчика на космическом аппарате 2 Вт, рабочая частота передатчика 2 ГГц; коэффициент полезного действия фидера передающей антенны 1,0; коэффициент усиления передающей антенны на борту космического аппарата 0 дБ; коэффициент усиления антенны приемной станции на Земле 60 дБ; коэффициент полезного действия фидера приемной антенны 1,0; минимальная мощность, которая регистрируется приемником земной станции, 10^{-15} Вт. (Ответ: $L_{0CB} = 213,01$ дБ; $L_{CB} = 153,01$ дБ; $r = 5,338 \cdot 10^5$ км).

4. Космический аппарат удаляется от Земли. Для поддержания связи с земной станцией наблюдения на аппарате установлены два передатчика – малой мощности и повышенной мощности. Определить: а) расстояние r_1 , на

котором необходимо включить более мощный передатчик; б) предельное расстояние r_2 , при котором возможен прием сигналов с борта космического аппарата. Исходные данные: мощность маломощного передатчика на космическом аппарате 2 Вт; мощность передатчика повышенной мощности 200 Вт; рабочая частота передатчиков 2 ГГц; коэффициент усиления передающей антенны на борту космического аппарата 0 дБ; коэффициент усиления антенны приемной станции на Земле 57 дБ; минимальная мощность, которая регистрируется приемником земной станции 10^{-13} Вт. (Ответ: $r_1 = 3,779 \cdot 10^4$ км; $r_2 = 3,779 \cdot 10^5$ км).

5. Рассчитать и построить границу области, существенной для распространения радиоволн, для линии протяженностью 10 км и при частоте 3000 МГц. Расчет выполнить при условии учета восьми зон Френеля. Рассчитать и построить границы областей, соответствующих 1-ой и минимальной зонам Френеля. Каков максимальный диаметр d у минимальной зоны Френеля? (Ответ: диаметр минимальной зоны Френеля $d_{\text{макс}} = 18,28$ м).

6. Рассчитать и построить зависимость предельного расстояния прямой видимости от высоты подвеса приемной антенны, если передающая антенна имеет высоту подвеса 100 м, а высота подвеса приемной антенны изменяется от 5 до 20 м. (Ответ: для одной точки – при $h_2 = 16$ м значение $r_{\text{ПР}} = 49,98$ км).

7. Рассчитать и построить зависимость предельного расстояния прямой видимости от высоты подвеса передающей антенны, если приемная антенна имеет высоту подвеса 25 м, а высота подвеса передающей антенны изменяется от 50 до 100 м. (Ответ: для одной точки – при $h_1 = 100$ м значение $r_{\text{ПР}} = 53,55$ км).

8. Плоская горизонтально поляризованная волна с частотой 50 МГц, падает под углом скольжения 4° из воздуха на плоскую поверхность сплошной среды, относительная диэлектрическая проницаемость которой равна 3, а удельная проводимость $5 \cdot 10^{-3}$ См/м. Рассчитать модуль R и фазу θ° коэффициента отражения падающей волны на границе раздела двух сред. (Ответ: $R = 0,924$ $\theta = 178,26^\circ$).

9. Плоская вертикально поляризованная волна с частотой 50 МГц, падает под углом скольжения 4° из воздуха на плоскую поверхность сплошной среды, относительная диэлектрическая проницаемость которой равна 3, а удельная проводимость $5 \cdot 10^{-3}$ См/м. Рассчитать модуль R и фазу θ° коэффициента отражения падающей волны на границе раздела двух сред. (Ответ: $R = 0,745$; $\theta = 183,02^\circ$).

10. Рассчитать значения модуля R и фазы θ° коэффициента отражения при отражении вертикально поляризованной волны с длиной волны 6 м от влажной почвы ($\varepsilon = 10, \sigma = 0,01$ См/м) и угле скольжения 10° . (Ответ: $R = 0,268$; $\theta = 195,8^\circ$ или $\theta = -164,2^\circ$).

11. Рассчитать значения модуля R и фазы θ° коэффициента отражения при отражении горизонтально поляризованной волны с длиной волны 6 м от влажной почвы ($\varepsilon = 10, \sigma = 0,01$ См/м) и угле скольжения 10° . (Ответ: $R = 0,896$; $\theta = 178,79^\circ$).

12. Радиолиния проходит над плоской земной поверхностью. Характеристики радиолинии: передающая антенна имеет коэффициент усиления 20 дБ, мощность, подводимая к передающей антенне 15 Вт, длина волны 35 см, высота подвеса передающей антенны 80 м, приемной – 20 м, расстояние между антеннами 8 км, коэффициент отражения радиоволны от земной поверхности $\tilde{R} = 0,91 \exp(j180^\circ)$. Рассчитать: модуль множителя ослабления V при распространении радиоволны, амплитуду напряженности поля E в точке приема. (Ответ: $V = 0,833$; $E = 31$ мВ/м).

13. Рассчитать и построить зависимости модуля множителя ослабления V и амплитуды напряженности поля E в месте приема от длины радиолинии при следующих исходных данных: передающая антенна имеет КНД 20 дБ; мощность, подводимая к передающей антенне, 100 Вт; длина волны 35 см, высота передающей антенны 80 м, приемной – 20 м; длина радиолинии изменяется от 1 до 8 км, коэффициент отражения от земной поверхности $\tilde{R} = \exp(j180^\circ)$. (Ответ: для одной точки – при $r = 6,1$ км значения: $V = 2,0$; $E = 254$ мВ/м).

14. Определить амплитуду вертикальной составляющей напряженность поля E_B на расстоянии 10 км от передающей станции, расположенной на земной поверхности. Радиолиния проходит над влажной почвой ($\varepsilon = 10, \sigma = 0,01$ См/м) Технические характеристики радиолинии: мощность на входе антенны 1,0 кВт, длина волны 200 м, коэффициент усиления антенны – вертикального вибратора, установленного на земле – 1,5. (Ответ: $E_B = 25$ мВ/м).

15. Определить амплитуду горизонтальной составляющей напряженность поля E_T на расстоянии 10 км от передающей станции, расположенной на земной поверхности. Радиолиния проходит над влажной почвой ($\varepsilon = 10, \sigma = 0,01$ См/м) Технические характеристики радиолинии: излучаемая мощность 1,0 кВт, длина волны 200 м, коэффициент усиления антенны –

вертикального вибратора, установленного на земле – 1,5. (Ответ: $E_{\Gamma} = 0,2$ мВ/м).

16. Определить амплитуду вертикальной составляющей напряженность поля E_B на расстоянии 10 км от передающей станции, расположенной на земной поверхности. Радиолиния проходит над сухой почвой ($\varepsilon = 4$, $\sigma = 0,001$ См/м) Технические характеристики радиолинии: излучаемая мощность 1,0 кВт, длина волны 200 м, коэффициент усиления антенны – вертикального вибратора, установленного на земле – 1,5. (Ответ: $E_B = 2$ мВ/м).

17. Определить амплитуду горизонтальной составляющей напряженность поля E_{Γ} на расстоянии 10 км от передающей станции, расположенной на земной поверхности. Радиолиния проходит над сухой почвой ($\varepsilon = 4$, $\sigma = 0,001$ См/м) Технические характеристики радиолинии: излучаемая мощность 1,0 кВт, длина волны 200 м, коэффициент усиления антенны – вертикального вибратора, установленного на земле – 1,5. (Ответ: $E_{\Gamma} = 0,156$ мВ/м).

18. Рассчитать и построить зависимость предельного расстояния прямой видимости от высоты подвеса приемной антенны, если передающая антенна имеет высоту подвеса 100 м, а высота подвеса приемной антенны изменяется от 5 до 20 м. Рассмотреть два случая: а) распространение происходит в условиях повышенной рефракции, когда вертикальный градиент диэлектрической проницаемости тропосферы равен $(-12 \cdot 10^{-8})$ 1/м; б) рефракция не учитывается. (Ответ: а) для одной точки – при $g = -12 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{м}}$ и $h_2 = 16$ м значение $r_{\text{ПР}} = 63,6$ км); б) для одной точки – при $g = 0$ и $h_2 = 16$ м значение $r_{\text{ПР}} = 49,97$ км).

19. Рассчитать и построить зависимость предельного расстояния прямой видимости от высоты подвеса приемной антенны, если передающая антенна имеет высоту подвеса 100 м, а высота подвеса приемной антенны изменяется от 5 до 20 м. Рассмотреть два случая: а) распространение происходит в условиях стандартной рефракции; б) рефракция не учитывается. (Ответ: а) для одной точки – при $g = -7,85 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{м}}$ и $h_2 = 16$ м $r_{\text{ПР}} = 57,7$ км); б) для одной точки – при $g = 0$ и $h_2 = 16$ м значение $r_{\text{ПР}} = 49,97$ км).

20. Дальность обнаружения радиолокационной станцией летящей цели при отсутствии дождя равна 50 км. На каком максимальном расстоянии r будет обнаружена цель в условиях дождя на участке трассы 1,5 км, если погонное ослабление в дожде 2 дБ/км. (Ответ: $r = 25,06$ км).

21. Линия радиосвязи с подвижным объектом обеспечивает связь на расстоянии 50 км при отсутствии осадков в виде дождя. Определить макси-

мальное расстояние r , при котором сохранится прежний уровень сигнала в условиях сильного дождя. Дождь приходится на участок трассы 10 км, а погонное ослабление сигнала в дожде 0,4 дБ/км. (Ответ: $r = 31,5$ км).

22. Линия радиосвязи на частоте 10 ГГц обеспечивает связь на расстоянии до 20 км при отсутствии осадков в виде дождя. Определить максимальное расстояние r , при котором сохранится прежний уровень сигнала в условиях дождя с интенсивностью 10 мм/час. (Ответ: $r = 15,3$ км).

23. Линия радиосвязи на частоте 20 ГГц обеспечивает связь на расстоянии до 10 км при отсутствии осадков. Определить максимальное расстояние r , при котором сохранится прежний уровень сигнала в условиях тумана при среднем значении плотности жидкой воды в тумане 0,25 г/м³. (Ответ: $r = 8,73$ км).

24. Рассчитать дневные критические частоты ионосферных слоев: D, E, F_1, F_2 . (Ответ: для слоя F_2 значение $f_{кр} = 12,7$ МГц).

25. Рассчитать ночные критические частоты ионосферных слоев: D, E, F_1, F_2 . (Ответ: для слоя F_2 значение $f_{кр} = 4,923$ МГц).

26. Определить дневную и ночную максимально применимую частоту (МПЧ) для радиоволны, падающей на слой F_2 : а) под углом 60°, б) под углом 30°. (Ответ: для $\varphi = 60^\circ$: дневное значение $f_{МПЧ} = 25,42$ МГц, ночное – $f_{МПЧ} = 9,847$ МГц).

27. Определить дневную и ночную оптимальную рабочую частоту (ОРЧ) для радиоволны, падающей на слой F_2 : а) под углом 60°, б) под углом 30°. (Ответ: для $\varphi = 30^\circ$: дневное значение $f_{ОРЧ} = 12,48$ МГц, ночное – $f_{ОРЧ} = 4,83$ МГц).

28. Рассчитать и построить функцию распределения случайной величины – действующего значения напряженности поля E – при быстрых интерференционных замираниях, если медианное значение случайной величины $E_M = 2$ мВ/м. Определить, с какой вероятностью будут превышать пороговые значения: а) $E_{П} = 0,1$ мВ/м; б) $E_{П} = 3,7$ мВ/м. (Ответ: а) $P(E > E_{П}) = 0,998$; б) $P(E > E_{П}) = 0,093$).

29. Рассчитать и построить функцию распределения случайной величины – действующего значения напряженности поля E – в условиях медленных замираний, если медианное значение случайной величины $E_M = 50$ мВ/м, а стандартное отклонение $\sigma = 6$ дБ. Определить с какой вероятностью будут превышать пороговые значения:

а) $E_{П} = 10$ мВ/м; б) $E_{П} = 140$ мВ/м. (Ответ: а) $P(E > E_{П}) = 0,990$; б) $P(E > E_{П}) = 0,068$).

30. Методом Окумура-Хата рассчитать зависимость от расстояния средних (медианных) потерь при передаче на радиолинии при следующих исходных данных: трасса проходит в городе, передатчик базовой станции системы подвижной связи GSM работает на частоте 900 МГц. Высота подвеса

передающей антенны базовой станции 50 м, антенны приемника мобильной станции – 1,5 м. Передающую и приемную антенны считать изотропными. Расстояние между базовой станцией и мобильной изменяется от 1 до 20 км. (Ответ: для одной точки – при $r = 20$ км значение $L = 167,28$ дБ).

31. Методом Окумура-Хата рассчитать зависимость средних (медианных) потерь при передаче от расстояния на радиолинии при следующих исходных данных: трасса проходит в городе, передающая антенна базовой станции системы подвижной связи GSM на частоте 900 МГц имеет коэффициент усиления 12 дБ, приемная антенна мобильной станции имеет коэффициент усиления 0 дБ. Высота подвеса передающей антенны базовой станции 50 м, антенны приемника мобильной станции – 1,5 м; расстояние между базовой станцией и мобильной изменяется от 1 до 20 км. (Ответ: для одной точки – при $r = 20$ км значение $L = 155,28$ дБ).

32. Методом Окумура-Хата рассчитать зависимость среднего (медианного) значения уровня действующей напряженности электрического поля от расстояния между базовой и мобильной станциями системы подвижной связи в условиях города в пределах от 1 до 20 км. Рабочая частота 900 МГц. Мощность на входе передающей антенны – 50 Вт. Передающая антенна базовой станции не имеет направленности в горизонтальной плоскости, её коэффициент усиления относительно полуволнового линейного симметричного вибратора равен 10 дБ, а высота подвеса – 50 м. Высота расположения антенны мобильной станции 1,5 м. (Ответ: для одной точки – при $r = 20$ км значение $E = 28,169$ дБ/мкВ/м).

33. Методом Окумура-Хата рассчитать зависимость среднего (медианного) значения действующей напряженности электрического поля от расстояния между базовой и мобильной станциями системы подвижной связи в условиях города в пределах от 1 до 20 км. Рабочая частота 900 МГц. Мощность на входе передающей антенны – 50 Вт. Передающая антенна базовой станции не имеет направленности в горизонтальной плоскости, её коэффициент усиления относительно изотропного излучателя равен 10 дБ, а высота подвеса – 50 м. Высота расположения антенны мобильной станции 1,5 м. (Ответ: для одной точки – при $r = 20$ км значение $E = 40,0$ мкВ/м).

8.2. Примеры решения задач

Задача 1. Для линии радиосвязи Земля /космический аппарат определить: предельное расстояние r , на котором земная станция будет принимать сигналы космического аппарата, основные потери при передаче в свободном пространстве $L_{\text{осв}}$ и потери при передаче в свободном пространстве $L_{\text{св}}$. Исходные условия: мощность передатчика на космическом аппарате 3 Вт, длина волны передатчика 10 см; коэффициент полезного действия фидера

передающей антенны 1,0; коэффициент усиления передающей антенны на борту космического аппарата 1,0 дБ; коэффициент усиления антенны приемной станции на Земле 56 дБ; коэффициент полезного действия фидера приемной антенны 1,0; минимальная мощность, которая регистрируется приемником земной станции, 10^{-14} Вт.

(Ответ: $r = 9,758 \cdot 10^4$ км; $L_{0CB} = 201,77$ дБ; $L_{CB} = 144,77$ дБ).

Решение задачи

Воспользуемся формулой (2.15) из раздела 2 настоящего учебного пособия:

$$P_2 = (P_1 \eta_1 \eta_2 G_1 G_2 \lambda^2) / (4\pi r)^2. \quad (8.1)$$

Расстояние r найдем из (8.1):

$$r = \sqrt{(P_1 \eta_1 \eta_2 G_1 G_2 \lambda^2) / (16\pi^2 P_2)}. \quad (8.2)$$

В эту формулу значения коэффициентов усиления нельзя подставлять в децибелах – следует перейти к безразмерным величинам:

$$G_1 = 10^{(G_1, \text{ дБ})/10} = 1,259; \quad G_2 = 10^{(G_2, \text{ дБ})/10} = 3,981 \cdot 10^5. \quad (8.3)$$

Вычисление по формуле (8.2) дает $r = 9,758 \cdot 10^4$ км.

Основные потери при передаче в свободном пространстве L_{0CB} вычислим, воспользовавшись формулой (2.24):

$$L_{0CB}, \text{ дБ} = 10 \lg(L_{0CB}) = 20 \lg(4\pi r / \lambda) = 201,77. \quad (8.4)$$

Потери при передаче в свободном пространстве L_{CB} вычислим, воспользовавшись формулой (2.23):

$$L_{CB}, \text{ дБ} = 20 \lg(4\pi r / \lambda) - 10 \lg(G_1) - 10 \lg(G_2) = 144,77. \quad (8.5)$$

Задача 2. Радиолиния использует земную волну. Модель распространения радиоволн – двухлучевая, поляризация – горизонтальная. Технические характеристики: коэффициент усиления передающей антенны 8 дБ, мощность на входе передающей антенны 12 Вт, длина волны 30 см, высота подвеса передающей антенны 60 м, приемной – 20 м, расстояние между антеннами 8 км. Параметры почвы: $\varepsilon = 4, \sigma = 0,001$ См/м. Рассчитать: амплитуду напряженности поля E в точке приема. (Ответ: $E = 12,49$ мкВ/м).

Решение задачи

Постановка задачи представлена на рис. 8.1.

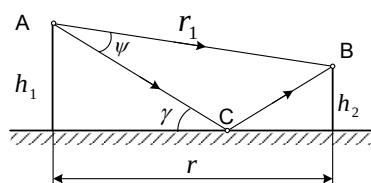


Рис. 8.1

Поскольку длина волны $\lambda = 0,3$ м, $h_1 = 60$ м, $h_2 = 20$ м, то выполняются условия «высоко поднятых антенн»: $h_1 \gg \lambda$, $h_2 \gg \lambda$.

Рассчитаем предельное расстояние прямой видимости по формуле (4.12):

$$r_{\text{ПР}} = 3,57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) = 43,6 \text{ км.} \quad (8.6)$$

Определим отношение длины радиолинии r к расстоянию прямой видимости $r_{\text{ПР}}$, то есть $r/r_{\text{ПР}} = 8/43,6 = 0,183$. Найденное отношение удовлетворяет условию $r < 0,2r_{\text{ПР}}$, при котором земную поверхность можно считать плоской, то есть не учитывать сферичность Земли.

Комплексная амплитуда напряженности электрического поля в точке приема определяется формулой (3.7):

$$\dot{E}_m = \dot{E}_m^{\text{ПР}} + \dot{E}_m^{\text{ОТР}} = (\sqrt{60PG}/r)(1 + Re^{-j(k\Delta r - \theta)})e^{-jkr}. \quad (8.7)$$

В этой формуле пока не определены значения: $\Delta r, R, \theta$. Величин Δr – разность длин путей, проходимых прямой волной и волной отраженной, (3.8):

$$\Delta r \approx 2h_1h_2/r = 0,3 \text{ м.} \quad (8.8)$$

Величины R и θ модуль и фаза коэффициента отражения $\tilde{R}$ горизонтально поляризованной волны от плоской земной поверхности (3.13):

$$\tilde{R} = (\sin \gamma - \sqrt{\tilde{\epsilon} - (\cos \gamma)^2}) / (\sin \gamma + \sqrt{\tilde{\epsilon} - (\cos \gamma)^2}) = Re^{j\theta}. \quad (8.9)$$

В этом выражении:

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon - j60\lambda \sigma = 4 - j60 \cdot 0,3 \cdot 0,001 = 4 - j0,018, \quad (8.10)$$

$$\gamma = \arctg[(h_1 + h_2)/r] = 0,01. \quad (8.11)$$

Подставив значения $\tilde{\epsilon}$ и γ в (8.9), получим:

$$\tilde{R} = -0,989 + j3,42 \cdot 10^{-5} = 0,989e^{j\pi}. \quad (8.12)$$

Обратим внимание, что значение фазы следует вычислять с учетом соотношения (3.16) настоящего учебного пособия.

В формулу (8.7) коэффициент усиления G нельзя подставлять в децибелах – следует перейти к безразмерному представлению:

$$G = 10^{(G, \text{дБ})/10} = 6,31. \quad (8.13)$$

Значение искомой амплитуды напряженности поля определяется, исходя из (8.7), выражением:

$$\begin{aligned} E_m &= \left(\sqrt{60PG}/r \right) |1 + Re^{-j(k\Delta r - \theta)}| = \\ &= 1,249 \cdot 10^{-5} \text{ В/м} = 12,49 \text{ мкВ/м.} \end{aligned} \quad (8.14)$$

Задача 3. Рассчитать предельное расстояние прямой видимости при следующих исходных данных: высота подвеса передающей антенны 90 м, высота подвеса приемной антенны 60 м, тропосфера характеризуется вертикальным градиентом диэлектрической проницаемости «стандартной радиосферы». (Ответ: 71 км).

Решение задачи

С учетом рефракции предельное расстояние прямой видимости можно определить по формулам (4.5) и (4.6):

$$r_{\text{ПР}} = \sqrt{2 a_{\text{ЗМ}} / (1 + a_{\text{ЗМ}} \cdot g^T / 2)} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}). \quad (8.15)$$

Для стандартной радиоатмосферы вертикальный градиент диэлектрической проницаемости $g^T = -7,85 \cdot 10^{-8} \text{ 1/м}$.

Радиус Земли $a_{\text{ЗМ}} = 6370 \cdot 10^3 \text{ м}$, высоты антенн: $h_1 = 90 \text{ м}$, $h_2 = 60 \text{ м}$.

Подставляя исходные данные в формулу (8.15), получим:

$$r_{\text{ПР}} = \sqrt{2 \cdot 6370 \cdot 10^3 / (1 + 6370 \cdot 10^3 \cdot (-7,85 \cdot 10^{-8}) / 2)} \cdot (\sqrt{90} + \sqrt{60}) = 71026 \text{ м} \approx 71 \text{ км}.$$

Задача 4. Линия радиосвязи на частоте 20 ГГц обеспечивает связь на расстоянии 15 км при отсутствии осадков в виде дождя. Определить максимальное расстояние, при котором сохранится прежний уровень сигнала в условиях дождя с интенсивностью 20 мм/час. (Ответ: $r = 1,71 \text{ км}$).

Решение задачи

Исходное выражение для расчета (4.9):

$$E = (\sqrt{60PG}/r) \cdot 10^{-\frac{\gamma_D l_D}{20}}. \quad (8.16)$$

В этой формуле первый множитель $\sqrt{60PG}/r$ соответствует амплитуде поля в условиях свободного пространства (P – мощность на входе антенны, G – коэффициент усиления антенны, r – длина трассы). Второй множитель $10^{-\frac{\gamma_D l_D}{20}}$ определяет ослабление поля свободного пространства из-за выпадающего дождя – это множитель ослабления в дожде.

Значение погонного ослабления радиоволны в дожде определяются по формуле (4.11):

$$\gamma_D = k I_D^\alpha. \quad (8.17)$$

Значения коэффициентов k и α находим в табл. 4.1: $k = 0,094$, $\alpha = 1,018$.

Вычисляем погонное ослабление:

$$\gamma_D = k I_D^\alpha = 0,094 \cdot 20^{1,018} = 1,984 \text{ дБ/км}. \quad (8.18)$$

Эффективную длину трассы дождя рассчитываем по формуле (4.13):

$$l_D = r_{\text{ЭД}} = k_r r. \quad (8.19)$$

В табл. 4.2 находим коэффициент $k_r = 0,634$.

Таким образом, эффективная длина трассы:

$$l_D = r_{\text{ЭД}} = 0,634 \cdot 15 = 9,51 \text{ км}. \quad (8.20)$$

Множитель ослабления в дожде:

$$V_D = 10^{-\frac{\gamma_{ДЛД}}{20}} = 10^{-(1,984 \cdot 9,51/20)} = 0,114. \quad (8.21)$$

При отсутствии дождя амплитуда напряженности поля:

$$E_0 = (\sqrt{60PG}/r). \quad (8.22)$$

В условиях дождя уровень поля, определяемый формулой (8.22) для расстояния r , будет наблюдаться при меньшем расстоянии r_1 (из-за множителя ослабления в дожде):

$$E_D = (\sqrt{60PG} / r_1) \cdot V_D. \quad (8.23)$$

По условию задачи $E_0 = E_D$. Приравняв (8.22) и (8.23), получим:

$$r_1 = r \cdot V_D = 15 \cdot 0,114 = 1,709 \text{ км.}$$

Задача 5. Определить с какой вероятностью будет превышать пороговый уровень действующего значения напряженности поля $E_{\Pi} = 80$ дБ/мкВ/м в условиях медленных замираний, если медианное значение уровня поля $E_M = 93,98$ дБ/мкВ/м, а стандартное отклонение $\sigma = 6$ дБ. (Ответ: $P(E > 80) = 0,99$).

Решение задачи

Медленные замирания аппроксимируются логарифмически нормальной функцией распределения (7.7), (7.8):

$$P(E > E_{\Pi}) = 0,5 - 0,5 \operatorname{erf}(x/\sqrt{2}), \quad (8.24)$$

где

$$\operatorname{erf}(x/\sqrt{2}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x/\sqrt{2}} \exp(-t^2) dt. \quad (8.25)$$

Найдем по формуле (7.4) значение x , входящее в верхний предел интеграла в формуле (8.25):

$$x = 20 (\lg(E_{\Pi}) - \lg(E_M)) / \sigma = (80 - 93,98) / 6 = -2,33. \quad (8.26)$$

С помощью пакета Mathcad [16] вычисляем значение встроеной функции:

$$\operatorname{erf}(x/\sqrt{2}) = \operatorname{erf}((-2,33)/\sqrt{2}) = -0,98. \quad (8.27)$$

Искомую вероятность определяем по формуле (8.24):

$$P(E > E_{\Pi}) = 0,5 - 0,5 \operatorname{erf}(x/\sqrt{2}) = 0,5 - 0,5 \cdot (-0,98) = 0,99. \quad (8.28)$$

Задача 6. Рассчитать методом Окумура-Хата требуемое значение эффективно излучаемой мощности для обеспечения среднего (медианного) уровня действующей напряженности электрического поля 28,169 дБ/мкВ/м в условиях города. Расстояние между базовой и мобильной станциями 20 км. Рабочая частота 900 МГц. Высота подвеса антенны базовой станции – 50 м.

Высота расположения антенны мобильной станции 1,5 м. (Ответ: $P_{\text{эфф}} = 26,99$ дБ).

Решение задачи

Воспользуемся формулой (6.3) и найдем из неё эффективно излучаемую мощность $P_{\text{эфф}}$:

$$P_{\text{эфф}} = P_{\text{БС}} + G_{\text{БС}} = E - 39,82 + 6,16 \cdot \lg(f) - 13,82 \cdot \lg(h_{\text{БС}}) - a(h_{\text{МС}}) + (44,9 - 6,55 \cdot \lg(h_{\text{БС}})) \lg(r), \text{ дБ}, \quad (8.29)$$

где:

$P_{\text{БС}}$ – мощность на входе передающей антенны базовой станции (дБВт);

$G_{\text{БС}}$ – коэффициент усиления передающей антенны базовой станции (дБд);

$E = 28,169$ дБ/мкВ/м – требуемое среднее (медианное) значение уровня действующей напряженности электрического поля;

$$a(h_{\text{МС}}) = (1,1 \cdot \lg(f) - 0,7)h_{\text{БС}} - (1,56 \cdot \lg(f) - 0,8);$$

$$r = 20 \text{ км}; f = 900 \text{ МГц}; h_{\text{БС}} = 50 \text{ м}; h_{\text{МС}} = 1,5 \text{ м}.$$

Рассчитаем значение $a(h_{\text{МС}})$, входящее в (8.29):

$$a(h_{\text{МС}}) = (1,1 \cdot \lg(900) - 0,7)50 - (1,56 \cdot \lg(900) - 0,8) = 0,016, \text{ дБ}$$

Подставим исходные и рассчитанные данные в (8.29) и получим:

$$P_{\text{эфф}} = P_{\text{БС}} + G_{\text{БС}} = 28,169 - 39,82 + 6,16 \cdot \lg(900) - 13,82 \cdot \lg(50) - 0,016 + (44,9 - 6,55 \cdot \lg(50)) \lg(20) = 26,99 \text{ дБ}.$$

9. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какими материальными параметрами характеризуется свободное пространство?

2. Поясните смысл терминов теории распространения радиоволн: «потери при передаче», «основные потери при передаче», «дополнительные потери при передаче».

3. Что понимается в теории распространения радиоволн под множителем ослабления?

4. Какова пространственная форма области, которая является существенной для распространения радиоволн?

4. Какими параметрами нужно располагать, чтобы рассчитать коэффициент отражения плоской волны от поверхности Земли?

6. В чем сущность двухлучевой модели распространения земной волны?

7. Факторы, определяющие предельное расстояние прямой видимости на радиолиниях с использованием земной волны при высоко поднятых антеннах.

8. Каков механизм распространения радиоволн над земной поверхностью на радиолиниях с низко поднятыми антеннами?
9. Какая характеристика тропосферы предопределяет явление рефракции?
10. Какие величины являются ключевыми для оценки дополнительных потерь при распространении радиоволн в реальной атмосфере?
11. Поясните сущность процесса дальнего тропосферного распространения радиоволн.
12. Поясните механизм распространения радиоволн за счет отражения в ионосфере.
13. Поясните смысл понятий, характерных для связи с использованием ионосферных волн: «критическая частота», «предельная частота», «максимальная применимая частота», «наименьшая применимая частота», «оптимальная рабочая частота».
14. В чем заключается специфика распространения радиоволн в условиях города?
15. Какие технические характеристики радиолинии подвижной радиосвязи влияют на медианные потери передачи при распространении радиоволн в условиях города?
16. Какова природа быстрых замираний уровня сигнала в точке его приема?
17. Какова природа медленных замираний уровня сигнала в точке его приема?

ЛИТЕРАТУРА

1. *ГОСТ 24375 – 80. Радиосвязь. Термины и определения.*
2. *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. 3-е издание — М.: Горячая линия — Телеком, 2007. — 491 с.: ил.*
3. *Докучаев В.А, Иванова О.Н., Красавина З.А. Толковый словарь терминов по системам, средствам и услугам связи. Учебное пособие для вузов / Под ред. В.А. Докучаева. — М.: Радио и связь, 2003. — 548 с.*
4. *Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. Учебное пособие. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», — М.: 1973 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 С.Б. Раевского. Изд. 4-е, доп. и перераб. — М.: Радиотехника, 2009. — 744 с., ил.*

6. *Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов А.Д.* Техническая электродинамика. Учебное пособие для вузов /Под ред. Ю.В. Пименова. — М.: Радио и связь, 2000. — 536 с.
7. Рекомендация МСЭ-R P.368-9. 02-2012. Кривые распространения земной волны для частот между 10 кГц и 30 МГц.
8. Рекомендация МСЭ-R P.838-3. 03-2005. Модель погонного ослабления в дожде, используемая в методах прогнозирования.
9. Рекомендация МСЭ-R P.530-13 10-2009. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования наземных систем прямой видимости.
10. Рекомендация МСЭ-R P.840-5. 02-2012. Ослабление за счет облаков и тумана.
11. Рекомендация МСЭ-R P.676-9. 02-2012. Затухание в атмосферных газах.
12. *Закиров З.Г., Надеев А.Ф., Файзуллин Р.Р.* Сотовая связь стандарта GSM. Современное состояние, переход к сетям третьего поколения. — М.: Эко-Трендз, 2004. — 264 с.
13. Рекомендация МСЭ-R P.1546-4. 04-2009. Метод прогнозирования для трасс связи «пункта с зоной» для наземных служб в диапазоне частот от 300 МГц до 3000 МГц.
14. *Серов В.В.* Особенности распространения радиоволн в загоризонтных системах радиосвязи // Электросвязь. — 2009. — № 1.
15. *Сомов А.М., Старостин В.В.* Распространение радиоволн: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальностям в обл. информ. безопасности / — М.: Гелиос АРВ, 2010. — 264 с.
16. *Очков В.Ф.* Mathcad 14 для студентов и инженеров: русская версия. — СПб.: БХВ-Петербург, 2009. — 512 с.: ил.
17. *Калинин А.И., Черенкова Е.Л.* Распространение радиоволн и работа радиолиний. — М.: Связь. 1971. — 438 с.
18. *Нефедов Е.И.* Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства. Учебное пособие для студентов высш. учеб. заведений/. — М.: Издательский центр «Академия», 2010. — 320 с.: ил.
19. *Долуханов М.П.* Распространение радиоволн. Учебник для вузов. — М., «Связь», 1972. 336 с.
20. <http://telecomproject.tripod.com/mod.htm> Модели распространения радиоволн.
21. *Кубанов В.П.* Антенны и фидеры — назначение и параметры. Учебное пособие для вузов. — Самара, ПГУТИ, 2012. — 60 с.: ил.

В.П. Кубанов

**ВЛИЯНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение
высшего профессионального образования
«Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»
443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23

Подписано в печать: 6.12.13 г. Формат 60х84/16
Бумага офсетная №1. Гарнитура Таймс.
Заказ 1662. Печать оперативная. Усл. печ. л. 5,24. Тираж 100 экз.

Отпечатано в издательстве учебной и научной литературы
Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики
443090, г. Самара, Московское шоссе, 77, т. (846) 228-00-44