

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

А.С. Шостак

Учебно-методическое пособие

ПО КУРСУ “ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИО-
ВОЛН”

2018

Рецензент: профессор кафедры КИПР ТУСУР, д. т. н. Масалов Е.В.

Технический редактор: студент 4 курса каф. КИПР ТУСУР, Горелкин И.И.

А.С. Шостак. Учебно-методическое пособие
по курсу “Электродинамика и распространение радиоволн
“Микроволновые антенны и устройства СВЧ”
Томск: Томский государственный университет систем управления и радио-
электроники, 2018 –120 с.

Учебно-методическое пособие курса «Электродинамика и распространение радиоволн». В ней рассмотрены физические процессы, происходящие при распространении радиоволн вблизи поверхности и в атмосфере Земли, а также на космических трассах. Рассмотрены особенности распространения радиоволн различных диапазонов.

Пособие содержит курс лекций “Основы электродинамики и распространение радиоволн Часть 2. Распространение радиоволн”, содержит набор задач по дисциплине, а также проверочные тесты по всему курсу. Пособие может быть полезно для смежных дисциплин радиотехнического профиля.

© А.С. Шостак 2018

© Кафедра КИПР Томского государственного
университета систем управления и
радиоэлектроники, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

1	ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН	5
[1-4]		
	1.1 Классификация радиоволн по диапазонам	5
	1.2 Краткая характеристика радиотрасс.....	6
	1.3 Электродинамические свойства природных сред.....	8
	1.4 Типы радиолиний	16
	1.5 Распространение радиоволн в свободном пространстве	18
	1.6 Особенности распространения радиоволн на реальных трассах .	20
	1.7 Область пространства, существенно участвующая в формировании поля на заданной линии	23
2	РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗЕМНОЙ ВОЛНЫ [1-4]	27
	2.1 Физические процессы при распространении земной волны	27
	2.2 Поле излучателя в освещенной зоне в приближении плоской Земли [2].....	30
	2.2.1 Интерференционный множитель с учетом сферичности Земли.....	33
	2.3 Поле низко расположенного излучателя в зоне приближения плоской Земли.....	34
	2.4 Поле в зонах полутени и тени при высоко поднятых и низко расположенных излучателях	36
3	РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН В ЗЕМНОЙ	39
АТМОСФЕРЕ [1,2]		
	3.1 Электрические свойства тропосферы и ионосферы	39
	3.1.1 Распределение заряженных частиц в ионосфере	39
	3.1.2 Диэлектрическая проницаемость и проводимость ионосферы 41	41
	3.1.3 Диэлектрические свойства тропосферы	45
	3.2 Преломление радиоволн	48
	3.2.1 Общий подход к вопросам распространения радиоволн в атмосфере	48
	3.2.2 Траектория волны. Радиус кривизны траектории	49
	3.2.3 Траектория радиоволн в ионосфере	54
4	ДИАПАЗОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ	58
РАДИОВОЛН [1, 2]		
	4.1 Распространение сверхдлинных и длинных радиоволн.....	58
	4.2 Особенности распространения средних волн	59
	4.3 Распространение коротких волн	59

4.4 Распространение ультракоротких волн на наземных радиоприемниках	63
---	----

5 РАСПРОСТРАНЕНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ ВОЛН НА КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛИНИЯХ.....	70
5.1 Особенности спутниковой связи	70
5.2 Потери в тракте распространения	71
5.3 Энергетические соотношения на космических радиоприемниках.....	74
5.4 Особенности распространения волн оптического диапазона.....	76
5.4.1 Общие вопросы распространения волн оптического диапазона.....	76
5.4.2 Ослабление волн оптического диапазона в атмосфере.....	76
5.4.3 Нелинейные эффекты в атмосфере при распространении лазерного излучения	79
6 ЗАДАЧИ. РАДИОВОЛНЫ В МАТЕРИАЛЬНЫХ СРЕДАХ	81
6.1 Основные формулы	81
6.2 Примеры решения типовых задач	84
6.3 Задачи для самостоятельного решения.....	87
7 ЗАДАЧИ. ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНОВ	91
7.1 Основные формулы.....	91
7.2 Примеры решения типовых задач	101
7.3 Задачи для самостоятельного решения.....	106
8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО КУРСУ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН	112
Тема 1. Элементы векторного анализа.....	112
Тема 2. Основные положения теории электромагнетизма.....	113
Тема 3. Уравнения Максвелла.....	113
Тема 4. Плоские электромагнитные волны	115
Тема 5. Граничные условия для векторов электромагнитного поля	116
Тема 6. Радиоволны в материальных средах.....	117
Тема 7. Особенности распространения радиоволн различных диапазонов.....	118
9. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	119

1 . ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН [1-4]

1.1 Классификация радиоволн по диапазонам

В соответствии с Регламентом радиосвязи к радиоволнам (радиодиапазону) относят ЭМ волны с частотами от 3 кГц до 3 ТГц. Распределение радиоспектра по диапазонам приведено в таблице 2.1, в которой указаны их названия и принятые сокращенные обозначения.

Применение радиоволн в радиосвязи, радионавигации, радиолокации, космической радиосвязи и управлении космическими аппаратами, в медицине и биологии, измерительной технике, технологии и т.д. стимулировало развитие электродинамики. В свою очередь радиотехника и радиофизика являются опытной базой для электродинамики.

Основные параметры радиотехнического устройства, применяемого для излучения, канализации или приема ЭМ волн, зависят от отношения геометрических размеров устройства к длине волны. Часто эти размеры должны быть равны сотням и даже тысячам длин волн. Ясно, что для уменьшения габаритов, веса, стоимости устройства, повышения информационной емкости каналов связи и т.д. желательно использовать ЭМ волны с возможно меньшими длинами волн. Однако при этом могут возрасти стоимость генераторов ЭМ энергии, технические трудности реализации устройств (например, механические допуски на изготовление устройства определяются длиной волны – λ), стоимость устройств обработки сигнала (радиоприемника). Следует иметь в виду, что радиоволны разных диапазонов по-разному затухают при распространении в природных условиях или при их канализации по направляющим структурам.

Схемотехнические радиотехнические расчеты в полосах 4...8 радиодиапазона (таблица 2.1) базируются на теории цепей с сосредоточенными параметрами. Применяются первый и второй законы Кирхгофа и понятия емкости, индуктивности, сопротивления. Элементы цепи, их реализующие, имеют геометрические размеры L , значительно меньшие длины волны λ . При этом пренебрежимо мало излучение ЭМ поля каждым элементом цепи. Но это условие можно выполнить только при (сравнительно) больших значениях λ , т.е. при (относительно) малых частотах, когда векторы ЭМ поля (и токи в цепи) во времени меняются медленно. Это условие ($L \ll \lambda$) называют *условием квазистационарности*. Уже начиная с 8-й полосы (диапазона метровых волн), условие квазистационарности выполнить трудно и расчеты радиотехнических устройств должны основываться на методах электродинамики.

К таким устройствам относятся объемные резонаторы, направляющие и замедляющие структуры, согласующие устройства, фильтры, циркуляторы, гираторы, антенны, поляризаторы, отражатели ЭМ волн и др.

Таблица 1.1

Распределение радиоспектра по диапазонам

Номер полосы	Границы диапазона по частотам и по длинам волн	Название диапазона по частотам и по длинам волн	Сокращенное обозначение	
			русское	международное
4	3...30 кГц 100...10 км	Очень низкие частоты. Мириаметровые волны (сверхдлинные волны)	ОНЧ (СДВ)	VLF
5	30...300 кГц 10...1 км	Низкие частоты. Километровые волны (длинные волны)	НЧ (ДВ)	LF
6	300...3000 кГц 1000...100 м	Средние частоты. Гектометровые волны (средние волны)	СЧ (СВ)	MF
7	3...30 МГц 100...10 м	Высокие частоты. Декаметровые волны (короткие волны)	ВЧ (КВ)	HF
8	30...300 МГц 10...1 м	Очень высокие частоты. Метровые волны (ультракороткие волны)	ОВЧ (УКВ)	VHF
9	300...3000 МГц 100...10 см	Ультравысокие частоты. Дециметровые волны (ультракороткие волны)	УВЧ (УКВ)	UHF
10	3...30 ГГц 10...1 см	Сверхвысокие частоты. Сантиметровые волны (ультракороткие волны)	СВЧ (УКВ)	SHF
11	30...300 ГГц 10...1 мм	Крайне высокие частоты. Миллиметровые волны	КВЧ	EHF
12	300...3000 ГГц 1...0.1 мм	Гипервысокие частоты. Децимиллиметровые волны	ГВЧ	---

1.2 Краткая характеристика радиотрасс

Для передачи сигналов от радиопередающей антенны (излучателя) к радиоприемной антенне в качестве линий передачи энергии часто используют естественную среду. Линию передачи при этом называют *естественной радиотрассой* или *радиолинией*. ЭМ волны распространяются в приповерхност-

ных толщах Земли, атмосфере или космическом пространстве. Параметры среды зависят от частоты ЭМ поля, температуры, влажности почвы, времени суток и года и т.д. Под влиянием среды в распространяющемся ЭМ поле по сравнению со свободным пространством изменяются амплитуда, фаза, групповая и фазовая скорости, фронт волны (направление распространения), поляризационные характеристики.

При расчете радиолиний возникают следующие основные задачи:

а) расчет напряженности электрического (магнитного) поля или мощности на входе радиоприемного устройства при заданной мощности излучения (мощности радиопередающего устройства);

б) расчет необходимой ЭМ мощности излучения для обеспечения заданных значений напряженности ЭМ поля или мощности на входе радиоприемного устройства;

в) выбор оптимальной рабочей длины волны;

г) определение скорости распространения и направления прихода ЭМ поля;

д) изучение поляризационных характеристик и возможных искажений сигнала.

Принято измерять и рассчитывать напряженность электрического поля.

Параметры почвы, воды, льда, снега в приповерхностных слоях Земли или атмосферы зависят от многих факторов. Поэтому изучают влияние физических процессов на эти параметры. Математическая модель, учитывающая влияние всех физических процессов на параметры радиотрассы, а последних – на характеристики ЭМ поля, оказывается очень сложной. Поэтому ее строят для каждой конкретной радиотрассы, учитывая основные факторы, оказывающие воздействие на распространяющееся ЭМ поле.

ЭМ поле рассматривается в *дальней зоне излучателя*. Радиоволны, распространяющиеся на малом электрическом расстоянии от земли, называют *земными*. На их характеристики влияют относительная диэлектрическая проницаемость ϵ и проводимость σ приповерхностных слоев Земли, сферичность Земли и отклонения от сферичности (гладкости), параметры атмосферы. В математической модели первого приближения влияние атмосферы и сферичности Земли не учитываются, Земля считается локально плоской. Только математическая модель второго приближения учитывает влияние сферичности Земли. Затем в математическую модель вводится фактор, учитывающий параметры атмосферы.

В атмосфере Земли *нейтросфера* и *ионосфера* отличаются друг от друга электрическими свойствами. Поэтому они по-разному влияют на распространяющееся ЭМ поле. Нейтросфера состоит из нейтральных молекул газов. Это нижний слой атмосферы толщиной около 60 км, который делят на *тропосферу* и *стратосферу*.

Тропосфера – это приземный слой, имеющий толщину около 10...15 км, неоднородный в вертикальном и горизонтальном направлениях. Коэффи-

циент преломления тропосферы неоднороден, поэтому возможна *рефракция ЭМ поля*. На неоднородностях возможно *рассеяние ЭМ поля*. Эти явления обуславливают распространение *тропосферных волн*.

Так как плотность газов уменьшается с высотой, то в стратосфере ϵ близка к единице и мало зависит от каких-либо факторов, Поэтому стратосфера меньше, чем тропосфера, влияет на распространение радиоволн.

Ионосферой называют слой атмосферы от высоты, равной 60 км, до 20000 км над поверхностью Земли. Газ малой плотности в ней частично или полностью ионизирован. Образовавшаяся плазма с концентрацией электронов – $N_E = 10^3 \dots 10^6$ эл/см³ находится в постоянном магнитном поле Земли, N_E зависит от высоты. Поэтому возможны явления рефракции и отражения ЭМ поля в ионосфере. Ионосфера статистически неоднородная среда, коэффициент преломления ее меняется в вертикальном и горизонтальном направлениях. Поэтому возможно явление рассеяния ЭМ поля, что обуславливает возможность его распространения на большие расстояния. Радиоволны, распространяющиеся посредством отражения и рассеяния в ионосфере, называют *ионосферными*. На характеристики последних свойства тропосферы и приповерхностных слоев Земли мало влияют.

На высотах, равных 3...4 радиусам Земли, атмосфера переходит в межпланетную плазму, в которой газ полностью ионизирован, $N_E = 10 \dots 100$ эл/см³. Распространение ЭМ поля в космическом пространстве изучается отдельно.

Таким образом, *возможно построение математических моделей, изучающих раздельно влияние на распространяющееся ЭМ поле приповерхностного слоя Земли, тропосферы, ионосферы, межпланетной плазмы.*

1.3 Электродинамические свойства природных сред

Электродинамические параметры земной поверхности оказывают существенное влияние на распространение *земных волн*.

В земных условиях волны распространяются над той или иной подстилающей поверхностью (почва, скальный грунт, лес, пресная или морская вода, лед и т.д.). Все эти материальные среды являются практически немагнитными, и их относительная магнитная проницаемость μ с достаточной для практики точностью может считаться равной единице. Основными параметрами материала подстилающей поверхности оказываются относительная диэлектрическая проницаемость ϵ и удельная электрическая проводимость σ . Как показывают эксперименты, оба эти параметра подвержены частотной дисперсии, которая, однако, выражена достаточно слабо. В таблице 2.2 приводятся числовые данные для наиболее распространенных сред применительно к частотам ниже 300 МГц.

Таблица 1.2

Электродинамические параметры подстилающих сред

Среда	ϵ	σ , См/м
Морская вода	75	1...6
Пресная вода	80	$10^{-2} \dots 3 \cdot 10^{-2}$
Влажная почва	20...30	$2 \cdot 10^{-2} \dots 0.1$
Сухая почва	3...5	$10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-2}$
Лед	4...5	$2 \cdot 10^{-2} \dots 0.1$
Снег	1.2	10^{-5}
Лес	1.04	$10^{-6} \dots 10^{-5}$

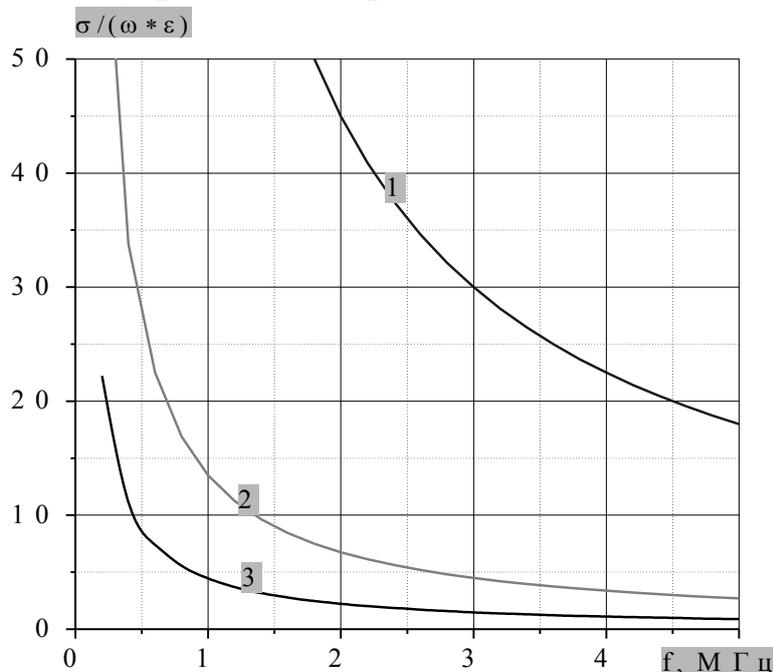
Нужно заметить, что подобные параметры, часто встречающиеся в литературе по распространению радиоволн и по радиолокации, описывают усредненные характеристики, получаемые на основе многочисленных измерений, проводимых в различных географических и метеорологических условиях. Достоверность таких цифр применительно к отдельно взятому конкретному эксперименту не слишком высока и дает возможность проводить лишь ориентировочные расчеты, которые, тем не менее, во многих случаях удовлетворяют практическим запросам.

Как известно, обобщающей числовой характеристикой немагнитной материальной среды с омическими потерями служит комплексная диэлектрическая проницаемость – $\tilde{\epsilon} = \epsilon\epsilon_0 - j \frac{\sigma}{\omega}$.

Вещественная часть этого комплексного числа пропорциональна суммарной плотности тока смещения и тока поляризации, в то время как мнимая часть характеризует объемную плотность токов проводимости. Можно заметить, что с понижением рабочей частоты ω относительная доля токов проводимости непрерывно возрастает, и при $\omega \rightarrow 0$ материальная среда с потерями становится металлоподобной.

В грубом приближении при расчете радиолиний низкочастотных диапазонов (с частотами менее 1 МГц) земную поверхность можно приближенно считать идеально проводящей, что существенно упрощает решение любых задач о распространении радиоволн. С ростом рабочей частоты омические потери начинают сказываться все в большей степени. Это обстоятельство

приводит к дополнительному ослаблению радиоволн. В диапазоне УКВ большинство материальных сред, из которых сложена земная поверхность, могут рассматриваться как несовершенные диэлектрики, у которых действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости существенно превосходит мнимую часть. На рисунке 2.1 представлены расчеты отношения мнимой и действительной частей комплексной диэлектрической проницаемости $\frac{\sigma}{\epsilon \cdot \omega}$ от частоты (по данным таблицы 2.2). Приведенные графики позволяют утверждать, что для большинства земных покровов на частотах меньших 1 МГц токи проводимости более чем в 10 раз превышают токи смещения. Аналогичные расчеты для морской воды показали, что токи проводимости превышают токи смещения даже в диапазоне УКВ. Так на частоте 120 МГц токи проводимости в 10 раз превышают токи смещения. Для почв средней влажности в районе 5 МГц токи смещения и проводимости равны, на более высоких частотах токи смещения превышают токи смещения, и почвы ведут себя подобно полупроводящим средам.



1 – морская вода; 2 – влажная почва; 3 – сухая почва

Рисунок 2.1 - Зависимость $\frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon}$ от частоты

Чтобы учесть влияние тропосферы на распространение земной волны и рассчитать напряженность поля тропосферной волны, необходимо определить электродинамические параметры и построить математическую модель тропосферы. Деление атмосферы на нейтросферу, состоящую из тропосферы и стратосферы, и на ионосферу показано на рисунке 2.2, а, где h – высота над уровнем моря. Границы между ними по высоте выражены не резко и зависят от времени года, времени суток, географического положения.

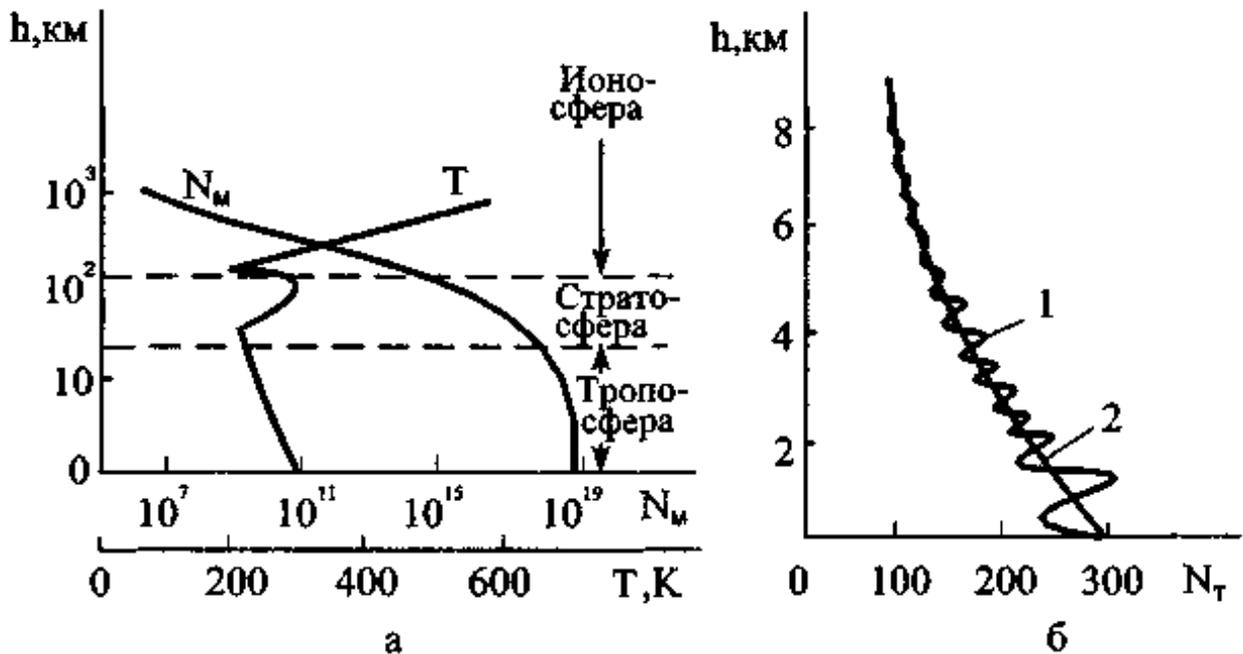


Рисунок 2.2 - Состав и свойства атмосферы

Газ в нейтросфере по объему состоит из примерно 78 % азота, 21 % молекулярного кислорода, 0.93 % аргона и очень малых количеств неона, гелия, криптона, ксенона, водорода, метана, углекислого газа, озона, закиси азота. В тропосфере имеется пыль и водяной пар. Содержание последнего (по объему 0...4 %) убывает с ростом h и зависит от метеорологических условий.

Плотность атмосферы N_M равна числу молекул в 1 см^3 на данной высоте h (рисунок 2.2, а) и связана с давлением p (в паскалях) и абсолютной температурой T законом:

$$N_M = \frac{p}{kT},$$

где $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

В однородной атмосфере давление зависит от высоты по барометрической формуле:

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{Mgh}{RT}\right),$$

где p_0 – давление вблизи поверхности Земли; M – масса грамм-молекулы газа; g – ускорение силы тяжести, $R = 8.32$ Дж/(К·моль) – универсальная газовая постоянная.

Температура воздуха меняется с высотой (рисунок 2.2, а). В тропосфере воздух нагревается от поверхности Земли и обычно температура убывает с ростом h на 5...6 °С на км. На небольших интервалах высот может возникнуть местное возрастание температуры – температурная инверсия. Увеличение температуры на высотах около 60 км объясняется поглощением озоном

ультрафиолетового излучения Солнца. Затем температура снова понижается до высоты 80 км и после этого второго минимума плавно возрастает, достигая значений 2000...3000 К на высоте 500...600 км. Возрастание температуры в области ионосферы объясняется тем, что нагревание воздуха здесь происходит непосредственно за счет нагревания солнца.

В тропосфере непрерывно происходят случайные изменения, вызываемые воздушными потоками в вертикальном и горизонтальном направлениях (рисунок 2.2, б). Движение воздуха носит вихревой, турбулентный характер. При этом скорости перемещения воздуха в локальных областях (1) отличаются от средней (2). Поэтому и плотности воздуха в этих областях отличаются от средней, причем они флуктуируют. В стратосфере плотность газа значительно меньше, чем в тропосфере. Поэтому стратосфера мало влияет на распространение радиоволн, и ниже рассматриваются модели для изучения влияния только тропосферы.

Диэлектрическая проницаемость тропосферы ε только приближенно может считаться равной электрической постоянной ε_0 . В действительности значение ε несколько больше единицы и зависит от давления, температуры и влажности воздуха.

Из курса теории поля известно, что вектор электрического смещения \overline{D} связан с вектором напряженности электрического поля \overline{E} соотношением:

$$\overline{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \overline{E} = \varepsilon_0 \overline{E} + \overline{p}_\varepsilon,$$

где \overline{p}_ε – момент поляризации единицы объема вещества.

В изотропных средах, где диэлектрическая проницаемость не зависит от направления распространения волны, справедливо скалярное соотношение:

$$D = \varepsilon \varepsilon_0 E = \varepsilon_0 E + p_\varepsilon = \varepsilon_0 E + k_\varepsilon E, \quad (1.1)$$

где k_ε – поляризуемость вещества. Из выражения (2.1) следует, что:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 + k_\varepsilon \Rightarrow \varepsilon = 1 + \frac{k_\varepsilon}{\varepsilon_0}.$$

Представив воздух как смесь сухих газов и водяного пара, получим выражение для относительной диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon = 1 + \left[\frac{157}{E} + \left(p + \frac{4800 p_n}{T} \right) \right] \cdot 10^{-6} \quad (1.2)$$

Значение ε очень незначительно превышает единицу, а потери в тропосфере (следовательно, и проводимость) существенны только в диапазоне сантиметровых и более коротких волн. Поэтому коэффициент преломления тропосферы можно выразить следующим образом:

$$n \approx \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{(\varepsilon - 1) + 1} \approx 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \Rightarrow (n - 1) \approx \frac{\varepsilon - 1}{2}.$$

С учетом выражения (2.2):

$$n = 1 + \left[\frac{78.5}{T} + \left(p + \frac{4800 p_n}{T} \right) \right] \cdot 10^{-6}.$$

Коэффициент преломления тропосферы не зависит от частоты для длин волн более 1 см. Для волн миллиметрового диапазона существенно сказываются потери, что можно учесть путем введения комплексной диэлектрической проницаемости воздуха. Тогда показатель преломления n будет зависеть от частоты.

В силу малого отличия n от единицы удобнее пользоваться величиной $N = (n - 1) \cdot 10^6$, называемой индексом преломления тропосферы. Вблизи земной поверхности индекс преломления зависит от климатических и метеорологических условий и колеблется в пределах 260...460 (на рисунке 2.2, б, N_T).

В среднем значение N изменяется с высотой линейно, причем для средних широт градиент изменения N с высотой составляет:

$$\frac{dN}{dh} = -40 \text{ км}^{-1} \text{ или } \frac{dn}{dh} = -4 \cdot 10^{-5} \text{ км}^{-1}.$$

Условия, при которых индекс преломления изменяется по такому закону, соответствуют, так называемой, нормальной тропосфере. На высоте 9 км значение $N = 109$ и постоянно в течение года на всем земном шаре.

В реальных условиях часто наблюдается нерегулярное изменение метеорологических параметров T , p , p_n с высотой, что приводит к сложной зависимости N от высоты.

При распространении радиоволн в тропосфере ослабление напряженности поля испытывают только радиоволны дециметрового и более коротковолновых диапазонов. Ослабление напряженности поля радиоволн связано с частичным преобразованием электромагнитной энергии в другие виды энергии и с рассеянием; это ослабление проявляется в уменьшении уровня напряженности поля проходящей волны.

Для учета влияния ослабления в формулы, выражающие зависимость напряженности поля от расстояния, вводится экспоненциальный множитель:

$$E = E_0 \cdot \exp(-\alpha_T T),$$

где E_0 – напряженность поля без учета поглощения; α_T – коэффициент поглощения радиоволн в тропосфере.

Основной причиной поглощения радиоволн в тропосфере является наличие капель воды, присутствующих здесь в виде тумана или дождя. При рассмотрении процесса поглощения различают два явления: поглощение радиоволн капельками воды и рассеяние их в скоплении капель воды.

Поглощение радиоволн капельками воды происходит благодаря тому, что при прохождении радиоволн в каждой капельке наводятся токи поляризации. Диэлектрическая проницаемость воды велика (см. таблицу 2.2), поэтому плотность токов поляризации имеет значительную величину, увеличивающуюся с повышением частоты проходящей радиоволны. Вода не является

идеальным диэлектриком, и образующиеся в каплях воды токи поляризации вызывают тепловые потери, которые увеличиваются с повышением частоты.

Рассеяние радиоволн капельками воды также приводит к ослаблению поля проходящей волны. Физика процесса заключается в том, что токи, наведенные радиоволной в капельках, излучают, причем каждая капелька излучает равномерно во все стороны. Это приводит к рассеянию энергии радиоволны, поскольку не вся энергия движется в первоначальном направлении: часть ее оказывается направленной в сторону или в обратном направлении. Рассеяние радиоволн характеризуется коэффициентом рассеяния, который определяется как отношение энергии, рассеянной единицей объема, заполненного каплями, к энергии проходящей волны. Коэффициент рассеяния тем больше, чем крупнее капля и чем короче длина волны.

Суммарный коэффициент поглощения с учетом тепловых потерь и рассеяния определяют расчетным путем и проверяют экспериментально. Обычно определяют коэффициент поглощения радиоволн в децибелах, связанный с α_T соотношением – *погонное затухание*:

$$\Gamma_{TP} = 20 \lg \frac{E}{E_0} = 20 \lg(e^{\alpha_T}) = 8.6 \alpha_T \cdot 10^3 \left[\frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right]$$

Расчетная зависимость Γ_{TP} от длины волны для прохождения радиоволн в дожде и тумане различной интенсивности представлена на рисунке 2.3.

Из графика видно, что поглощение резко уменьшается с увеличением длины волны и становится ничтожно малым для волн длиннее 10 см.

Кроме рассмотренных видов поглощения, миллиметровые волны испытывают добавочное поглощение в молекулах водяного пара и кислорода. Это поглощение связано с тем, что молекулы H_2O обладают постоянными электрическими моментами, а молекулы O_2 – магнитными моментами. Электромагнитное поле проходящей волны приводит в колебание молекулы, причем, когда частота волны совпадает с собственной частотой молекул, возникают резонансные явления и энергия волны переходит во внутримолекулярную энергию. Это приводит к селективному поглощению волн определенной частоты. Зависимость поглощения такого вида от длины волны представлена на рисунке 2.4.

Из рисунка 2.4 видно, что интенсивное поглощение происходит на волнах 0.25 и 0.5 см для кислорода; 0.18 и 1.25 см – для водяного пара.

Радиоволны, испытывающие селективное поглощение, не применимы для передачи сигналов в тропосфере.

Сантиметровые радиоволны рассеиваются капельками дождя и тумана, что приводит к появлению отраженных радиолокационных сигналов. Наличие отражений от дождя и туч, занимающих большую площадь на экранах радиолокационных станций, часто мешает нормальной работе этих станций. Для ослабления отражений от дождя на радиолокационных станциях применяют радиоволны с круговой поляризацией. В этом случае, как показано на

рисунке 2.5, направление вращения вектора \vec{E} по отношению к антенне в излученной и отраженной волнах противоположно.

Поскольку поляризационные свойства антенны при передаче и приеме одинаковы, радиоволны с круговой поляризацией, при которой вектор \vec{E} вращается в обратную сторону, не принимаются на ту же антенну.

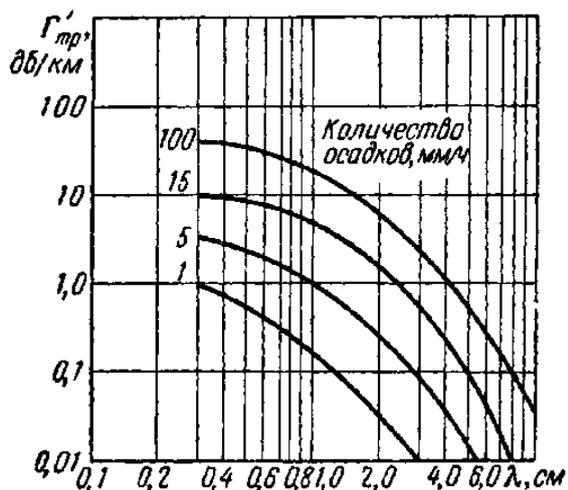


Рисунок 2.3 – Зависимость коэффициента поглощения радиоволн в дожде и тумане от длины волны

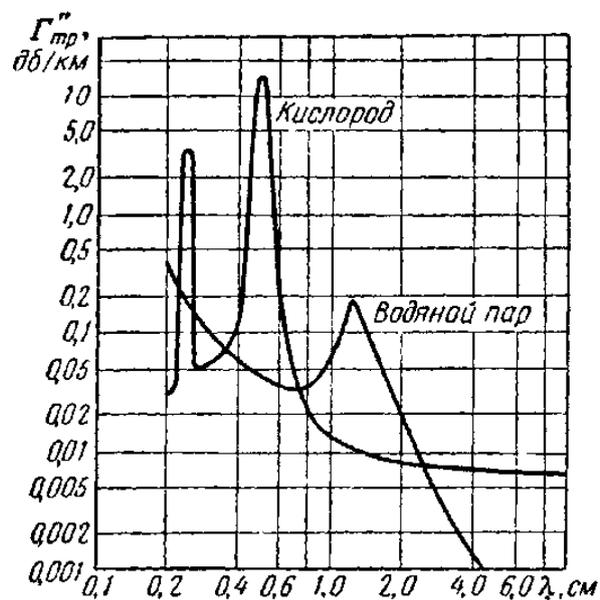


Рисунок 2.4. Зависимость поглощения в тропосфере от длины волны

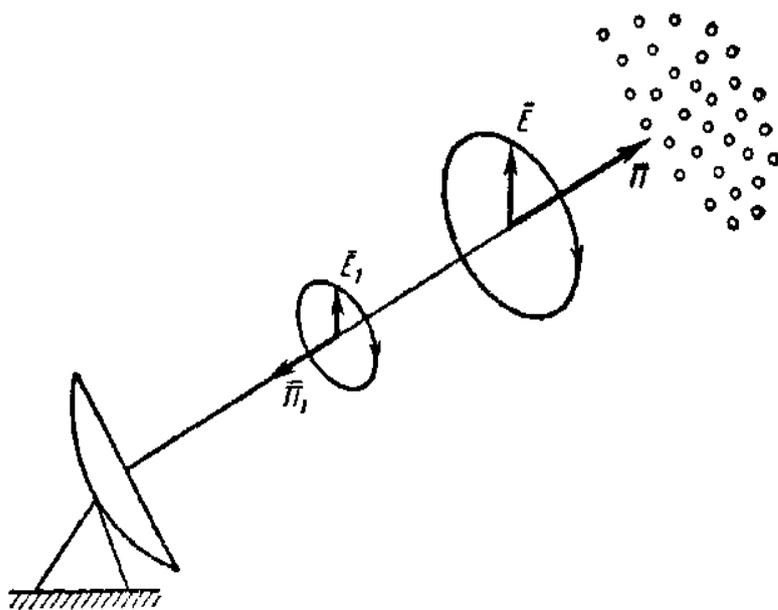


Рисунок 2.5. Изменение направления вращения вектора \vec{E} при отражении радиоволн от дождя

Сигналы, отраженные от дождя, в силу этого называются сильно ослабленными. В то же время радиоволны, отраженные от самолетов и других объектов несимметричной формы, имеют эллиптическую поляризацию и поэтому значительно лучше принимаются на эту антенну. Таким образом, применение круговой поляризации улучшает радиолокационную наблюдаемость нужных объектов на фоне сигналов, отраженных от скоплений дождевых капель.

Сигналы радиолокационных станций отражаются также от столбов ионизированного воздуха, образующихся вследствие разрядов молнии. Эти отражения длятся несколько миллисекунд.

1.4 Типы радиолиний

В современной радиоэлектронике находят обширное и многообразное применение свободно распространяющиеся радиоволны, в том числе для передачи на различные расстояния разного рода информации (радиосвязь, телевидение), для обнаружения и определения координат местоположения различных объектов (радиолокация), для управления на расстоянии различными устройствами и аппаратами (радиоуправление), для измерения расстояния и других целей. Свободно распространяющиеся радиоволны широко используются также в метеорологии при наблюдении за различными атмосферными образованиями, прогнозировании погоды и при исследовании верхних слоев атмосферы.

Кроме того, они применяются в радиоастрономии при изучении строения планет, звезд, туманностей и т.д.

Во всех перечисленных применениях свободно распространяющихся радиоволн общим является то, что для передачи информации служит линия радиосвязи или радиолиния. Каждая радиолиния состоит из передающей антенны, среды и приемной антенны. Создаваемые передатчиком электромагнитные колебания излучаются с помощью антенны в виде свободно распространяющихся радиоволн. Эти радиоволны распространяются в среде и затем воспринимаются приемной антенной. Таким образом, в отличие от проводной связи в радиолинии связующим звеном являются не провода (кабель и т.д.), а природная среда – атмосфера, земная поверхность или космическое пространство.

Радиолинии делят на две группы - первичные и вторичные.

В случае первичных радиолиний информация сообщается радиосигналу в процессе его формирования передающей станцией.

Изменения, которые вносятся средой в характеристики радиосигнала в процессе его распространения (например, вследствие рассеяния на неоднородностях атмосферы и на различных объектах, препятствиях), являются ме-

шающими для приема этого радиосигнала и выделения передаваемой им информации.

Простейшим примером первичной радиолинии является радиолиния, у которой излученный передающей антенной $A_{И}$ радиосигнал (рисунок 2.6, *а*) попадает непосредственно на приемную антенну $A_{ПР}$.

На рисунке 2.6, *б* приведен другой пример первичной радиолинии. В этом случае радиоволны, излучаемые передающей антенной, достигают приемной антенны вследствие отражения их от ионосферы.

Примером первичной радиолинии является также радиолиния связи наземной радиостанции с различными летательными, в том числе космическими аппаратами.

Разновидностью радиолиний первой группы является радиорелейная линия связи (рисунок 2.6, *в*), представляющая собой последовательную совокупность (цепочку) первичных радиолиний. Передаваемая по системе связи информация попадает на конечный пункт не непосредственно (из-за большой протяженности линии связи $A_{И} - A_{ПР}$), а через промежуточные станции A_1, A_2 и т.п., которые являются активными ретрансляторами. Радиосигнал, излучаемый антенной передающей станции или предыдущей промежуточной станции, воспринимается приемной антенной ретранслятора, усиливается и затем излучается (обычно на несколько измененной несущей частоте) с помощью передающей антенны ретранслятора в направлении на последующую соседнюю станцию.

Вторичные радиолинии характеризуются тем, что излучаемый передающей антенной $A_{И}$ радиосигнал не несет информации, и он непосредственно не попадает в пункт приема ($A_{ПР}$, рисунок 2.6, *г*). Излучаемые радиоволны, распространяясь в среде, падают на искусственный (например, самолет, рисунок 2.6, *г*) или естественный (например, грозовое облако) объект, который по электромагнитным параметрам отличается от окружающей среды. Такой объект рассеивает падающие радиоволны по различным направлениям, т.е. создает вторичное электромагнитное поле, которое и воздействует на приемную антенну $A_{ПР}$. О наличии объекта и его параметрах судят по характеристикам, которые приобрел радиосигнал под влиянием этого объекта. Следовательно, при указанных радиолиниях информация извлекается не из первичного падающего электромагнитного поля, а из вторичного (рассеянного) поля. Вторичные радиолинии находят применение, прежде всего, в радиолокации. В радиолокационных станциях приемное и передающее устройства часто располагаются в одном пункте, а для излучения и приема радиосигналов используется обычно одна и та же антенна.

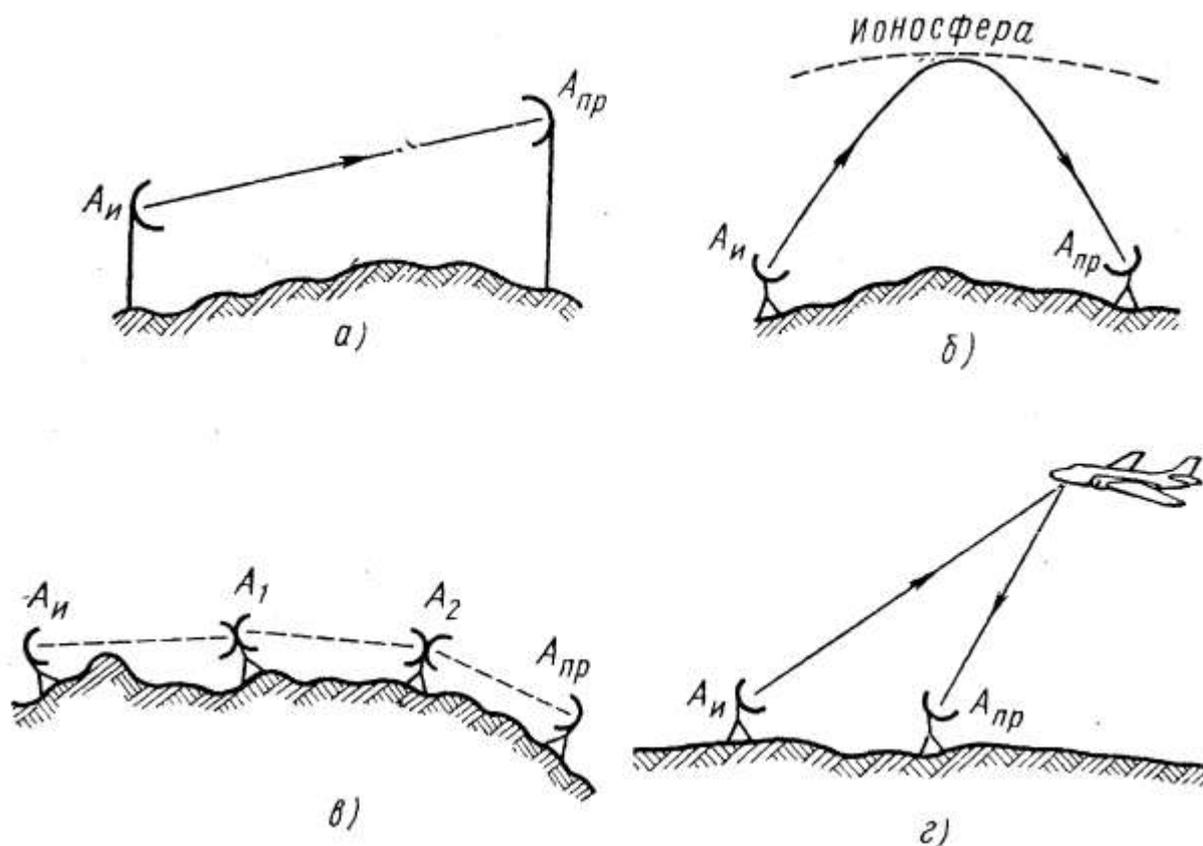


Рисунок 2.6 - Виды радиолиний (первичные, вторичные)

1.5 Распространение радиоволн в свободном пространстве

Под свободным пространством понимается однородная изотропная непоглащающая среда, относительная диэлектрическая проницаемость которой равна единице. В такой среде радиоволны распространяются прямолинейно и с постоянной скоростью. Хотя среды как идеального вакуума, для которой величина ϵ в точности равнялась бы единице, не существует, однако соотношения, получаемые при решении задач распространения радиоволн в таком простейшем случае, являются исходными. Влияние реальных сред на распространение радиоволн может быть учтено введением в эти соотношения соответствующих множителей.

Изучение распространения радиоволн в свободном пространстве начнем с рассмотрения поля простейшего излучателя, которым является элементарный диполь.

Напишем выражение для амплитуды напряженности электрического поля элементарного диполя в волновой зоне:

$$E_{0\max} = \frac{\sqrt{60 \cdot P_1'}}{r}, \quad (1.3)$$

где P_1' – мощность, подводимая к передающей антенне; r – расстояние от точки передачи до точки приема.

Более общее выражение напряженности поля, справедливое для любого излучателя (антенны), можно получить, если ввести в формулу (2.3) коэффициент направленного действия реального излучателя:

$$E_{0\max} = \frac{\sqrt{60 \cdot P_1' \cdot G_1}}{r}, \quad (1.4)$$

где G_1 – коэффициент усиления передающей антенны относительно изотропного излучателя (коэффициент направленного действия).

Для коротких и особенно ультракоротких радиоволн условия приема более рационально характеризовать мощностью, создаваемой на входе приемного устройства, так как чувствительность последнего принято выражать через мощность на входе, необходимую для уверенного приема сигналов. Мощность на входе приемной антенны связана с плотностью потока мощности в месте приема Π_2 следующим соотношением:

$$P_{\text{ПР}} = \Pi_2 S_{\text{Д}} \eta_2, \quad (1.5)$$

где η_2 – КПД фидера приемной антенны; $S_{\text{Д}} = \frac{G_2 \lambda^2}{4\pi}$ – действующая площадь приемной антенны; G_2 – коэффициент усиления приемной антенны относительно изотропного излучателя.

На радиолинии I типа в условиях свободного пространства плотность потока мощности в месте приема:

$$\Pi_{02} = \frac{P_1 \eta_1 G_1}{4\pi r^2}. \quad (1.6)$$

Здесь P_1 – мощность на выходе передатчика; η_1 – КПД передающей антенны.

Подставляя (2.6) в (2.5), получаем для радиолинии I типа мощность на входе приемника в условиях свободного пространства:

$$P'_{02} = \frac{P_1 \eta_1 G_1 G_2 \eta_2 \lambda^2}{4\pi r^2}. \quad (1.7)$$

Выражения (2.6), (2.7) и вытекающие из них формула для частного случая (2.3), справедливы для идеальной радиосвязи, так как при их выводе не учитывалось влияние атмосферы, поверхности Земли и т.д., дополнительно влияющее на процессы излучения и распространения радиоволн. Формулы (2.6) и (2.7) дают возможность также определить дальность действия линий радиосвязи в свободном пространстве.

При проектировании систем радиопередачи иногда пользуются понятием потерь при распространении радиоволн, понимая под этим отношение излучаемой мощности к принимаемой:

$$L_{\text{ПОТ}} = \frac{P_{\text{И}}}{P_{\text{ПР}}} = \frac{P_1 \eta_1 \eta_2}{P_2},$$

где P_1 – мощность на выходе передатчика, P_2 – мощность на входе приемника.

При распространении радиоволн в свободном пространстве уменьшение мощности на входе приемного устройства с увеличением расстояния r происходит только вследствие естественного рассеяния радиоволн, т.е. связано с увеличением поверхности фронта волны. При этом на основании (2.4) потери будут равны:

$$L_0 = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{G_1 G_2}. \quad (1.8)$$

Первый множитель в (2.8) характеризует основные потери при распространении радиоволн в свободном пространстве ($G_1 = G_2 = 1$):

$$L_0 = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2. \quad (1.9)$$

В случае реальных трасс, отличных по своим свойствам от свободного пространства, вводят множитель ослабления:

$$\tilde{V} = \frac{\bar{E}}{E_0} = V \exp(-j\varphi_V), \quad (1.10)$$

где V – модуль множителя ослабления, который оценивает дополнительное ослабление амплитуды напряженности поля по сравнению с ее ослаблением в свободном пространстве; φ_V – фаза множителя ослабления, которая оценивает изменение фазы волны.

1.6 Особенности распространения радиоволн на реальных трассах

Космическому пространству в первом приближении можно приписать свойства однородной изотропной среды с $\varepsilon = 1$. Поэтому можно считать, что распространение радиоволн в Космосе происходит так же, как и в свободном пространстве. На трассах, проходящих вблизи поверхности Земли, вследствие влияния этой поверхности и окружающей атмосферы траектория распространения радиоволны искривляется, изменяется скорость распространения, а реальная напряженность поля волны отличается от напряженности поля в свободном пространстве.

Влияние поверхности Земли на распространение радиоволн обусловлено следующими четырьмя основными факторами:

- 1) отражением радиоволн от поверхности Земли (рисунок 2.7, а) и связанным с ним явлением интерференции радиоволн;
- 2) полупроводящими свойствами среды и связанными с этим потерями электромагнитной энергии в земле (воде);

3) сферичностью Земли (рисунок 2.7, б) и связанным с ней явлением дифракции радиоволн;

4) неровностями земной поверхности, вызывающими рассеяние радиоволн.

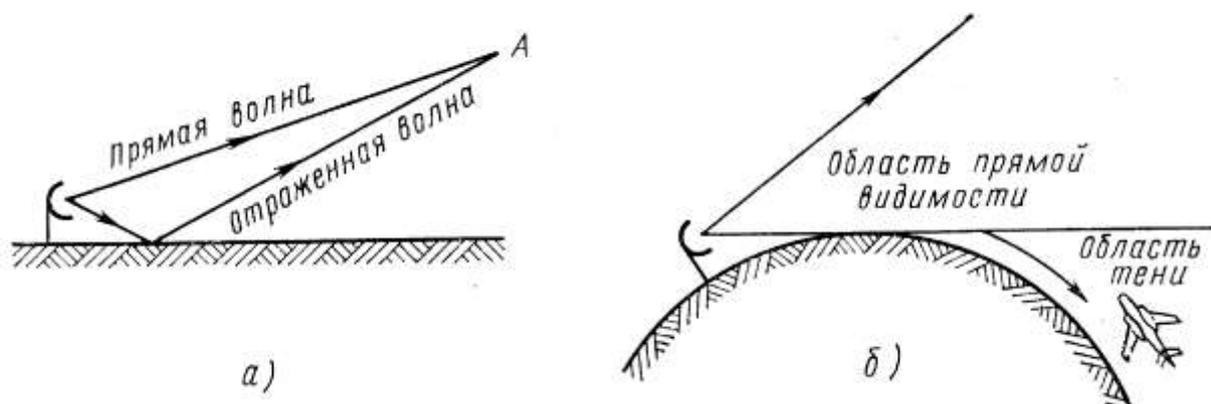


Рисунок 2.7 - Влияние Земли на распространение радиоволн

Влияние атмосферы Земли на распространение радиоволн обусловлено особенностями электрофизических свойств земной атмосферы. По высоте над поверхностью Земли можно условно выделить три основных слоя атмосферы: тропосферу, стратосферу и ионосферу.

Влияние первого слоя атмосферы на распространение радиоволн обусловлено тремя основными факторами:

1. В тропосфере и в меньшей степени в стратосфере вследствие изменения коэффициента преломления с высотой происходит искривление траектории распространения радиоволн. Это явление, называемое рефракцией радиоволн. В случае коротких и особенно ультракоротких волн рефракция может привести к попаданию их в область тени (рисунок 2.8, а).

2. В тропосфере на локальных (местных) неоднородностях, образующихся вследствие турбулентного движения воздуха (например, в результате подъема воздуха вверх) происходит рассеяние ультракоротких волн (рисунок 2.8, б). Это может быть причиной распространения радиоволн далеко за пределы прямой видимости. Указанные явления в радиосвязи играют положительную роль, но в радиолокации они могут привести к ухудшению условий обнаружения объекта и к увеличению погрешностей в определении координат его местоположения.

3. В тропосфере происходит поглощение энергии радиоволн с длиной $\lambda = 3$ см и ниже атмосферными газами и различными атмосферными образованиями (осадками, облаками, туманом, пылью, поднятой с поверхности земли, и т. д.).

Ионосфера по-разному влияет на распространение радиоволн различных диапазонов. Например, радиоволны длиннее 6...10 м от нее отражаются. В результате многократных отражений от ионосферы и поверхности Земли (рисунок 2.8, в) такие радиоволны могут распространяться на весьма большие расстояния. Волны короче 6...10 м проходят через ионосферу. Как и в тропо-

сфере, в ионосфере могут иметь место такие явления, как рефракция и рассеяние радиоволн.

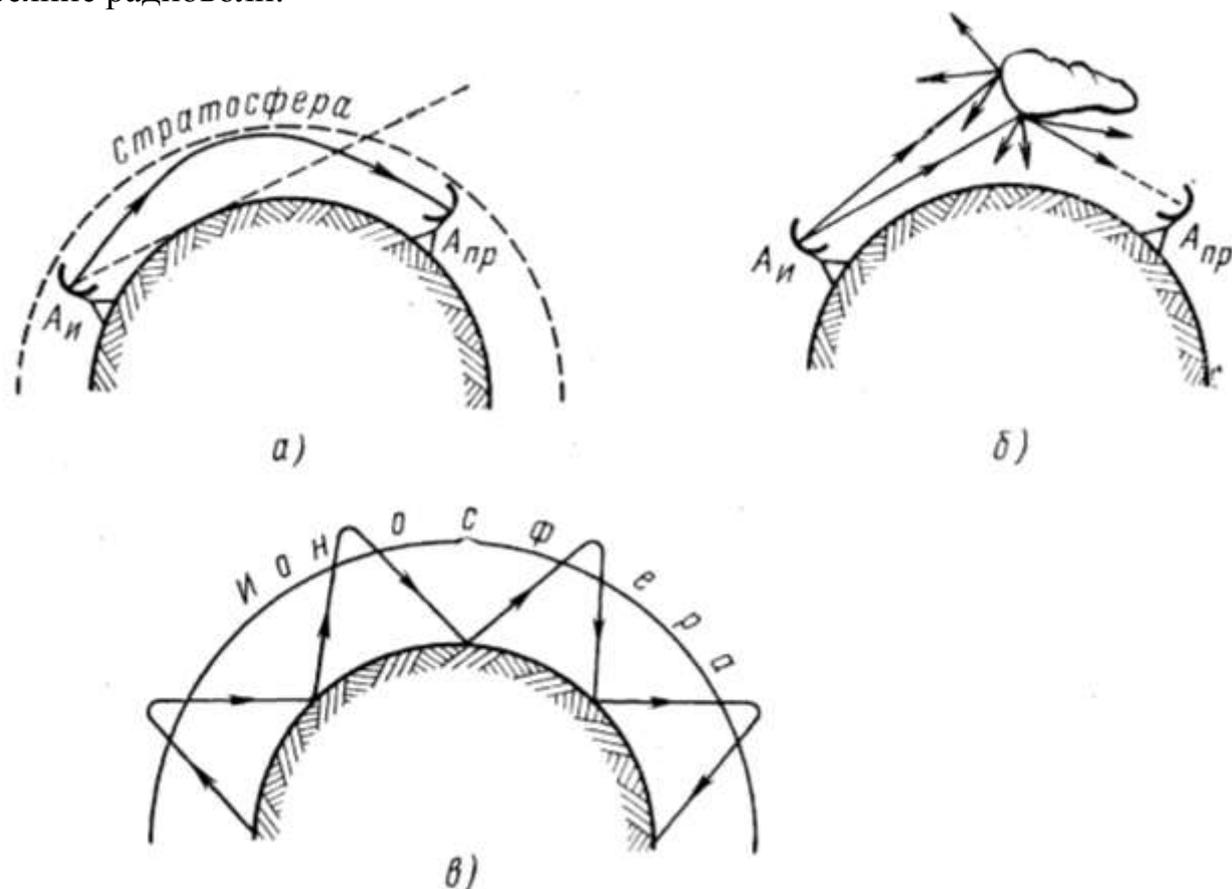


Рисунок 2.8 - Влияние атмосферы на распространение радиоволн

Из изложенного следует, что для расчета реальных радиолиний в формулы идеальной радиосвязи должны быть введены множители, учитывающие рассмотренные факторы, а для учета некоторых из них должны быть получены более сложные формулы.

По способу распространения в околоземном пространстве радиоволны классифицируются на три группы:

- 1) земные, или поверхностные, волны;
- 2) тропосферные волны;
- 3) ионосферные, или пространственные, волны.

Земными или поверхностными, волнами называются радиоволны, распространяющиеся в непосредственной близости от поверхности Земли и частично огибающие ее выпуклость вследствие дифракции. Явлению дифракции на выпуклостях земного шара подвержены, главным образом, длинные и сверхдлинные волны, длина которых одного порядка с размерами указанных выпуклостей. На сверхдлинных волнах дальность дифракционного распространения достигает 3000...4000 км.

Тропосферными волнами называются радиоволны, распространяющиеся на значительные (примерно до 1000 км) расстояния за счет рефракции и рассеяния в тропосфере, а также в результате направляющего волноводного

действия тропосферы. Рассеяние на неоднородностях тропосферы проявляется только на волнах короче 10 м, которые слабо дифрагируют вокруг земного шара и не распространяются за счет отражений от ионосферы. В тропосферных волноводах практически могут распространяться волны короче 3 м.

Ионосферными, или пространственными, волнами называются радиоволны, распространяющиеся на большие расстояния и огибающие земной шар в результате однократного или многократного их отражения от ионосферы (в диапазоне волн длиннее 10 м), а также волны, рассеивающиеся на неоднородностях ионосферы и отражающиеся от ионизированных следов метеоров (в диапазоне метровых волн).

Таким образом, характер влияния тех или иных факторов на распространение радиоволн существенно зависит от длины волны. В связи с этим радиоволны подразделяют на 12 основных диапазонов (таблица 2.1).

1.7 Область пространства, существенно участвующая в формировании поля на заданной линии

В теории распространения радиоволн, особенно при оценке влияния земли, важное значение имеет понятие «существенная область». Наличие существенной области можно определить путем эксперимента. Установим на пути распространения волны от точки A точке B непрозрачный для радиоволн экран с отверстием переменного диаметра d (рисунок 2.9).

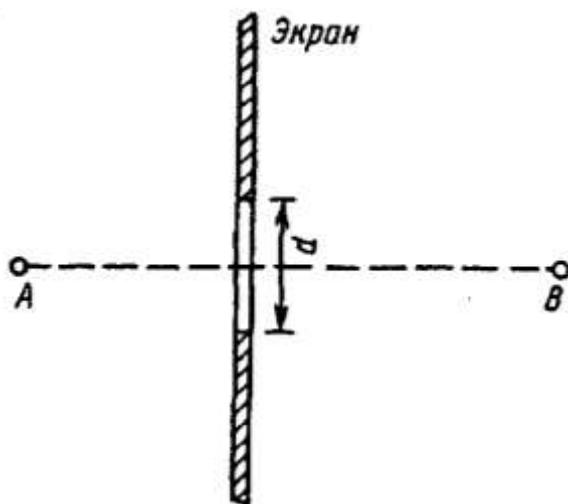


Рисунок 2.9

Если диаметр отверстия велик, что соответствует отсутствию экрана, напряженность поля в точке B равна величине E_0 . Будем затем уменьшать диаметр отверстия до тех пор, пока измерительный прибор не покажет явного уменьшения поля. Соответствующее значение d есть диаметр области, существенно участвующей в передаче энергии волны. Помещая экран на разных расстояниях от источника, можно таким образом выявить конфигурацию существенной области.

Форму и размеры существенной области возможно установить и аналитически, используя принцип эквивалентности. Согласно этому принципу поле в точке приема определяется суммарным действием вторичных источников, распределенных по воображаемой поверхности, замкнутой вокруг источника A или точки приема B .

Выберем поверхность, которая охватывает источник, и для упрощения расчетов составим ее из бесконечной плоскости S_0 , расположенной перпендикулярно линии AB (рисунок 2.10), и полусферы S_∞ с бесконечным радиусом, которая замыкает плоскость S . Поля от источников, расположенных на бесконечно удаленных участках поверхности $S_0 + S_\infty$, бесконечно малы вследствие расходимости волны. Поэтому суммарное поле формируется источниками на поверхности S_0 , расположенными на конечном расстоянии от точки B . Для облегчения суммирования разделим плоскость S_0 на зоны Френеля.

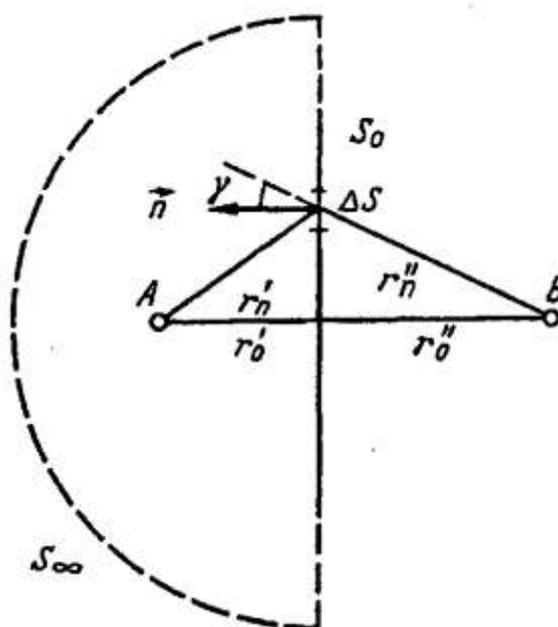


Рисунок 2.10

Построим серию ломаных AC_nB (рисунок 2.11, а), пересекающих плоскость S_0 так, чтобы длина каждой последующей ломаной была больше длины предыдущей на половину длины волны:

$$AC_nB = AC_{n-1}B + \frac{\lambda}{2} = (r'_0 + r''_0) + n \cdot \frac{\lambda}{2}. \quad (1.11)$$

Семейство ломаных линий, удовлетворяющих условиям (2.8), при пересечении с плоскостью S_0 образует на этой плоскости систему окружностей с центром в точке O (рисунок 2.11, б). Участки плоскости, ограниченные окружностями, называют зонами Френеля на плоскости. Первая зона представляет собой круг, зоны высших номеров – кольцевые области.

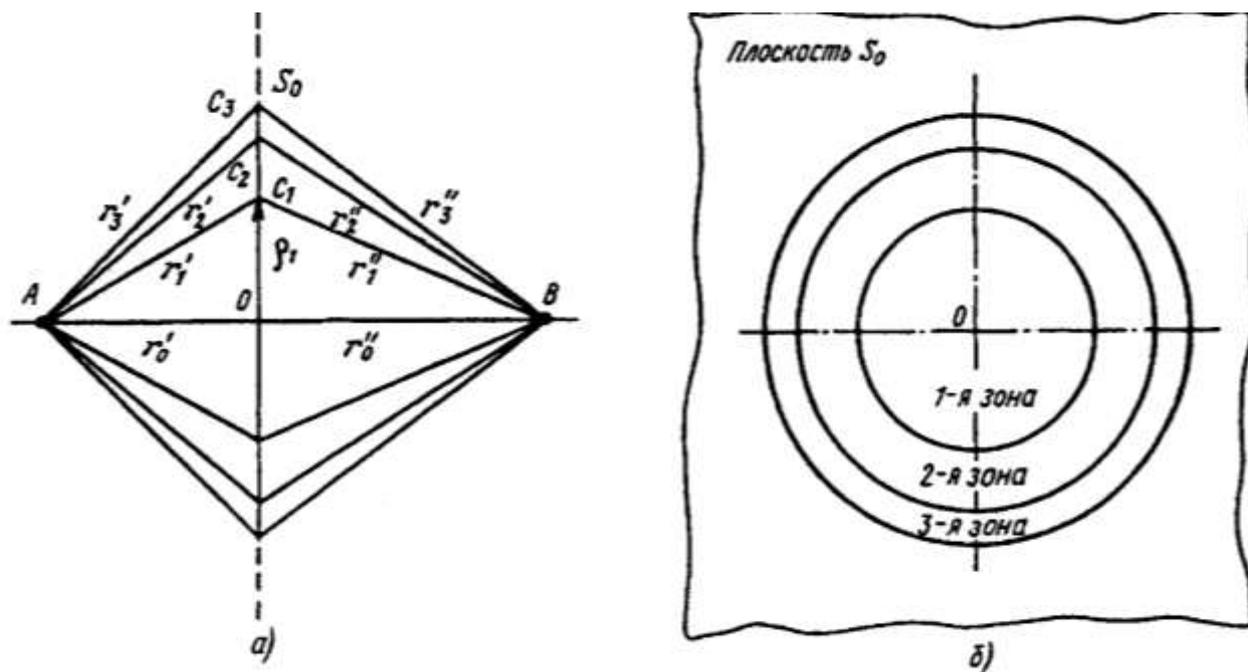


Рисунок 2.11 - Зоны Френеля

Суммарное поле от всех источников рассчитывается с учетом их распределения по зонам Френеля. Амплитуда поля от элемента поверхности ΔS оценивается как $\Delta E = \frac{C\Delta S \cos \gamma}{r'_n r''_n}$, а фаза $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} r'_n r''_n$, где C – константа, зависящая от свойств первичного источника; обозначения γ , r'_n , r''_n следуют из рисунка 2.10 и из (2.11), γ – угол под которым элемент поверхности ΔS_n излучает в точку B вдоль каждой ломаной r''_n .

Расчеты показывают, что результирующие векторы полей от источников соседних зон почти коллинеарны, при этом векторы E_n и E_{n+1} направлены противоположно из-за различия на $\lambda/2$ длин путей $r'_n + r''_n$ и $r'_{n+1} + r''_{n+1}$ согласно (2.11). Амплитуда $E_{(n+1) \max} < E_{n \max}$, поскольку путь $r'_{n+1} + r''_{n+1} > r'_n + r''_n$ и с увеличением n уменьшается значение $\cos \gamma$. В результате коллинеарности векторов полей от источников в отдельных зонах Френеля амплитуда результирующего поля определяется алгебраическим суммированием, при этом учет фазы приводит к знакопеременному ряду. Каждый член ряда равен амплитуде поля, созданного в точке приема источниками n -й зоны:

$$E_{\max} = E_{1 \max} - E_{2 \max} + E_{3 \max} - E_{4 \max} + E_{5 \max} - \dots$$

Для выявления количественных отношений удобно записать ряд в виде:

$$E_{\max} = \frac{E_{1 \max}}{2} + \left(\frac{E_{1 \max}}{2} - E_{2 \max} + \frac{E_{3 \max}}{2} \right) + \left(\frac{E_{3 \max}}{2} - E_{4 \max} + \frac{E_{5 \max}}{2} \right) + \dots$$

Поскольку соседние члены ряда мало отличаются друг от друга, то значение поля в каждой из скобок выражения для E_{\max} близко к нулю, и в первом приближении результирующее поле:

$$E_{\max} \approx \frac{E_{1\max}}{2}, \quad (1.12)$$

т.е. напряженность поля равна половине той величины, которая создается источниками первой зоны Френеля.

Результат последовательного от зоны к зоне алгебраического суммирования полей можно проследить по кривой, приведенной на рисунок 2.12. При суммировании полей от источников только первой зоны напряженность поля возрастает до $E = 2E_0$, где E_0 – поле в свободном пространстве. При дальнейшем сложении проявляется действие противофазных полей от источников второй зоны, и результирующая напряженность поля уменьшается. Компенсирующее действие полей от источников четных зон Френеля обуславливает немонотонный закон приближения величины E к E_0 при $n \rightarrow \infty$.

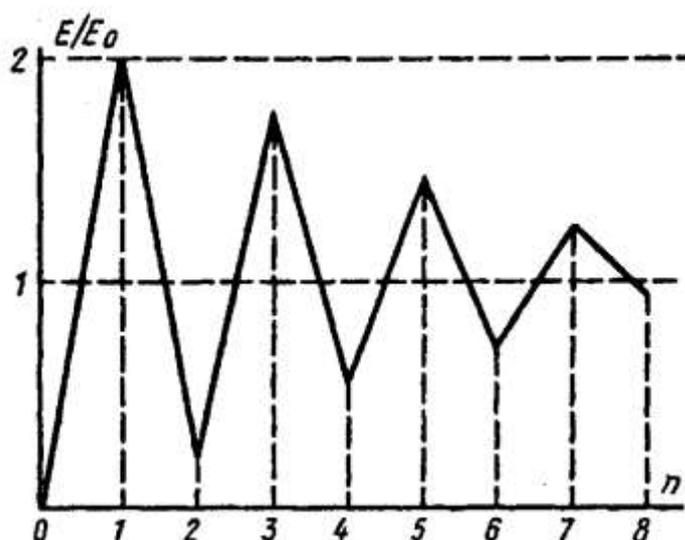


Рисунок 2.12 - Суммирование полей по n

Существенную область обычно ограничивают примерно восемью зонами Френеля. При таком приближении ошибка в вычислении поля не превышает 16 %.

Выясним вопрос о пространственной форме существенной области. Соотношение (2.8) должно выполняться при любом положении плоскости S_0 вдоль линии AB (рисунок 2.13). Поэтому (2.8) является уравнением эллипсоида вращения. Таким образом, существенная область как пространственная фигура является эллипсоидом вращения с фокусами в точках передачи и приема.

Внешний радиус n -й зоны Френеля ρ_n согласно рисунку 2.11, a и условию (2.8), а также с учетом того, что на реальных линиях $(r'_0 + r''_0) \gg \frac{\lambda}{2}$, определяется соотношением:

$$\rho_n = \sqrt{\frac{n\lambda r'_0 r''_0}{r'_0 + r''_0}}. \quad (1.13)$$

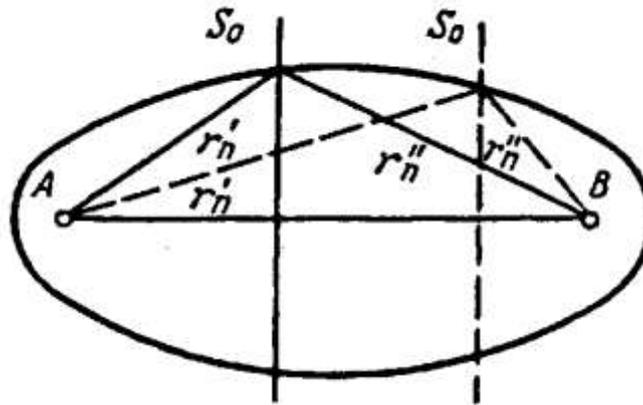


Рисунок 2.13 - Существенная область

Максимальный радиус соответствует середине трассы, где $r'_0 = r''_0 = \frac{r}{2}$:

$$\rho_{n \max} = \frac{\sqrt{n\lambda r}}{2}. \quad (1.14)$$

Максимальный радиус существенного эллипсоида, ограниченного восемью зонами Френеля:

$$\rho_{8 \max} = \frac{\sqrt{8\lambda r}}{2} = \sqrt{2\lambda r}. \quad (1.15)$$

Чем короче волна, тем меньше поперечные размеры существенного эллипсоида. Например, на волнах $\lambda = 10 \text{ м} \dots 10 \text{ см}$ при протяженности линии $r = 10 \text{ км}$ радиус $\rho_{8 \max} = 160 \dots 16 \text{ м}$. При этом большая ось существенного эллипсоида, соизмеримая с длиной радиолинии, в сотни и тысячи раз больше его малой оси, т.е. эллипс сильно вытянут вдоль трассы.

Понятие существенной области широко применяется при изучении условий распространения на линиях, где электрические параметры тракта распространения неоднородны. Например, при распространении радиоволн над земной поверхностью ослабление поля зависит от степени затенения существенной области поверхностью Земли. Если высоты антенн таковы, что часть существенной области затенена, то потери на линии значительно возрастают.

Отметим, что существенная область имеет форму эллипсоида вращения только при использовании ненаправленных антенн в точках передачи и приема. Реально ее форма более сложная и зависит от ДН антенн.

2 РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗЕМНОЙ ВОЛНЫ [1-4]

2.1 Физические процессы при распространении земной волны

Влияние Земли на характеристики антенн, расположенных вблизи ее поверхности, учитывается при расчете КВ, СВ и ДВ антенн. В данной главе

основное внимание уделяется закономерностям распространения земной волны на пути от точки передачи до точки приема.

Определение поля излучателя, расположенного в атмосфере вблизи земной поверхности, с учетом реальных свойств Земли и атмосферы представляет собой чрезвычайно сложную задачу. Для облегчения ее решения вводят некоторые упрощения. Поверхность Земли считают электрически однородной, сферической и идеально гладкой. Электрические параметры атмосферы (воздуха) принимают такими же, как и параметры свободного пространства.

Поле земной волны можно считать результатом суперпозиции полей, созданных вторичными источниками, которые возбуждены первичным полем в воздухе и земле. Полупроводящие свойства Земли приводят к оттоку энергии волны из воздуха в почву. Сферическая земная поверхность является препятствием, которое земная волна огибает при распространении за линию горизонта. Процесс огибания – процесс дифракции радиоволн вдоль сферического препятствия приводит к дополнительным потерям по сравнению со случаем распространения радиоволн над плоской поверхностью.

Полное решение задачи дифракции радиоволн для сферической идеально гладкой Земли с однородными электрическими параметрами и однородной атмосферы получено В.А.Фоком в 1945 г.

В данном разделе не приводятся вывод и запись формулы для расчета напряженности поля земной волны. Отметим только, что эта формула представляет собой бесконечный ряд по специальным функциям Эйри и расчеты по ней весьма громоздки. В ряде случаев встречающихся на практике, общую дифракционную формулу Фока можно упростить или вместо нее использовать другие, более простые методы расчета поля.

Для практических расчетов общее решение дифракционной задачи можно разделить на несколько частных. Критерием для применения частных решений служат высота подъема антенн над поверхностью Земли и длина радиолинии (расстояние от пункта передачи до пункта приема). Оба параметра определяют степень затенения земной поверхностью пространственных зон Френеля, а, следовательно, и закон затухания поля в процессе дифракции.

В зависимости от высот расположения антенн различают два класса задач. К первому классу относят задачи, в которых высота поднятия антенн $h \gg \lambda$. Это, так называемые, высоко поднятые антенны, что на практике характерно при работе в диапазоне УКВ и с некоторыми ограничениями в диапазоне КВ. Второй класс задач рассматривает процесс дифракции радиоволн при низко расположенных антеннах, когда $h \ll \lambda$. Этот случай характерен для работы в диапазонах СВ и ДВ.

Вдоль пути распространения земной волны в зависимости от степени освещенности точки приема излучением передающей антенны выделяют три области (зоны): освещенную (I), полутени (II) и тени (III), как показано на рисунке 3.1. Термин «освещенная зона» имеет прямой смысл только при высоко

поднятых антеннах. При низко расположенных антеннах область, прилегающую к передающей антенне, называют зоной «приближения плоской Земли», поскольку в пределах этой зоны поверхность Земли можно приближенно считать плоской.



Рисунок 3.1 - Зоны освещенности

Наиболее просто рассчитывается напряженность поля в освещенной зоне при высоко поднятых антеннах, когда влияние Земли сводят к интерференции в точке приема прямой и отраженной волн. При низко расположенных антеннах на сравнительно небольших удалениях от излучателя некоторые упрощения расчетов достигаются благодаря тому, что поверхность Земли считают плоской.

Отметим, что при оценке условий распространения земной волны в случае $h \gg \lambda$ часто сравнивают длину радиолинии r с предельным расстоянием прямой видимости $r_{ПР}$ (рисунок 3.2). Высоты поднятия антенн на передаче и приеме $h_1, h_2 \ll a_{ЗМ}$, где $a_{ЗМ} = 6370$ км – радиус Земли, поэтому величина $r_{ПР}$, отсчитываемая по дуге большого круга, приближенно равна прямой AB . Из рисунка 3.2 видно, что:

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

Если $r_{ПР}$ выразить в километрах, h_1, h_2 – в метрах, то после подстановки численного значения $a_{ЗМ}$ получим:

$$r_{ПР} = 3.57 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}). \quad (2.1)$$

При обычных высотах поднятия антенн (порядка нескольких десятков метров) предельное расстояние прямой видимости составляет несколько десятков метров (как правило, не более 50...60 км).

Таким образом, в случае $h \gg \lambda$ деление пути распространения земной волны на зоны производят следующим образом: $r < r_{ПР}$ – освещенная зона; $r \approx r_{ПР}$ – зона полутени; $r > r_{ПР}$ – зона тени.

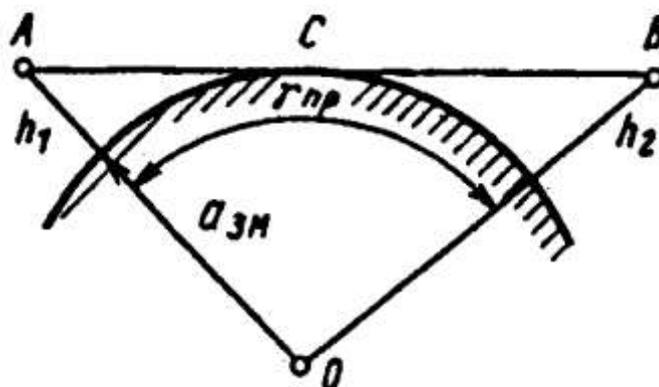


Рисунок 3.2 - Расстояние прямой видимости

2.2 Поле излучателя в освещенной зоне в приближении плоской Земли [2]

Расчет поля земной волны в освещенной зоне, когда высота подъема антенны на передаче $h_1 \gg \lambda$ будем вести, используя отражательную трактовку влияния Земли, при которой поле земной волны представляется в виде суммы прямой волны с напряженностью $\bar{E}_{пр}$ и отраженной с напряженностью $\bar{E}_{отр}$:

$$\bar{E}_{ЗМ} = \bar{E}_{пр} + \bar{E}_{отр}. \quad (2.2)$$

Прямая волна распространяется по пути r_1 (рисунок 3.3) в условиях свободного пространства. При мощности P_1' подводимой к передающей антенне, и коэффициенте усиления этой антенны G_1 напряженность электрического поля прямой волны в точке приема:

$$\bar{E}_{пр} = E_{0\max пр} \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} r_1\right] = \frac{\sqrt{60P_1'G_1}}{r_1} \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} r_1\right].$$

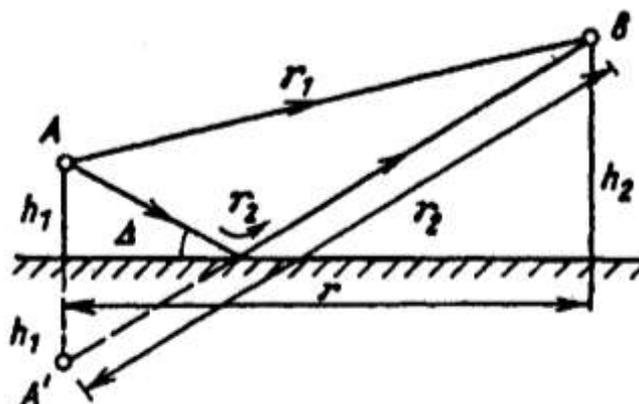


Рисунок 3.3 - Поле в освещенной зоне

Отраженная волна согласно отражательной трактовке проходит путь r_2 в условиях свободного пространства и создает в точке приема напряженность электрического поля:

$$\bar{E}_{OTP} = E_{0\max OTP} \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} r_2\right] = \frac{\sqrt{60P_1'G_1}}{r_2} R \cdot \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} r_2 + j\theta\right],$$

здесь θ – фазовый угол коэффициента отражения R .

При записи формулы для \bar{E}_{OTP} учтено, что на наземных радиолиниях $r \gg h$, поэтому коэффициент усиления передающей антенны для направлений прямой и отраженной волн примерно одинаков. Это же неравенство позволяет при вычислении амплитуд полей принять $r_1 \approx r_2 \approx r$.

Тогда:

$$E_{0\max PP} = E_{0\max OTP} = E_{0\max} = \frac{\sqrt{60P_1'G_1}}{r}. \quad (2.3)$$

При вычислении разности фаз $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)$, от которой зависит амплитуда результирующего поля, приближение $r_1 \approx r_2 \approx r$ неприменимо. Это обусловлено тем, что для диапазона УКВ разность $r_2 - r_1$ остается соизмеримой с длиной волны. Учитывая сказанное:

$$\bar{E}_{ЗМ} = E_{0\max} \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} r_1\right] \cdot \left[1 + R \cdot \exp\left\{-j \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)(r_2 - r_1) - \theta\right]\right\}\right] \quad (2.4)$$

Исходя из определения множителя ослабления (2.10) и зная, что в (3.4) сомножитель перед скобками есть напряженность поля в свободном пространстве, получаем выражение для множителя ослабления в освещенной зоне:

$$\tilde{V} = 1 + R \cdot \exp\left\{-j \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\Delta r - \theta\right]\right\} = V \exp(-j\varphi_V), \quad (2.5)$$

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

Модуль множителя ослабления из (3.5):

$$V = \sqrt{1 + R^2 + 2R \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} \Delta r - \theta\right]}. \quad (2.6)$$

Фаза множителя ослабления:

$$\varphi_V = \arctg \frac{R \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda} \Delta r - \theta\right]}{1 + R \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} \Delta r - \theta\right]}. \quad (2.7)$$

Величину \tilde{V} (3.5) называют *интерференционным множителем ослабления* или просто *интерференционным множителем*.

Из (3.6) видно, что модуль V изменяется немонотонно при плавном изменении разности хода интерферирующих волн. Закономерности изменения

напряженности поля, определяемые модулем интерференционного множителя (3.6), становятся наглядными, если разность хода лучей Δr выразить через r, h_1, h_2 :

$$\Delta r = r_2 - r_1 = \frac{2h_1h_2}{r}. \quad (2.8)$$

Подставляя (3.8) в (3.6), находим:

$$V = \sqrt{1 + R^2 + 2R \cos \left[\frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r} - \theta \right]}. \quad (2.9)$$

Из полученных для модуля множителя ослабления формул следует, что при перемещении вдоль трассы, когда меняется r , а также при изменении высот h_1 и h_2 распределение поля имеет не монотонный характер.

Интерференционные максимумы поля наблюдаются на тех расстояниях r_m , где происходит синфазное сложение полей прямой и отраженной волн и где аргумент косинуса в (3.9):

$$\frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r_m} - \theta = 2m\pi, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (2.10)$$

В этих точках модуль множителя ослабления достигает максимальной величины:

$$V_{\max} = 1 + R_m, \quad (2.11)$$

где R_m – модуль коэффициента отражения при $r = r_m$.

Из (3.4) видно, что в точках максимума $V_{\max} > 1$. Противофазное сложение полей наблюдается на расстояниях r_n , где аргумент косинуса в (3.9):

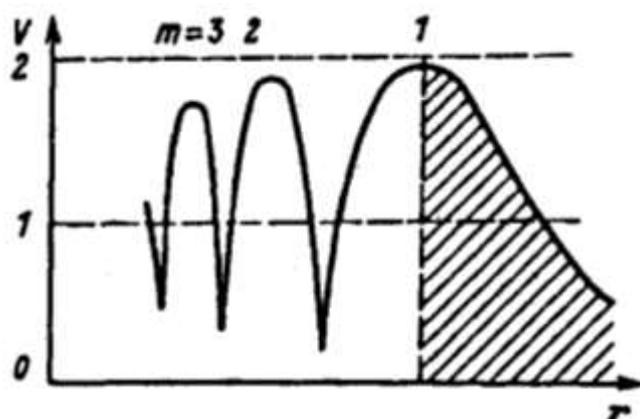
$$\frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r_n} - \theta = (2m + 1)\pi, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (2.12)$$

В точках интерференционных минимумов модуль множителя ослабления уменьшается до величины:

$$V_{\min} = 1 - R_n, \quad (2.13)$$

где R_n – модуль коэффициента отражения при $r = r_n$. В этих точках $V_{\min} < 1$.

На рисунке 3.4 показана зависимость $V(r)$. Как видно из рисунка, ширина интерференционных лепестков уменьшается по мере приближения к источнику, что согласно (3.8) объясняется гиперболической зависимостью разности хода Δr от расстояния. Одновременно значения V в точках минимумов возрастают, поскольку при приближении к источнику углы Δ увеличиваются, а значения R уменьшаются. В первом интерференционном максимуме, который соответствует $m = 1$ и располагается на наибольшем удалении от источника, сдвиг фаз между прямой и отраженной волнами равен 2π . При дальнейшем удалении от источника траектории волн настолько сливаются, что Δr и множитель ослабления уменьшаются монотонно.

Рисунок 3.4 - Интерференция $V(r)$

На стационарных наземных радиолиниях, работающих в пределах освещенной зоны, пункт приема обычно располагают вблизи первого интерференционного максимума.

2.2.1 Интерференционный множитель с учетом сферичности Земли

В рамках отражательной трактовки, когда влияние Земли сводят к интерференции в точке приеме прямой и отраженной волн, влияние сферичности земной поверхности учитывают путем соответствующих изменений амплитуды и фазы отраженной волны по сравнению со случаем плоской Земли.

При сферической земной поверхности сдвиг фаз полей прямой и отраженной от Земли волн в точке приема $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)$ удобно выразить в виде функции некоторых высот, которые называются приведенными высотами и обозначаются h'_1 и h'_2 . Для определения этих высот необходимо провести плоскость S , касательную к сферической земной поверхности в точке отражения C (рисунок 3.5). Тогда разность хода $r_2 - r_1$ над сферической поверхностью будет равна разности хода над плоскостью S и может быть рассчитана через высоты h'_1 и h'_2 , отсчитываемые от плоскости S . Из рисунка 3.5 следует, что:

$$h'_1 = h_1 - \Delta h_1, \quad h'_2 = h_2 - \Delta h_2.$$

Выпуклость Земли приводит к заметному уменьшению плотности потока мощности отраженной волны в заданном направлении. Учет уменьшения напряженности поля за счет выпуклости Земли производят путем введения коэффициента отражения от сферической поверхности – $R_{СФ}$, который определяется через приведенные высоты h'_1, h'_2 и длину радиолинии r .

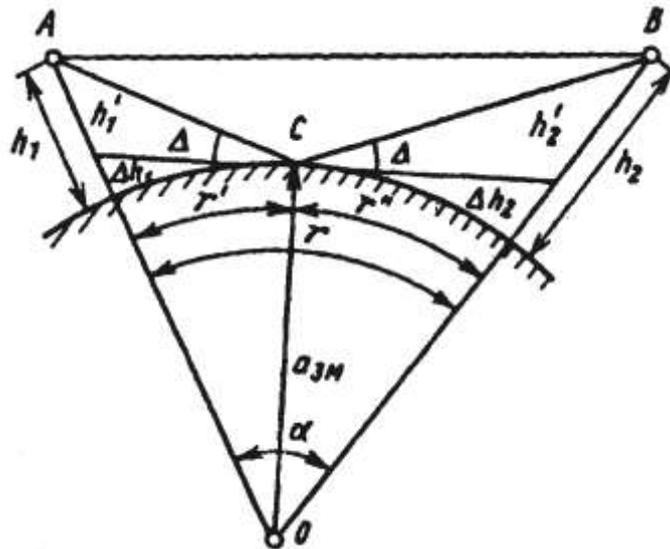


Рисунок 3.5. Определение «приведенных» высот - h'_1 и h'_2

Таким образом, выражение для модуля интерференционного множителя с учетом сферичности Земли в соответствии с (3.9) получается в следующем виде:

$$V = \sqrt{1 + R_{C\Phi}^2 + 2R_{C\Phi} \cos \left[\frac{4\pi h'_1 h'_2}{\lambda r} - \theta \right]}.$$

Предел применимости интерференционного множителя на трассах, протяженность которых не превышает предельного расстояния прямой видимости, определяется применимостью отражательной трактовки, заложенной в основу данной формулы. Напомним, что отражательная трактовка предполагает наличие в точке приема двух волн – прямой и отраженной. Расчеты показывают, что представление об интерференционной структуре земной волны справедливо, если угол возвышения Δ траектории отраженной волны удовлетворяет условию:

$$\sin \Delta > \sqrt[3]{\frac{\lambda}{\pi a_{3M}}}.$$

2.3 Поле низко расположенного излучателя в зоне приближения плоской Земли

В разделе 3.2 рассматривался случай $h \gg \lambda$, 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 ($h = 0$), либо на высоте $h \ll \lambda$, что наиболее характерно для диапазонов средних и длинных волн. При таком расположении антенн условие применимости отражательной трактовки не выполняется, т.е. интерференционная формула дает неправильный результат. Это означает, что при низко расположенных антеннах земная

волна не может быть разделена на прямую и отраженную. В данном случае существует единая волна, скользящая вдоль поверхности Земли.

В качестве излучателя рассмотрим вертикальный электрический вибратор, расположенный непосредственно на поверхности Земли (рисунок 3.6). Этот случай типичен для диапазонов средних и длинных волн.

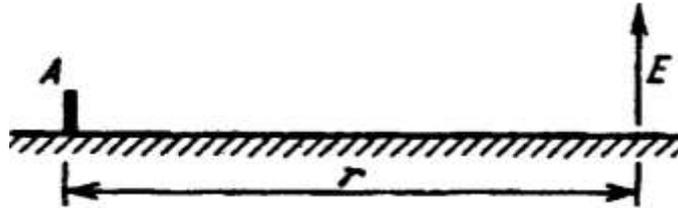


Рисунок 3.6 - Антенны на высоте $h \ll \lambda$

Напряженность поля волны, скользящей вдоль поверхности Земли можно определить только путем решения системы уравнений Максвелла с учетом граничных условий на поверхности раздела «воздух – почва». Решение системы для случая плоской поверхности раздела впервые было получено А. Зоммерфельдом в 1909 г. В дальнейшем путем некоторых упрощений решение Зоммерфельда было приведено к виду, используемому в настоящее время. Это решение позволяет определять вертикальную составляющую поля земной волны, когда излучатель расположен на плоской поверхности раздела «воздух – почва».

Решение для действующего значения напряженности поля представляется в виде:

$$E_{\text{ЗМ Д}} = E_{\infty \text{ Д}} V_{\text{ЗМ}}(\rho), \quad (2.14)$$

где $E_{\infty \text{ Д}}$ – действующее значение напряженности поля над идеально проводящей плоскостью; $V_{\text{ЗМ}}(\rho)$ – модуль множителя ослабления, оценивающий, во сколько раз напряженность поля над реальной Землей меньше напряженности поля над идеально проводящей плоскостью при прочих равных условиях; ρ – параметр, называемый численным расстоянием (безразмерная величина):

$$\rho \approx \frac{\pi r}{\lambda \sqrt{\epsilon_{\text{ЗМ}}^2 + (60\lambda\sigma_{\text{ЗМ}}^2)}}. \quad (2.15)$$

Здесь $\epsilon_{\text{ЗМ}}$ и $\sigma_{\text{ЗМ}}$ соответственно относительная диэлектрическая проницаемость и проводимость Земли.

Если к вертикальному электрическому вибратору, расположенному на идеально проводящей плоскости ($\sigma = \infty$), подвести такую же мощность, как и в случае расположения его в свободном пространстве, то за счет распределения излученной мощности только в верхнем полупространстве плотность потока мощности возрастет в 2 раза, а напряженность поля – в $\sqrt{2}$ по сравнению со свободным пространством, т.е. $E_{\infty \text{ Д}} = \sqrt{2} E_{0 \text{ Д}}$ или с учетом (2.4):

$$E_{0Д} = \frac{\sqrt{60 \cdot P_1' \cdot G_1}}{r}. \quad (2.16)$$

Формула (3.14) с учетом (3.15) называется формулой Шулейкина – Ван-дер-Поля. Кривые зависимости модуля множителя ослабления $V_{ЗМ}$ от численного расстояния ρ приведены на рисунке 3.7.

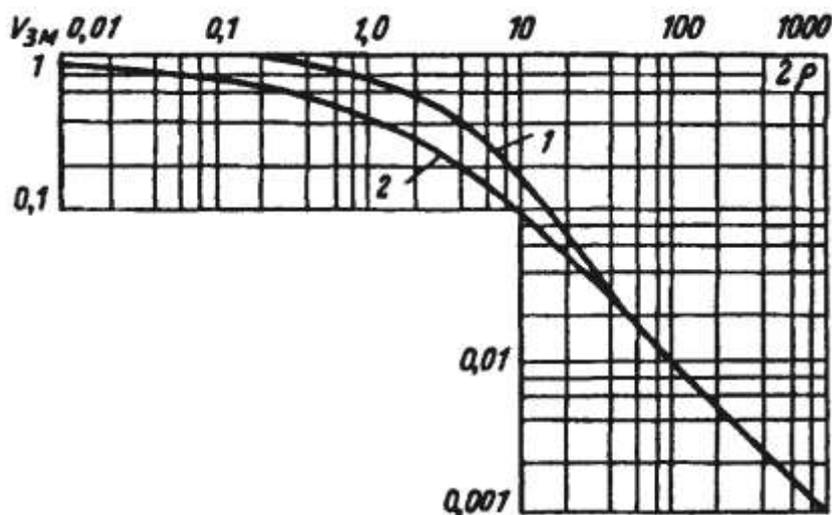


Рисунок 3.7 - Зависимость модуля $V_{ЗМ}$ от ρ

Кривая 1 относится к случаю $60\lambda\sigma_{ЗМ} \gg \epsilon_{ЗМ}$, что характерно для длинных волн и хорошо проводящих почв. Кривая 2 соответствует $60\lambda\sigma_{ЗМ} \ll \epsilon_{ЗМ}$, что справедливо для коротких волн и плохо проводящих почв.

Для хорошо проводящих почв ($\sigma_{ЗМ} \rightarrow \infty$) $\rho = 0$ и $V_{ЗМ} \approx 1$, т.е. напряженность поля убывает так же, как и над идеально проводящей плоскостью, т.е. согласно (3.16) по закону $1/r$.

2.4 Поле в зонах полутени и тени при высоко поднятых и низко расположенных излучателях

При оценке условий распространения вблизи и за линией горизонта, т.е. в зонах полутени и тени, нельзя пользоваться ни отражательной трактовкой (при $h \gg \lambda$), ни приближением плоской Земли (при $h \ll \lambda$). Условия распространения земной волны в этих зонах определяются процессом дифракции вдоль сферической полупроводящей поверхности Земли. Расчет напряженности поля ведется по общей дифракционной формуле Фока для области как полутени, так и тени. Разница лишь в том, что в зоне тени можно удерживать меньшее число членов бесконечного ряда. Ввиду сложности анализа формулы Фока ограничимся качественными оценками поведения поля.

Сферическую поверхность Земли можно рассматривать как расположенное между точками передачи A и приема B препятствие, которое огибает

волна (рисунок 3.8). Процесс огибания волной препятствия (процесс дифракции) зависит от так называемого электрического размера препятствия, т.е. от отношения l/λ , где l – высота шарового сегмента. Чем больше l/λ , тем большая часть существенного эллипсоида перекрывается препятствием и тем слабее дифракционная волна.

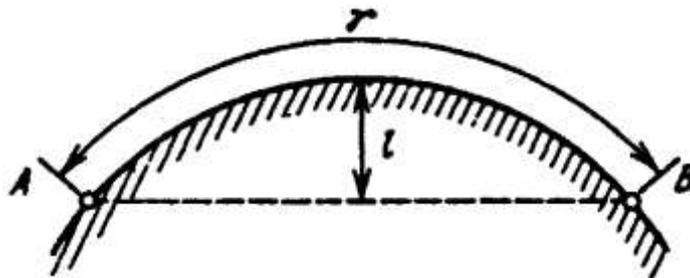


Рисунок 3.8 - Сферическое препятствие

Поверхность Земли является полупроводящей, что приводит к оттоку энергии земной волны из воздуха в почву. Уже отмечалось, что с увеличением длины волны свойства земной поверхности приближаются к свойствам проводника. С учетом этих двух обстоятельств и рассмотрим характер изменения напряженности поля земной волны в зонах полутени и тени в зависимости от расстояния и длины волны.

При увеличении расстояния напряженность поля падает за счет, прежде всего, естественной расходимости волны (как и в свободном пространстве). Кроме того, возрастает высота шарового сегмента l и, следовательно, увеличиваются потери на огибание волной данного препятствия. И, наконец, возрастают потери за счет постепенного оттока энергии в почву. В совокупности зависимость напряженности поля от расстояния должна иметь убывающий характер, причем степень убывания зависит от длины волны.

При уменьшении длины волны, во-первых, возрастает электрическая высота шарового сегмента l/λ , т.е. увеличиваются дифракционные потери, а во-вторых, свойства почвы становятся ближе к свойствам диэлектрика, что способствует утечке энергии волны в почву, т.е. ослаблению поля в воздухе. В сумме (при прочих равных условиях) напряженность поля земной волны в зонах полутени и тени в диапазоне УКВ должна быть меньше, чем в диапазонах СВ и ДВ.

В качестве иллюстрации на рисунке 3.9 приведены кривые зависимости модуля множителя ослабления поля земной волны от расстояния для трех длин волн диапазона УКВ. Из рисунка видно, что за линией горизонта поле быстро затухает в тысячи и десятки тысяч раз, и тем быстрее, чем короче волна.

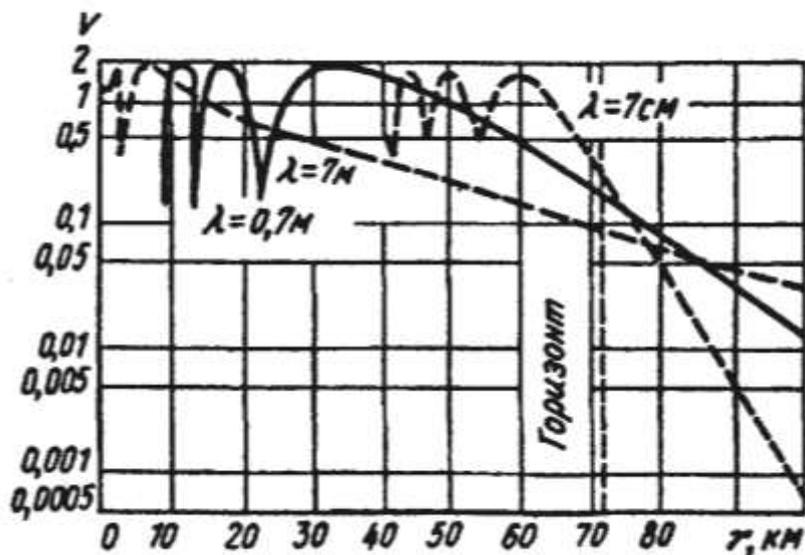


Рисунок 3.9 - Зависимости ослабления от r , км

Напряженность поля земной волны в диапазонах более длинных волн (КВ, СВ, ДВ) обычно определяется по кривым МККР, рассчитанным по дифракционной формуле.

Подводя итог, можно сказать, что чем больше длина волны, тем на большие расстояния за линию горизонта проникает земная волна. Прием этой волны на значительных удалениях от передающей антенны практически возможен только в диапазонах средних и длинных волн.

3 РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ [1,2]

3.1 Электрические свойства тропосферы и ионосферы

3.1.1 Распределение заряженных частиц в ионосфере

В ионосфере, т.е. на высотах более 50...60 км, кроме нейтральных частиц содержатся свободные заряженные частицы: электроны, положительные и отрицательные ионы. Количество положительно и отрицательно заряженных частиц одинаково, так что в целом ионосфера электрически нейтральна. Такие среды называются плазмой, поэтому в данном случае можно говорить об ионосферной плазме.

Наибольшее влияние на условия распространения радиоволн оказывают свободные электроны, обладающие наименьшей массой и, следовательно, инерцией. Основными параметрами ионосферной плазмы являются: электронная концентрация (плотность) N_E ($1/\text{м}^3$) и эффективная частота соударений $\nu_{ЭФ}$ ($1/\text{с}$) электронов с тяжелыми частицами (положительными ионами и нейтральными молекулами и атомами).

Свободные заряды появляются в атмосфере в результате процесса ионизации, т.е. отрыва одного или нескольких электронов с наружных оболочек молекул и атомов за счет энергии воздействия внешних источников энергии. Основным источником ионизации газов в атмосфере является солнечная радиация в виде фотонов. Сравнение энергии, необходимой для ионизации, с энергией фотонов показывает, что фотоионизацию способно производить только ультрафиолетовое и более коротковолновое излучение Солнца ($\lambda < 0.134$ мкм).

Кроме процесса фотоионизации в земной атмосфере имеет место ударная ионизация, возникающая при столкновении корпускул с нейтральными частицами. *Корпускулами* называют заряженные частицы (электроны, протоны), которые выбрасываются Солнцем и образуют так называемый солнечный ветер. В средних широтах роль ударной ионизации сравнительно невелика. В значительной мере этот вид ионизации проявляется в полярных районах, куда стекается основная часть корпускул, вторгающихся в земную атмосферу.

Количество свободных зарядов в атмосфере зависит не только от процессов ионизации, но и от обратных процессов, являющихся причиной их исчезновения. Из этих процессов наиболее важен процесс рекомбинации. Рекомбинация происходит за счет хаотического теплового движения, когда частицы, имеющие заряды разных знаков, оказываются настолько близко друг к другу, что под действием сил электростатического притяжения соединяются, превращаясь в нейтральные молекулы или атомы.

Электронная концепция N_E определяется балансом процессов ионизации и рекомбинации. В идеализированном случае распределение $N_E(h)$ имеет один максимум $N_{E \max}$ на конечной высоте в атмосфере (рисунок 4.1, а). Такое распределение называется *простым слоем* (слоем Крючкова-Чемпена). Образование простого слоя обусловлено тем, что интенсивность ионизирующего излучения Π_C уменьшается с приближением к поверхности Земли, а плотность нейтральных частиц N_H изменяется в обратном направлении. Максимум $N_e(h)$ возникает на той высоте, где ионизирующее излучение еще не сильно ослаблено, а плотность нейтральных частиц еще не очень мала. Ионосфера ниже $N_{E \max}$ называется *внутренней*, выше – *внешней*.

В реальной атмосфере распределение $N_e(h)$ имеет сложный характер. На рисунке 4.1, б показано типичное распределение электронной концентрации по высоте, полученное на основании измерений.

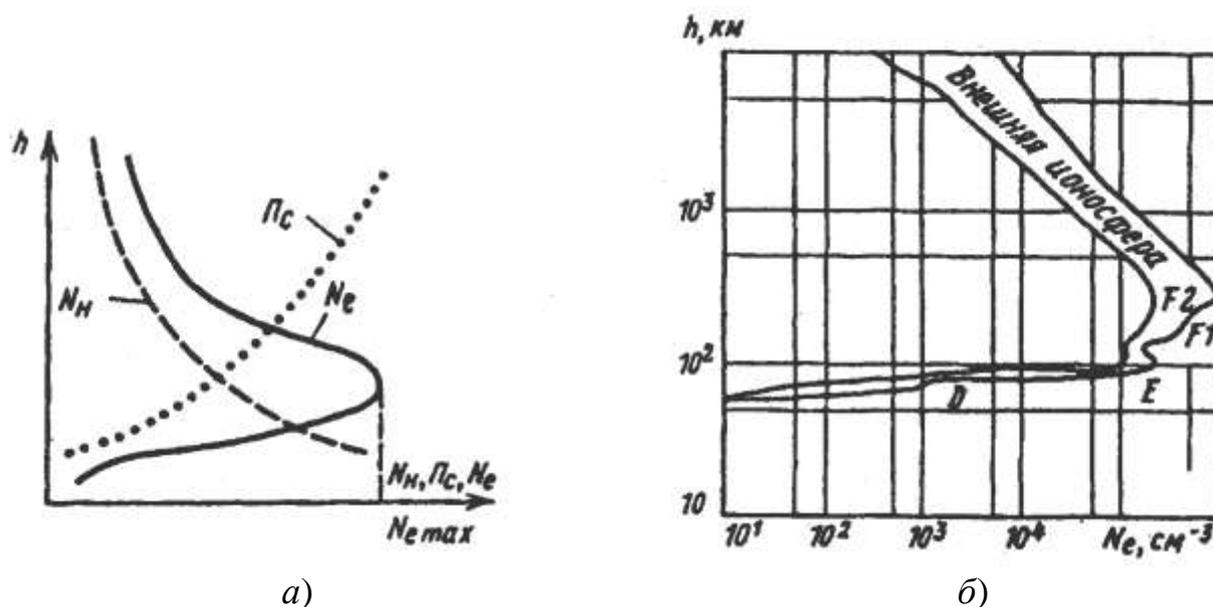


Рисунок 4.1 - Строение ионосферы

Во внутренней ионосфере закономерность $N_e(h)$ характеризуется наличием нескольких относительных максимумов ионизации, которые называются *слоями*. В ионосфере имеются четыре регулярных слоя: *D*, *E*, *F1*, *F2*.

Состояние ионосферных слоев подвержено регулярным суточным и сезонным вариациям, которые связаны с обычными суточными и сезонными изменениями радиации Солнца. Так, слой *D* является типично дневным слоем; после захода Солнца вследствие сравнительно большой плотности газа положительно и отрицательно заряженные частицы рекомбинируют и электронная концентрация на этих высотах падает практически до нуля. Слой *E* существует круглые сутки, но в дневное время N_e значительно больше, чем в ночное. Слой *F1* наблюдается в средних широтах только в дневное летнее время, в остальные периоды он сливается со слоем *F2*, образуя единую об-

ласть F . Слой $F2$ существует всегда, но его параметры претерпевают значительные изменения.

К регулярным относят также изменения состояния ионосферы в течение цикла солнечной активности, имеющего среднюю длительность около 11 лет. Солнечная активность обычно характеризуется относительным числом солнечных пятен W (числом Вольфа), которое изменяется от нескольких единиц в годы минимума до 100... 150 и более в годы максимума. Зависимость от W позволяет прогнозировать параметры ионосферы на некоторый период времени вперед, используя прогноз активности Солнца, осуществляемый астрономическими обсерваториями.

Кроме регулярных слоев в ионосфере наблюдаются также нерегулярные, спорадические слои, возникающие на высотах слоев E и F , но имеющие повышенную относительно обычного уровня электронную концентрацию. Спорадические слои характеризуются сложной структурой и ограниченными горизонтальными размерами, которые обычно не превышают нескольких сотен километров.

Во внешней ионосфере имеет место сравнительно плавный и весьма медленный спад электронной концентрации по высоте (см. рисунок 4.1, a). Свободные электроны, находящиеся в частично ионизированной ионосферной плазме, при своем движении могут сталкиваться с ионами и нейтральными молекулами, отдавая им часть энергии. Столкновения определяют энергетические соотношения в ионосфере, и в частности обуславливают преобразование энергии электромагнитного поля в тепловую. Суммарное число столкновений электронов с различными ионами и молекулами оценивается эффективным числом соударений в единицу времени $\nu_{ЭФ}$. Значение $\nu_{ЭФ}$ зависит в основном от расстояния между частицами и скорости их движения. С увеличением высоты над земной поверхностью $\nu_{ЭФ}$ уменьшается.

3.1.2 Диэлектрическая проницаемость и проводимость ионосферы

Вопросы распространения радиоволн в средах с частотной дисперсией рассматривались в курсе «Основы электродинамики». Земная ионосфера является типичной дисперсионной средой.

Воспользовавшись полученными ранее результатами, опишем электродинамические свойства ионосферы. Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_{II} и проводимость ионосферы σ_{II} записывается следующим образом:

$$\epsilon_{II} = 1 - \frac{e^2}{m_e \epsilon_0} \frac{N_e \nu_{ЭФ}}{\nu_{ЭФ}^2 + \omega^2},$$

$$\sigma_{II} = \frac{e^2}{m_e} \frac{N_e v_{\Delta\Phi}}{v_{\Delta\Phi}^2 + \omega^2}. \quad (3.1)$$

После подстановки постоянных значений e , m_e и ϵ_0 :

$$\begin{aligned} \epsilon_{II} &= 1 - \frac{3190 N_e}{v_{\Delta\Phi}^2 + \omega^2}, \\ \sigma_{II} &= 2.82 \cdot 10^{-8} \frac{N_e v_{\Delta\Phi}}{v_{\Delta\Phi}^2 + \omega^2}. \end{aligned}$$

На достаточно высоких частотах, когда $\omega^2 \gg v_{\Delta\Phi}^2$, выражения для ϵ_{II} и σ_{II} упрощаются:

$$\begin{aligned} \epsilon_{II} &= 1 - \frac{80.8 N_e}{f^2}, \\ \sigma_{II} &= 7.17 \cdot 10^{-10} \frac{N_e v_{\Delta\Phi}}{f^2}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где σ_{II} – См/м; f – Гц, N_e – $1/\text{м}^3$; $v_{\Delta\Phi}$ – $1/\text{с}$.

Учитывая, что максимальное значение $v_{\Delta\Phi}$, наблюдается в слое D ионосферы и имеет порядок 10^7 $1/\text{с}$, упрощенные формулы (4.2) могут быть использованы на частотах выше примерно 3 МГц, т.е. в диапазонах КВ и УКВ.

Рассмотрим основные свойства ионосферы, вытекающие из полученных для ϵ_{II} и σ_{II} формул. Формулы для ϵ_{II} показывают, что диэлектрическая проницаемость ионосферы:

- меньше диэлектрической проницаемости свободного пространства ($\epsilon_{II} < 1$) за счет наличия конвекционного тока;

- зависит от электронной концентрации и частоты столкновений, которые претерпевают пространственные и временные изменения; следовательно, ионосфера является электрически неоднородной средой. На рисунке 4.2 показано качественное изменение ϵ_{II} ионосферного слоя по высоте h . Видно, что диэлектрическая проницаемость сначала уменьшается, а затем, выше максимума ионизации слоя, возрастает с высотой;

- зависит от частоты, т.е. ионосфера является диспергирующей средой. Это обусловлено тем, что электроны, обладая конечной массой, проявляют инерционные свойства. С повышением частоты упорядоченная скорость движения электронов, а, следовательно, и конвекционный ток уменьшаются, и свойства ионосферы приближаются к свойствам свободного пространства. Практически основное влияние ионосферы на условия распространения радиоволн наблюдается на частотах $f < 100$ МГц ($\lambda > 3$ м);

- может принимать нулевые значения, если частота приложенного поля ω будет равна так называемой собственной частоте ионосферной плазмы ω_e , которая определяется (при $v_{\Delta\Phi} = 0$) как:

$$\omega_e = \frac{e^2 N_e}{m_e \epsilon_0}. \quad (3.3)$$

На частотах $\omega < \omega_e$ диэлектрическая проницаемость ионосферы $\epsilon_{II} < 0$. На рисунке 4.2 показан случай, когда для некоторой частоты f_3 на высотах от h_1 до h_2 $\epsilon_{II} < 0$. Распространение волны с частотой f_3 в указанной области ионосферы невозможно. Это объясняется тем, что коэффициент распространения $k = \omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a}$ при $\epsilon_a < 0$ и отсутствии потерь становится величиной чисто мнимой: $k = -ja$. Следовательно, амплитуда поля убывает по экспоненциальному закону, а перенос энергии отсутствует.

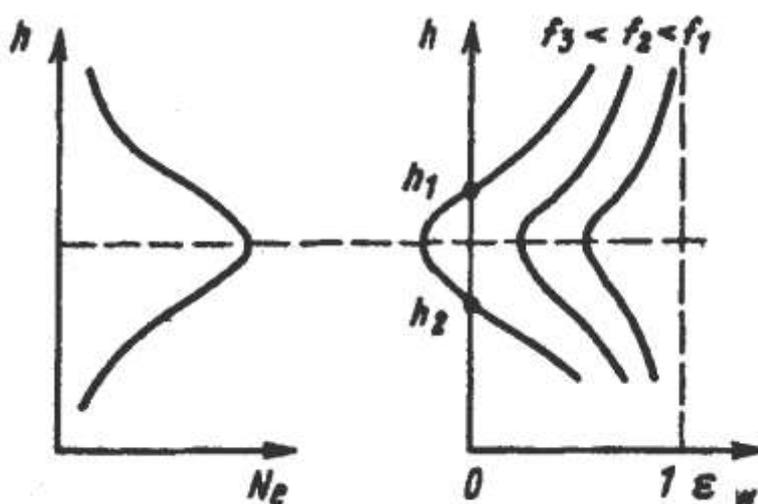


Рисунок 4.2 - Изменение N_e и ϵ_{II} по высоте

Полученные формулы для удельной проводимости позволяют сделать следующие заключения:

1. Проводимость ионосферы на разных высотах различна, так как зависит от электронной плотности и частоты соударений, которые в свою очередь зависят от высоты. Максимальное значение удельная проводимость ионосферы принимает на высотах соответствующих слою D . Учитывая, что слой D существует только в дневное время, можно сделать еще один вывод: проводимость, а, следовательно, и поглощение в ионосфере в дневное время больше, чем в ночное.

2. Удельная проводимость, характеризующая поглощение в ионосфере, тем меньше, чем выше частота (при $\omega^2 \gg \nu_{\epsilon\phi}^2$). Это происходит потому, что с увеличением частоты из-за инерции электронов их средняя колебательная скорость уменьшается и, следовательно, уменьшается энергия, которую электроны отдают тяжелым частицам при столкновении. Практически поглощение в ионосфере мало на частотах $f > 100$ МГц.

Магнитное поле Земли H_{3M} значительно усложняет характер движения зарядов в ионосфере и приводит к изменениям ее диэлектрической проницаемости и проводимости. На движущийся электрон со стороны магнитного поля Земли действует сила Лоренца, которая закручивает электрон вокруг силовых линий магнитного поля, превращая траекторию его движения в спиральную линию. Частота вращения электронов вокруг магнитных силовых линий (в отсутствие других полей) называется электронной гиромангнитной частотой.

Учитывая, что в средних широтах $H_{3M} \approx 40$ А/м, гиромангнитная частота $f_H \approx 1.4$ МГц, т.е. лежит в диапазоне средних волн.

Сила Лоренца зависит от угла между направлением распространения волны и вектором \vec{H}_{3M} .

Определение параметров анизотропной ионосферы путем решения уравнений Максвелла и уравнения движения электрона с учетом магнитной силы Лоренца представляет весьма громоздкую задачу. Отметим лишь, что под влиянием магнитного поля Земли в ионосфере возникают некоторые специфические явления, характерные для анизотропных сред. Например, возникает явление двойного лучепреломления, когда электромагнитная волна расщепляется на две – обыкновенную и необыкновенную, распространяющиеся по различным траекториям с различными скоростями и испытывающие различное поглощение (эффект Коттон - Мутона).

Существенное влияние на работу радиолиний оказывают отклонения электронной концентрации от регулярных средних значений. Различают два вида отклонений: флуктуации около средних значений и длительные аномальные изменения самих средних значений. Флуктуации наблюдаются всегда, аномальные изменения – только в периоды так называемых ионосферных возмущений.

Флуктуации электронной концентрации обуславливают неоднородную быстро меняющуюся микроструктуру ионосферы. Ионосфера представляется как скопление локальных образований, изменяющихся во времени и подвижных в пространстве. В пределах неоднородностей электронная концентрация отличается от среднего значения в данной области ионосферы.

Мелкомасштабные неоднородности с горизонтальными размерами в несколько сотен метров образуются в результате процессов турбулентности и диффузии. Интенсивность неоднородностей определяется среднеквадратическим значением отношения перепада электронной концентрации на неоднородности к среднему значению.

Крупномасштабные неоднородности с горизонтальными размерами в десятки и сотни километров образуются в результате колебательных процессов в ионосфере и представляют образования эллипсоидальной формы с преимущественной ориентацией вдоль силовых линий магнитного поля Земли.

Длительные аномальные изменения средних значений электронной концентрации, наблюдаемые в течение 1 ч и более, называются *ионосферными возмущениями* или *бурями*. Наиболее важные для работы радиолиний ио-

носферные возмущения имеют корпускулярную природу. Напомним, что корпускулы производят ударную ионизацию атмосферного газа. Возмущения появляются, когда атмосфера Земли попадает в корпускулярные потоки, излученные из активных областей возмущенного Солнца. Корпускулы, достигая области действия магнитного поля Земли как заряженные частицы, начинают двигаться по спиралям вокруг магнитных силовых линий и направляются к полярным областям. Корпускулярные потоки вызывают не только ионосферные, но и магнитные бури, поэтому часто говорят о магнитно-ионосферных возмущениях. Возмущения протекают по-разному в зависимости от широты точки наблюдения.

Возмущения корпускулярного происхождения в средних и низких широтах характеризуются аномальным изменением в основной области F . Лишь в периоды очень сильных бурь возмущения достигают нижних слоев ионосферы. Для средних широт характерны так называемые отрицательные возмущения, при которых электронная концентрация слоя понижается на 30...40 %. Во время бури на плавное изменение электронной концентрации слоя F_2 налагаются интенсивные неоднородности.

Возмущения корпускулярного происхождения в полярных широтах характеризуются изменением ионизации всей толщи ионосферы, включая слой D . При аномальном повышении ионизации этого слоя увеличивается удельная проводимость ионосферы и, следовательно, поглощение радиоволн. В кольцевой зоне полярных сияний одновременно с изменением состояния слоя D наблюдается возмущенность слоя F_2 , проявляющаяся в освещенной части зоны в виде значительного понижения $N_{e \max}$, а в затененной – в виде значительного повышения $N_{e \max}$ за счет спорадических образований.

Возмущения волнового происхождения проявляются в виде резкого возрастания ионизации слоя D в результате мощного рентгеновского излучения, источником которого является хромосферная вспышка на Солнце. Возмущения этого типа, сопровождаемые резким увеличением поглощения (эффект Делинжера), наступают внезапно и длятся от нескольких минут до 1...2 ч. Обычно они охватывают всю освещенную часть земного шара, распределяясь с разной интенсивностью в зависимости от широты.

3.1.3 Диэлектрические свойства тропосферы

Физические свойства тропосферы рассмотрены в разделе 2.3. Рассмотрим более подробно динамику распределения диэлектрической проницаемости в тропосфере.

В большинстве случаев зависимость относительной диэлектрической проницаемости ϵ_T тропосферы от высоты h близка к экспоненциальной:

$$\varepsilon_T(h) = 1 + \Delta\varepsilon_0 \exp\left(\frac{g_T h}{\Delta\varepsilon_0}\right), \quad (3.4)$$

где $\Delta\varepsilon_0$ – приземное ($h = 0$) отклонение ε_T от единицы; g_T – вертикальный градиент диэлектрической проницаемости тропосферы у земной поверхности:

$$g_T = \frac{d\varepsilon_T}{dh}. \quad (3.5)$$

Обычно при среднем состоянии тропосферы $g_T < 0$, т.е. ε убывает с высотой. Можно получить связь g_T с градиентом коэффициента преломления:

$$g_T = \frac{2dn_T}{dh}.$$

В качестве первого приближения, дающего представление о среднесезонном распределении ε_T по высоте, можно воспользоваться понятием стандартной радиоатмосферы, для которой $\Delta\varepsilon_0 = 5.78 \cdot 10^{-4}$; $g_T = -7.85 \cdot 10^{-8}$ 1/м. Подставляя эти значения в (4.4), получаем:

$$\varepsilon_T(h) = 1 + 5.78 \cdot 10^{-8} \cdot \exp(-1.36 \cdot 10^{-4} h), \quad (3.6)$$

где высота h выражена в метрах.

Стандартная радиоатмосфера характеризует среднестатистическое, наиболее вероятное состояние тропосферы в умеренных климатических условиях и вводится как некоторый эталон.

Отметим, что при определенных метеорологических условиях могут наблюдаться существенные отклонения от рассмотренных средних закономерностей $\varepsilon_T(h)$. Так, при температурных инверсиях, когда температура воздуха возрастает с высотой, происходит более резкое, чем обычно, убывание ε_T по высоте. При других метеоусловиях, когда в приземном слое температура воздуха резко уменьшается с высотой, а влажность увеличивается, ε возрастает с увеличением высоты. Такие условия возникают, например, при натекании холодного влажного воздуха с моря на нагретую сушу. Таковы основные регулярные распределения ε_T .

Как показывают измерения, в тропосфере всегда имеются случайные во времени и локальные в пространстве области, в пределах которых диэлектрическая проницаемость отличается от средних значений. Для примера на рисунке 4.3 показано типичное распределение $\varepsilon_T(h)$, свидетельствующее о наличии локальных неоднородностей диэлектрической проницаемости. Неоднородности имеют различные формы и размеры, они видоизменяются во времени, исчезают и появляются вновь, движутся с потоком воздушных масс и создают сложную структуру флуктуации ε_T .

При оценке условий распространения радиоволн неоднородности диэлектрической проницаемости разделяют на два вида: слоистые и турбулентные.

Слоистые неоднородности представляют собой образования, горизонтальные размеры которых заметно превышают вертикальные. Одной из ос-

новных причин их возникновения является температурная инверсия, а также наличие облачности.

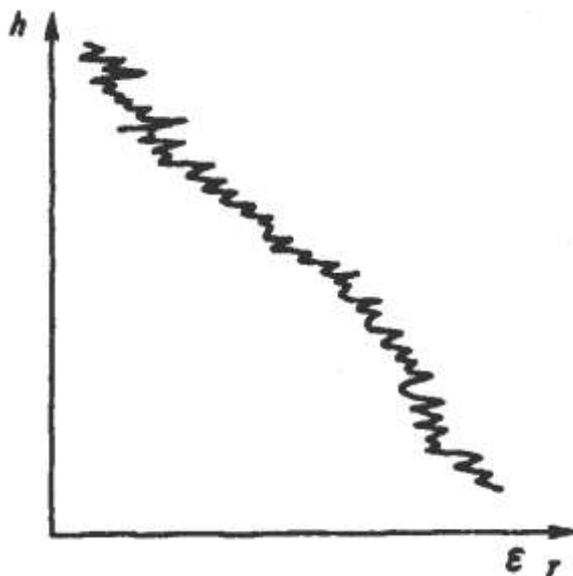


Рисунок 4.3 - Типичное распределение ϵ_T по высоте h

Интенсивность неоднородностей слоистого типа, оцениваемая как отличие диэлектрической проницаемости в пределах слоя от диэлектрической проницаемости окружающей среды. Число и интенсивность слоев с увеличением высоты над земной поверхностью уменьшаются.

Размеры слоистых неоднородностей изменяются в широких пределах. Толщина слоев характеризуется величинами от десятых долей метра до нескольких сотен метров, а их горизонтальные размеры изменяются от десятков метров до десятков километров и более.

Неоднородности турбулентного характера имеют соизмеримые размеры во всех направлениях. Вследствие малых сил вязкости движение атмосферного газа практически всегда турбулентное, так что неоднородности такого типа существуют в тропосфере всегда, при любых метеоусловиях. Размеры и интенсивность неоднородностей могут быть оценены только статистически.

Размеры неоднородностей турбулентного происхождения определяются размерами (масштабами) элементарных вихрей, совокупность которых составляет турбулентный поток воздуха. В тропосфере пространственный спектр размеров вихрей непрерывен и ограничен величинами от нескольких миллиметров до нескольких десятков метров.

3.2 Преломление радиоволн

3.2.1 Общий подход к вопросам распространения радиоволн в атмосфере

При определении траектории радиоволн в атмосфере используют метод приближения геометрической оптики. Лучевое представление справедливо для неоднородных сред с настолько медленным изменением коэффициента преломления, что на отрезке пути, соизмеримом с длиной волны в среде, можно принять $n(h) = \text{const}$. При этом **в первом приближении можно пренебречь отраженным лучом и свести процесс распространения к наличию только преломленного.**

В атмосфере приближение геометрической оптики справедливо для всех волн радиодиапазона, за исключением диапазона ДВ ($\lambda > 1000$ м).

Ранее было показано, что диэлектрическая проницаемость атмосферы плавно меняется по высоте. Распространение радиоволн в такой среде сопровождается плавным искривлением траектории распространения – явлением рефракции.

При рефракции траектория представляет кривую, к которой касателен вектор, характеризующий скорость переноса энергии волны. Из курса технической электродинамики известно, что при распространении сигнала, энергия которого сконцентрирована в пределах полосы частот $(\omega_0 - \Delta\omega_{\text{max}}) \dots (\omega_0 + \Delta\omega_{\text{max}})$ и $\omega_0 \gg \Delta\omega_{\text{max}}$, таким вектором в среде без дисперсии (тропосфера, стратосфера) является вектор фазовой скорости, а в среде с дисперсией (ионосфера) – вектор групповой скорости. В условиях атмосферы, где коэффициент преломления есть функция высоты, модули этих векторов равны:

- для фазовой скорости:

$$c_{\Phi} = \frac{c_0}{n(h)},$$

где c_0 – скорость распространения в свободном пространстве; $n(h) = \sqrt{\varepsilon(h)}$ – коэффициент преломления на высоте h ;

- для групповой скорости сигнала с частотой ω_0 :

$$c_{GP} = \frac{c_0}{n(h, \omega)_{\omega=\omega_0} + \omega_0 \left(\frac{dn(h, \omega)}{d\omega_{\omega=\omega_0}} \right)}, \quad (3.7)$$

где $n(h, \omega) = \sqrt{\varepsilon(h, \omega)}$ – коэффициент преломления в той области атмосферы, где наблюдается дисперсия.

Выражения показывают, что в атмосфере скорость распространения волны различна на разных высотах. Поэтому элементы фронта волны, распределенные в пространстве, перемещаются с разными скоростями, что и яв-

ляется причиной поворота фронта в процессе распространения, т.е. причиной рефракции.

3.2.2 Траектория волны. Радиус кривизны траектории

Для упрощения анализа процесса распространения радиоволн предположим, что тропосфера состоит из ряда тонких сферических слоев, в пределах каждого из которых показатель преломления n остается постоянным. Обозначим показатель преломления первого слоя $n_1 = n$, второго $n_2 = n + \Delta n$, третьего $n_3 = n + 2\Delta n$ и т.д. Предположим также, что источник расположен на поверхности Земли и излучает электромагнитные волны, которые можно представить в виде набора лучей. Один из них показан на рисунке 4.4.

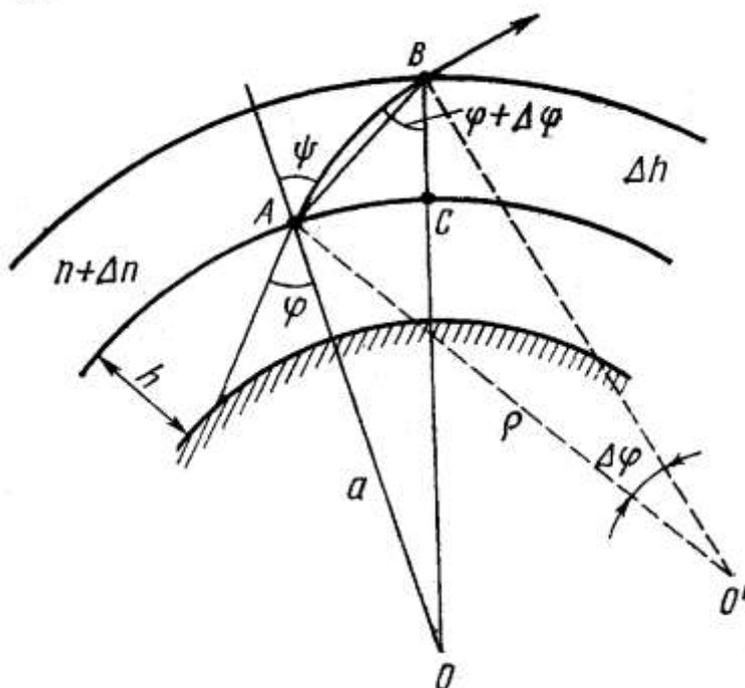


Рисунок 4.4 - Траектория одного луча

Луч, падающий под углом φ на сферический слой толщиной Δh , испытывает преломление. Угол преломления ψ определяется на основании закона Снеллиуса:

$$n \cdot \sin \varphi = (n + \Delta n) \cdot \sin \psi. \quad (3.8)$$

На следующий слой луч падает под углом $\varphi + \Delta\varphi$. На основании теоремы синусов из треугольника OAB находим:

$$\frac{\sin(\pi - \psi)}{a + h + \Delta h} = \frac{\sin(\varphi + \Delta\varphi)}{a + h},$$

где h – высота рассматриваемого слоя над поверхностью Земли, a – радиус Земного шара.

Отсюда:

$$\sin \psi = \sin(\varphi + \Delta\varphi) \cdot \frac{a + h + \Delta h}{a + h}.$$

Подставляя в выражение (4.8) значение $\sin \psi$ из последней формулы, получим уравнение траектории волны в тропосфере:

$$n \cdot \sin \varphi \cdot (a + h) = (n + \Delta n) \cdot \sin(\varphi + \Delta\varphi) \cdot (a + h + \Delta h). \quad (3.9)$$

Из этого уравнения следует, что чем больше величина Δn , тем больше отличается угол φ от угла $(\varphi + \Delta\varphi)$ и тем больше траектория волны в тропосфере будет отличаться от прямолинейной.

Если пренебречь кривизной Земли и считать, что тропосфера состоит из плоских слоев, то уравнение траектории упростится и примет вид:

$$n \cdot \sin \varphi = (n + \Delta n) \cdot \sin(\varphi + \Delta\varphi).$$

Определим радиус кривизны луча ρ . Его находят в соответствии с рисунком 4.4 по выражению:

$$\rho \approx \frac{AB}{\Delta\varphi}.$$

Здесь $\Delta\varphi$ - угол между нормальными к элементам траектории в точках A и B , т.е. угол у центра кривизны. Из треугольника ABC находим:

$$AB = \frac{\Delta h}{\cos(\varphi + \Delta\varphi)} \approx \frac{\Delta h}{\cos \varphi}. \quad (3.10)$$

Тогда:

$$\rho \approx \frac{\Delta h}{\cos \varphi \cdot \Delta\varphi}. \quad (3.11)$$

Раскрывая правую часть в уравнении траектории волны (4.9) и пренебрегая величинами второго порядка малости, находим:

$$\cos \varphi \Delta\varphi = -\frac{\sin \varphi \cdot \Delta n}{n}.$$

Подставляя это значение в (4.11), получим:

$$\rho \approx \frac{n}{\sin \varphi \cdot \left(-\frac{\Delta n}{\Delta h}\right)}.$$

Переходя к дифференциальной форме, имеем:

$$\rho = \frac{n}{\sin \varphi \cdot \left(-\frac{dn}{dh}\right)}. \quad (3.12)$$

Показатель преломления тропосферы незначительно отличается от единицы ($n \approx 1$). На практике основной интерес представляют пологие лучи, для которых $\sin \varphi \approx 1$.

Тогда выражение (4.12) упрощается и с учетом того, что индекс преломления $N = (n - 1) \cdot 10^6$, приобретает вид:

$$\rho = -\frac{1}{\frac{dn}{dh}} = -\frac{10^6}{\frac{dN}{dh}} \text{ [м]}. \quad (3.13)$$

Таким образом, радиус кривизны траектории волны в тропосфере определяется быстротой изменения индекса преломления с высотой, т.е. величиной градиента индекса преломления.

Эквивалентный радиус Земли. Для учета атмосферной рефракции при расчете напряженности поля радиоволн, например, в интерференционных и дифракционных формулах, а также при определении дальности прямой видимости вместо истинного радиуса Земли a используют, так называемый, эквивалентный радиус земного шара $a_{\text{Э}}$. Для этого реальную картину распространения радиоволн по криволинейной траектории в тропосфере вблизи реальной поверхности Земли (рисунок 4.5, а) заменяют эквивалентной картиной распространения радиоволн по прямолинейной траектории вблизи поверхности Земли, но с измененным эквивалентным радиусом $a_{\text{Э}}$ (рисунок 4.5, б).

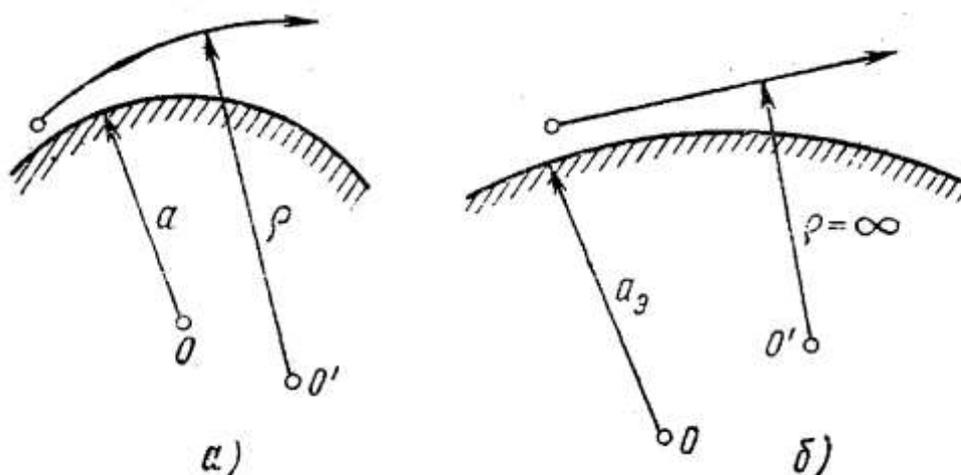


Рисунок 4.5 - Эквивалентный радиус Земли $a_{\text{Э}}$

При этом прямолинейный луч проходит над эквивалентным земным шаром на той же высоте, что и криволинейный над реальной поверхностью Земли.

Кривизна траектории луча в реальном случае равна $1/\rho$, а в эквивалентном случае кривизна траектории прямолинейного луча равна нулю.

Эквивалентный радиус Земли можно найти из условия, что разность между кривизной луча и кривизной земной поверхности в реальном и эквивалентном случаях остается постоянной.

Это условие можно записать таким образом:

$$\frac{1}{\infty} - \frac{1}{a_{\text{Э}}} = \frac{1}{\rho} - \frac{1}{a},$$

откуда:

$$a_{\text{Э}} = \frac{\rho a}{\rho - a} = \frac{a}{1 - \frac{a}{\rho}}. \quad (3.14)$$

Подставляя в выражение (4.14) значение радиуса кривизны (4.13), находим:

$$a_{\text{Э}} = \frac{a}{1 + a \frac{dN}{dh} \cdot 10^{-6}}. \quad (3.15)$$

При этом прямолинейный луч проходит над эквивалентным земным шаром на той же высоте, что и криволинейный луч над реальной поверхностью Земли.

Обозначая через k отношение эквивалентного радиуса к действительному, находим:

$$k = \frac{a_{\text{Э}}}{a} = \frac{1}{1 - \frac{a}{\rho}}. \quad (3.16)$$

Для нормальной тропосферы $\frac{dN}{dh} = \frac{dN_0}{dh} = -0.04 \text{ м}^{-1}$ эквивалентный радиус Земли и коэффициент k соответственно равны:

$$a_{\text{Э}} = 8500 \text{ км}, \quad k \approx \frac{4}{3}.$$

Понятием эквивалентного радиуса Земли можно пользоваться при линейном изменении индекса преломления с высотой. Для очень пологих лучей, которые часто встречаются в практике распространения УКВ, понятие эквивалентного радиуса Земли применимо также для нелинейного изменения индекса N с высотой.

Возможные виды рефракции. Необходимо еще раз подчеркнуть, что концепция эквивалентного радиуса Земли справедлива только при $\rho = \text{const}$, т.е. при распространении радиоволн в той области тропосферы, где наблюдается линейная зависимость ε_T . При нелинейной зависимости $\varepsilon_T(h)$ радиус кривизны траектории меняется от точки к точке и введение единого эквивалентного радиуса Земли невозможно.

В зависимости от метеорологических условий различают следующие типовые виды рефракции в тропосфере (рисунок 4.6).

Отрицательная рефракция, или субрефракция (кривая 1), наблюдается при возрастании коэффициента преломления с увеличением высоты, т.е. при $g_T > 0$ и $a_{\text{Э}} < a$. Это возможно при росте влажности воздуха с высотой, что, например, часто встречается в континентальных районах с умеренным климатом осенью и весной во время утренних приземных туманов.

Отсутствие рефракции, т.е. прямолинейное распространение волны (кривая 2), возможно, когда $g_T = 0$.

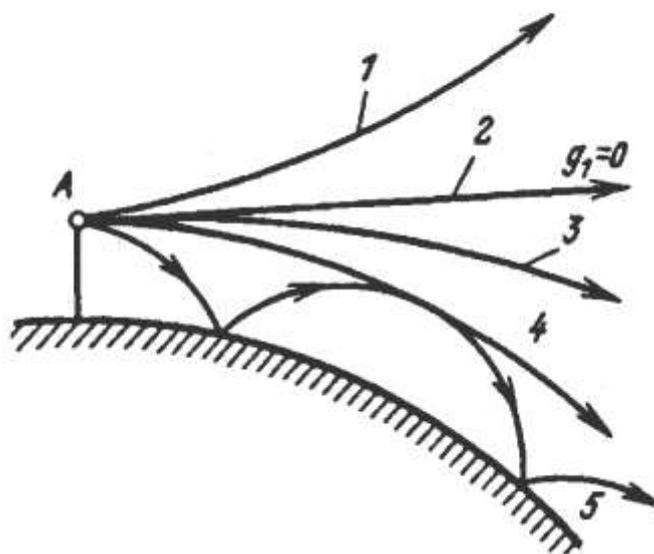


Рисунок 4.6 - Виды рефракции

Положительная рефракция наблюдается при убывании коэффициента преломления с высотой, т.е. когда $g_T < 0$, при этом $a_{\text{Э}} < a$. Различают четыре частных случая положительной рефракции:

- стандартная рефракция при $g_T = -8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$; $a_{\text{Э}} = 8500 \text{ км}$. Это наиболее распространенный вид рефракции, характерный для среднего состояния тропосферы. Часто наблюдается в дневные часы;

- повышенная рефракция (кривая 3) при $g_T < -8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$; $a_{\text{Э}} > 8500 \text{ км}$. В континентальных районах средних широт она наиболее часто отмечается в вечерние, ночные и утренние часы летних месяцев за счет температурных инверсий и резкого уменьшения влажности с высотой;

- критическая рефракция (кривая 4) при $g_T = -31.4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$; $a_{\text{Э}} = \infty$, поскольку при этом градиенте $\rho = a$ и волна движется параллельно земной поверхности на постоянной высоте, как над плоскостью. Условия возникновения критической рефракции те же, что и для повышенной рефракции;

- сверхрефракция, или волноводная рефракция (кривая 5), при $g_T < -31.4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$; $a_{\text{Э}} < \infty$. В этом случае радиус кривизны траектории $\rho < a$ и волна, отразившись от области высокого градиента, достигает поверхности Земли, отражается от нее, снова преломляется и т.д., т.е. появляется тропосферный волновод. Из-за малой вероятности появления таких волноводов данное явление не используется для регулярной работы радиолиний.

3.2.3 Траектория радиоволн в ионосфере

Относительная диэлектрическая проницаемость ионосферы меняется в пределах толщи ионосферы по сложному закону, уменьшаясь с высотой во внутренней ионосфере и увеличиваясь – во внешней. При этом значение $\epsilon_{И}$ может изменяться в широких пределах в зависимости от состояния ионизации и частоты распространяющейся волны. В таких условиях искривление траектории может быть значительным. В соответствии с законом $\epsilon_{И}(h)$ во внутренней ионосфере траектории пригибаются к Земле, во внешней – уходят от нее.

Положительная рефракция во внутренней ионосфере может стать такой, что волна, падающая на нижнюю границу ионосферы под углом $\varphi_0(h_0)$ (рисунок 4.7), возвратится обратно на Землю. Это явление обычно называют *отражением от ионосферы*.

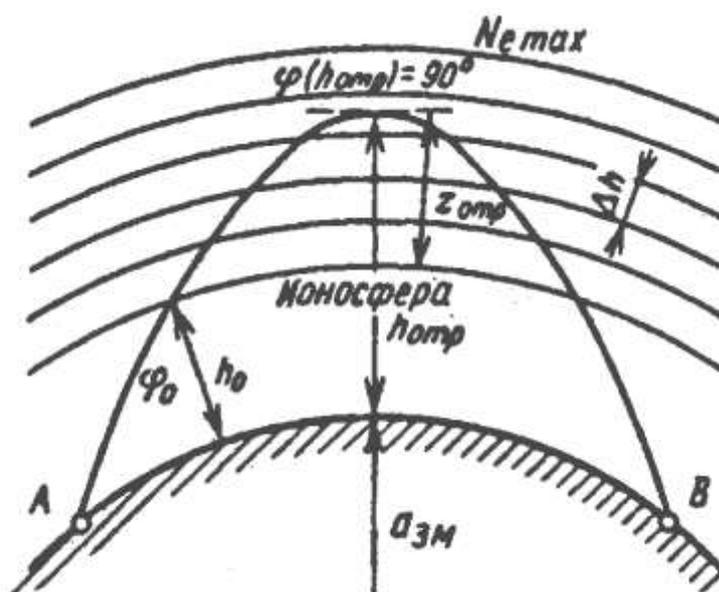


Рисунок 4.7 - Отражение от ионосферы

Первое условие учитывает, что в результате рефракции угол падения должен достигнуть на какой-то высоте $h_{отр}$ значения $\varphi(h_{отр}) = 90^\circ$. Это возможно, если коэффициент преломления $n(h_{отр}) = \sin \varphi_0(h_0) \cdot n_0$. У нижней границы ионосферы $n_0 \approx 1$ и первое условие принимает вид:

$$n_{И}(h_{отр}) = \sin \varphi_0(h_0). \quad (3.17)$$

Подставляя в (4.17) выражение $n_{И} = \sqrt{\epsilon_{И}}$, находим электронную концентрацию (плотность), необходимую для отражения волны:

$$N_e(h_{отр}) = \frac{f^2 \cos^2 \varphi_0}{80.8}. \quad (3.18)$$

Второе условие учитывает сферичность Земли и налагает ограничения на радиус кривизны траектории ρ . Чтобы волна вернулась на Землю, необходимо в области поворота траектории выполнение неравенства:

$$\rho(h_{\text{OTP}}) < (a_3 + h_{\text{OTP}}). \quad (3.19)$$

Рассмотрим процесс отражения при вертикальном падении волны на ионосферу, траектория при этом не искривляется. В то же время из (4.17) получаем, что условие отражения при вертикальном падении выполняется в области ионосферы, где $n_{\text{И}}(h_{\text{OTP}}) = \sin \varphi_0(h_0) = 0$, т.е. там, где диэлектрическая проницаемость достигает нулевого значения. Это будет иметь место в области, где электронная плотность:

$$N_e(h_{\text{OTP}}) = \frac{f_B^2}{80.8}, \quad (3.20)$$

где f_B – частота волны, вертикально падающей на ионосферу.

В ионосферной плазме относительная диэлектрическая проницаемость достигает значения $\epsilon_{\text{И}} = 0$ там, где частота распространяющейся волны $\omega = 2\pi f$ равна собственной частоте колебаний электронов (плазменная частота). В данной области коэффициент преломления $n_{\text{И}} = \omega \sqrt{\epsilon_{\text{И}} \mu_{\text{И}}} = 0$, поэтому распространение волны с частотой $\omega = \omega_e$ невозможно, и происходит поворот траектории обратно на Землю.

Максимальные частоты волн, отражающихся от ионосферы. Из формулы (4.18) следует, что от ионосферы могут отражаться волны с частотами:

$$f \leq \frac{\sqrt{80.8 N_e(h_{\text{OTP}})}}{\cos \varphi_0}. \quad (3.21)$$

Отсюда следует, что чем выше частота волны, тем большая электронная плотность нужна для ее отражения. При этом согласно (4.21) для заданной частоты f электронная плотность, необходимая для отражения, уменьшается с увеличением угла падения φ_0 .

Существует ограничение по условиям отражения. При наблюдаемых значениях $N_{e \text{ max}}$ и $\varphi_{0 \text{ max}}$ максимально высокая частота волны, которая может отразиться от ионосферы (в приближении плоской Земли), согласно (4.21):

$$f_{\text{max}} = \frac{\sqrt{80.8 N_{e \text{ max}}}}{\cos \varphi_{0 \text{ max}}}. \quad (3.22)$$

Говоря об отражении от области максимума электронной плотности, следует помнить, что область поворота траектории к Земле во всех случаях располагается несколько ниже $N_{e \text{ max}}$.

Расчеты и измерения показывают, что в соответствии с реальными значениями $N_{e \text{ max}}$ и $\varphi_{0 \text{ max}}$ условия отражения от ионосферы регулярно выполняются только для КВ, СВ и ДВ. Максимальные частоты волн, отражающихся при наклонном падении, имеют верхний предел около 30...40 МГц.

Простые траектории волн, отражающихся от ионосферы. Расчет радиолиний ведется в предположении, что волна распространяется по «простым траекториям», т.е. по дуге большого круга, путем многократных последовательных отражений от ионосферы и поверхности Земли.

Реальные антенны, излучающие волны с частотами, которые отражаются от ионосферы ($f < 30 \dots 40$ МГц), имеют относительно широкую диаграмму направленности, поэтому на ионосферу одновременно падает пучок лучей под разными углами φ_0 (рисунок 4.8). Согласно (4.17), чем круче траектория, тем глубже волна проникает в слой, т.е. отражение волн одной и той же частоты происходит на разных высотах. Это означает, что радиусы кривизны траекторий в зонах поворота на Землю неодинаковы. Градиент $\frac{dN_e}{dh}$, от которого зависит радиус кривизны, уменьшается при проникновении в глубь слоя. В нижней области слоя радиус кривизны увеличивается с высотой мало, поэтому более крутые траектории, проникая все глубже в слой (по мере уменьшения φ_0), отражаются и возвращаются на Землю, перекрывая все меньшие расстояния по Земле. Минимальное расстояние, перекрываемое по Земле волной, отраженной от ионосферы, называется *внешним радиусом мертвой зоны* $r_{МЗ}$ (см. рисунок 4.8). При приближении области отражения к $N_{e \max}$ радиус кривизны значительно увеличивается, и траектории с углами $\varphi_0 < \varphi_{кр}$ возвращаются на Землю тем дальше, чем они круче (см. рисунок 4.8).

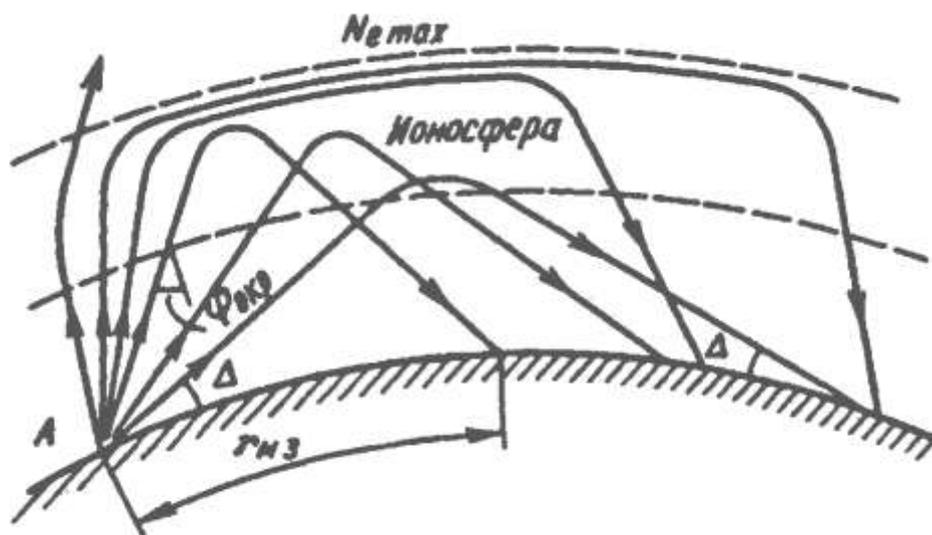


Рисунок 4.8 - Внешний радиус мертвой зоны $r_{МЗ}$

Наибольшая дальность распространения волны за счет отражения от ионосферы, измеренная по Земле, соответствует траекториям, касательным к земной поверхности и отражающимся вблизи $N_{e \max}$. Так, для слоя $F2$ $r_{\max} = 2500 \dots 4000$ км, для слоя E $r_{\max} = 2000$ км. Если длина радиолинии больше

r_{\max} , то сигнал может достигать точки приема путем многократных последовательных отражений от ионосферы и поверхности Земли.

Ранее упоминалось, что в ионосферной плазме, находящейся под воздействием постоянного магнитного поля Земли, происходит двойное лучепреломление, когда одна волна расщепляется на две: обыкновенную и необыкновенную. Строгая теория показывает, что обыкновенная составляющая с частотой $f > f_H$, где f_H – гиромагнитная частота, отражается от более высокого уровня электронной плотности, чем необыкновенная.

Рассеяние радиоволн слабыми неоднородностями диэлектрической проницаемости атмосферы. Атмосфера представляет собой среду, в которой наблюдается медленное изменение по высоте диэлектрической проницаемости, и одновременно существуют подвижные локальные объемы с диэлектрической проницаемостью, отличающуюся на небольшую величину $\Delta\epsilon$ от диэлектрической проницаемости окружающего пространства. Как плавная неоднородность, так и локальные объемы являются источниками рассеяния радиоволн. *Процессом рассеяния* называют процесс переизлучения электромагнитного поля в неоднородной среде по направлениям, отличным от направления распространения первичного поля.

Структуру рассеянного поля представляют как многолучевую. Элементарные составляющие этой структуры появляются в результате рассеяния первичного поля в разных участках неоднородной среды. В зависимости от свойств рассеивателей различают два вида рассеяния: некогерентное и когерентное.

Некогерентное рассеяние есть результат переизлучения первичного поля подвижными локальными неоднородностями диэлектрической проницаемости, хаотически двигающимися в пространстве. В этом случае фазы элементарных полей, рассеянных отдельными неоднородностями, меняются во времени по случайным независимым законам.

Когерентное рассеяние есть результат сложения элементарных полей, фазы которых изменяются по детерминированному (неслучайному) закону.

Свойства неоднородностей изменяются в пределах толщи атмосферы. Различают рассеяние радиоволн в тропосфере и ионосфере. Первый механизм называется *дальним тропосферным распространением* (ДТР), второй – *ионосферным рассеянием* (ИР). Наиболее применим в системах связи механизм ДТР.

При оценке условий рассеяния необходимо знать ту область тропосферы, которая эффективно участвует в формировании рассеянного поля на данной радиолинии. Эта область называется *эффективным рассеивающим объемом* или *просто рассеивающим объемом* $V_{\text{РАС}}$. На линиях ДТР, где пункты приема всегда располагаются за линией горизонта, прием осуществляется за счет неоднородностей, существующих в области тропосферы, нижняя граница которой ограничивается плоскостями, касательными к Земле в точках расположения передатчика и приемника.

4 ДИАПАЗОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИО-ВОЛН [1, 2]

4.1 Распространение сверхдлинных и длинных радиоволн

В этих диапазонах радиоволн для всех видов земной поверхности токи проводимости существенно преобладают над токами смещения. Благодаря этому при распространении поверхностной волны происходит лишь незначительное поглощение энергии, что, обуславливает распространение сверхдлинных и длинных волн на большие расстояния (порядка 3000 км).

В ионосфере СДВ и ДВ поглощаются слабо, поскольку в ней проходит незначительная часть трассы. Известно, что чем ниже частота радиоволны, тем ниже электронная концентрация, необходимая для поворота луча к Земле. Следовательно, высота поворота радиоволн СДВ и ДВ диапазонов – нижняя граница ионосферы (слой *D* или *E*). Начиная с расстояния 300...400 км, помимо земной волны, присутствует и отражённая от ионосферы волна. Эти волны интерферируют в точке приема, но на различных расстояниях от передатчика интенсивности земной и ионосферной волн разные. До 500 км учитывают, в основном, земную радиоволну и расчёт напряжённости поля ведут по формуле Шулейкина – Ван-дер-Поля, учитывающую конечность проводимости земли. После 500 км земная волна слабее ионосферной и распространение радиоволны осуществляется за счёт отражения от ионосферы. Тропосфера практически не влияет на распространение радиоволн в этих диапазонах. Можно сказать, что область пространства, где распространяются сверхдлинные и длинные волны – сферический слой, который лежит между земной поверхностью и нижним слоем ионосферы. Высота этого слоя – 80...100 км. Условие распространения при этом такие же, как и в сферическом волноводе: есть критическая длина волны (~100 км).

Расчёт радиолиний на СДВ и ДВ обычно проводится по эмпирическим формулам, чаще всего по эмпирической формуле Остина:

$$E_D = \left(\frac{300}{r} \right) \sqrt{G_1 P_1'} \sqrt{\theta \sin \theta} \exp \left(-0.0014 \frac{r}{\lambda^{0.6}} \right), \quad (4.1)$$

где P_1' – мощность, подводимая к антенне, кВт; $\theta = \frac{r}{a_{3M}}$; все длины выражены в километрах.

Основное преимущество линий связи на сверхдлинных и длинных волнах – большая устойчивость напряжённости электрического поля. Сила сигнала мало меняется в течение суток и в течение года и не подвержена случайным изменениям.

Основной недостаток – невозможность передачи широкой полосы частот и необходимость использовать громоздкие антенны.

В настоящее время сверхдлинных и длинных волн используются для телеграфной связи на дальние расстояния, радиовещания, радионавигации.

4.2 Особенности распространения средних волн

К средним волнам (СВ) относятся радиоволны длиной от 100 м до 1000 м (частоты 3...0.3 МГц). Средние волны могут распространяться как земные и как ионосферные.

Напряженность электрического поля *земных* радиоволн СВ диапазона для малых расстояний рассчитывают по формуле Шулейкина – Ван-дер-Поля, а для больших расстояний расчет ведут по законам дифракции. Средние волны испытывают существенное поглощение в полупроводящей земной поверхности и поэтому СВ радиоприемники, использующие земные радиоволны, имеют протяжённость не более 700 км. Все особенности распространения земных радиоволн, рассмотренные ранее, проявляются именно в СВ диапазоне.

Ионосферная радиоволна способна отразиться лишь при концентрации, свойственной слою *E*. Через слой *D* (самый низкий) волна проходит и сильно в нём поглощается. Слой *D* ионосферы появляется только днём, ночью его нет и, поэтому, ночью поглощение средних волн в ионосфере уменьшается.

Если пункт приема находится в зоне действия земной волны, то с наступлением темноты в эту точку начинает попадать также и ионосферная волна. Интерференция средних волн (земной и ионосферной) приводит к замираниям – случайным колебаниям поля сигнала. В случае, когда приемная станция расположена вне области действия земных радиоволн, замирания обязаны своим происхождением интерференции ионосферных волн, претерпевших разное число отражений от ионосферы. Для борьбы с замираниями средних волн применяются антенны, у которых максимум диаграммы направленности прижат к земной поверхности.

Средние волны используются, главным образом, в радиовещании. Типичная дальность радиоприема соответствует применению земной волны.

4.3 Распространение коротких волн

К коротким волнам (КВ) относятся радиоволны длиной от 10 м до 100 м (частоты 3...0.3 МГц).

Почва для этих волн ведёт себя, как диэлектрик. Это приводит к сильному поглощению земных волн, и они оказываются пригодными лишь для радиосвязи лишь расстояния порядка десятков километров.

Основной интерес представляют собой ионосферные волны. Причём области *D* и *E*, в основном, только поглощают короткие волны. Типичные

электронные концентрации, соответствующие повороту волны лежат в области слоя F . Применительно к ионосферным волнам КВ диапазона зона молчания представляет собой кольцевую область. Её внутренний радиус соответствует дальности приёма земной радиоволны, внешний обусловлен ионосферной волной. В зоне молчания ионосферная волна ещё не может быть использована, земная уже не может быть использована.

Выбор рабочих частот в диапазоне коротких волн достаточно прост. Со стороны высоких частот ограничение диапазона радиочастот соответствует прекращению поворота ионосферной волны к Земле. Соответствующая частота называется максимально применимой частотой – МПЧ ($f_{МПЧ}$):

$$f_{МПЧ} = \frac{f_{ПЛ}}{\cos \Theta},$$

где $f_{ПЛ}$ – плазменная частота ионосферы; Θ – угол падения волны.

ОРЧ – оптимальная рабочая частота лежит ниже МПЧ. Некоторое снижение частоты связано с обеспечением стабилизации условий поворота луча.

Поскольку затухание радиоволны в ионосфере растет обратно пропорционально квадрату частоты, снижение частоты нежелательно. Существует понятие наименьшей применимой частоты (НПЧ), при которой для данной мощности передатчика, напряжённость поля в месте приёма оказывается на грани требуемой нормы.

Концентрация электронов в области F меняется в зависимости от времени суток (день или ночь), а также меняется сезонно. Поэтому существуют так называемые дневные и ночные волны. Это поддиапазоны 10...25 м (дневные) и 35...100 м (ночные), рекомендуемые для связи в зависимости от времени суток.

Стабильность режима ионосферы нарушается время от времени изменением солнечной активности. Под действием возмущений на Солнце, изменяется и электронная концентрация ионосферы. При падении электронной концентрации в слое F , отраженная от ионосферы волна отсутствует, и коротковолновая линия связи перестаёт действовать.

Для диапазона КВ типичны интерференционные замирания, обусловленные наложением в месте приема нескольких относительно независимых волн, отражённых от ионосферы разное число раз (рисунок 5.1).

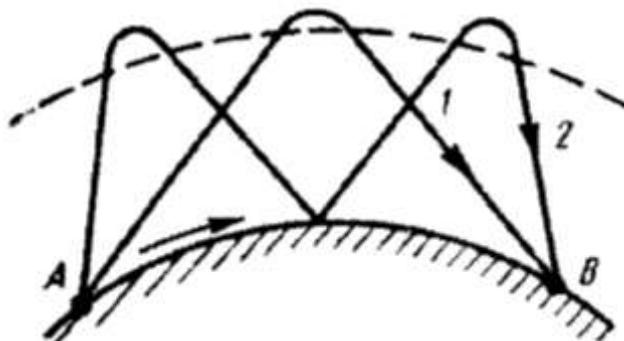


Рисунок 5.1 - Многократные отражения от ионосферы и Земли

Преимущество коротковолновых линий связи – возможность использовать остронаправленные антенны. Отсюда экономное расходование энергии при двухсторонней связи. Короткие волны мало поглощаются в ионосфере и при отражении от земли, поэтому могут быть использованы для дальней радиосвязи.

Основы расчета КВ радиолиний. Углы наклона траекторий на КВ радиолиниях можно рассчитать с использованием теорем Брайта, Тьюна и Мартина. Эти теоремы позволяют заменять неизвестную истинную криволинейную траекторию AKB (рисунок 5.2) с высотой $h_{И}$, по которой сигнал распространяется с групповой скоростью $c_{ГР}$ на эквивалентный треугольный путь ACB с действующей высотой $h_{Д}$, по которому сигнал распространяется со скоростью света в свободном пространстве c_0 .

Из эквивалентного треугольного пути определяется угол падения волны на плоскую ионосферу φ_0 :

$$\operatorname{tg}\varphi_0 = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\left[1 + \frac{h_{Д}}{a_{ЗМ}} - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right], \quad (4.2)$$

где $\theta = \frac{r}{a_{ЗМ}}$ – центральный угол, соответствующий дуге r (см. рисунок 5.2).

На длинных трассах, где имеет место многоскачковое распространение, под r подразумевается длина одного скачка.

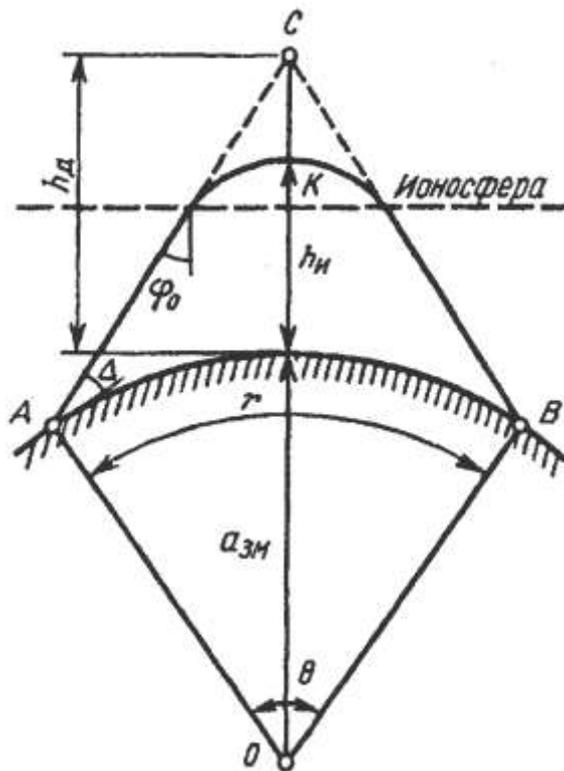


Рисунок 5.2 – Взаимосвязь «угол θ - дуга r »

Угол наклона траектории Δ связан с углом падения φ_0 соотношением:

$$\Delta = \frac{\pi}{2} - \varphi_0 - \frac{\theta}{2}. \quad (4.3)$$

В диапазоне КВ при работе на частотах, близких к оптимальным, в точке приема поле обычно формируется несколькими волнами, претерпевшими различное число отражений от ионосферы. В разные сезоны и периоды суток соотношение между напряженностями поля отдельных волн меняется. Поэтому для поддержания устойчивой работы антенны на передаче и приеме должны обеспечивать интенсивное излучение и прием в направлении целого спектра углов, соответствующих волнам с наибольшими амплитудами.

Выбор наклона и ширины ДН антенн в вертикальной плоскости рекомендуется производить с учетом как средних значений углов наклона траекторий $\Delta_{\text{СР}}$, так и возможных флуктуации относительно $\Delta_{\text{СР}}$.

Средние значения углов $\Delta_{\text{СР}}$ рассчитываются по (5.3), исходя из регулярных суточных и сезонных изменений действующих высот отражения $h_{\text{Д}}$. Верхняя граница углов $\Delta_{\text{СР}}$ определяется максимально возможным наблюдаемым числом отражений от слоя $F2$ на данной трассе в периоды, когда высота этого слоя максимальна. Нижняя граница $\Delta_{\text{СР}}$ для всех линий обычно принимается около $2...3^\circ$. Траектория с более низкими углами малоэффективна из-за сильного ослабления в ионосфере и влияния Земли.

Для трасс протяженностью более $2000...3000$ км верхние границы угла $\Delta_{\text{СР}}$, рассчитанные с учетом реально наблюдаемых траекторий, приведены в таблице 5.1. Нижняя граница этого угла составляет $2...3^\circ$ для всех трасс.

Таблица 4.1

Длина линии, км	2000... 3000	3000...4000	4000...7000	7000...10000
Δ_{max}^0	20	15...18	10...12	10...12

Флуктуации значений углов наклона траекторий относительно средних значений во многих случаях весьма существенны. Они обусловлены различными причинами, одна из которых состоит в непрерывном случайном изменении высоты отражающего слоя, другая – в том, что отражающая область ионосферы часто не является сферически слоистой. Поэтому в формировании принимаемого сигнала участвуют попеременно или одновременно несколько областей ионосферы. Такой характер распространения даже при приеме одного луча приводит к распределению энергии волны в широком спектре углов, т.е. к флуктуациям углов наклона траекторий. При многолучевом приеме флуктуации углов наклона присущи каждой из траекторий и спектры углов, в которых распределена энергия волны, могут частично или полностью перекрывать друг друга.

В горизонтальной плоскости на ширину ДН антенн оказывает влияние так называемая *девиация лучей*, т.е. отклонение направления распространения волны от дуги большого круга. Основными причинами девиации лучей являются наклоны отражающих слоев ионосферы в направлении, перпендикулярном трассе. Можно ориентировочно полагать, что в горизонтальной плоскости антенны должны обеспечивать интенсивное излучение и прием в диапазоне углов $3...5^\circ$ относительно дуги большого круга, т.е. относительно максимума ДН антенн. В высоких широтах из-за большой неоднородности ионосферы углы девиации лучей более значительны.

Влияние условий распространения на работу радиовещания. Декаметровые волны имеют ограниченное применение для вещания из-за большой загруженности этого диапазона, высокого уровня помех станций и относительно низкого качества приема. Наиболее типично применение КВ диапазона для вещания на труднодоступные удаленные районы, когда системы, работающие на более коротких (УКВ) или более длинных (СВ, ДВ) волнах, оказываются непригодными из-за ограниченного радиуса действия. Вещание на декаметровых волнах предусматривает обслуживание заданной территории с помощью ионосферных волн.

Волновое расписание для вещания составляется с учетом условий распространения в течение целого сезона. В результате во многих случаях работа ведется на частотах, далеких от ОРЧ, что снижает уровень сигнала и качество приема.

Зона обслуживания вещательного передатчика имеет границы, которые при учете помех только природного происхождения определяются минимально допустимой напряженностью поля E_{\min} .

Для диапазона КВ характерно наличие мертвой зоны, в пределах которой регулярный прием невозможен, так как радиус действия земной волны обычно меньше, чем наименьшее расстояние, перекрываемое по Земле ионосферной волной. Внутренний радиус этой зоны устанавливают путем расчета напряженности поля земной волны. Рассчитывая напряженность поля на разных расстояниях от передающей антенны, определяют то расстояние, при котором уровень поля равен минимально допустимому значению. Внешний радиус устанавливается по критическому углу падения волны на ионосферу.

4.4 Распространение ультракоротких волн на наземных радиопалиниях

Распространение УКВ земной волной. К диапазону УКВ относят радиоволны длиной от 0.1 мм до 10 м (частоты от 30 МГц до 3000 ГГц). Характерной особенностью этого диапазона является его большая частотная емкость, позволяющая передавать широкополосную информацию.

Ультракороткие волны широко применяются в наземных системах связи и вещания. Большинство таких систем работает на земной волне. Исключение составляют лишь линии связи, работающие на волнах, рассеянных в атмосфере.

В рассматриваемом диапазоне волн устойчивая работа на земной волне ограничена расстоянием прямой видимости (десятки километров). Для передачи информации на расстоянии в сотни и тысячи километров используют радиорелейные линии (РРЛ) с интервалами в пределах прямой видимости.

Системы телевизионного и звукового вещания работают на волнах метрового и дециметрового диапазонов. Устойчивый радиус действия вещательных передатчиков в этих диапазонах также ограничен расстоянием порядка прямой видимости. Для увеличения радиуса действия станций стараются поднимать антенну на передаче по возможности выше за счет, как естественного рельефа местности, так и башни, на которой устанавливается антенна.

Расчет поля в освещенной зоне с учетом рефракции радиоволн в тропосфере. В диапазоне УКВ высота поднятия антенн на передаче (h_1) и приеме (h_2) обычно больше длины волны λ , поэтому весь путь распространения земной волны делят на три зоны: освещенную, полутени и тени.

В освещенной зоне поле имеет интерференционную структуру за счет сложения прямой и отраженной от Земли волн. Расчет напряженности поля в этой зоне базируется на интерференционной формуле (3.5).

Для практических расчетов необходимо учесть электрическую неоднородность тропосферы.

Электрическая неоднородность тропосферы, проявляющаяся в рефракции радиоволн, влияет на все параметры, от которых зависит поле в освещенной зоне. По сравнению со случаем прямолинейного распространения изменяются длины путей (рисунок 5.3) прямой r_1 и отраженной r_2 волн, т.е. сдвиг фаз $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)$, угол наклона траектории отраженной волны Δ и соответственно коэффициент отражения R .

На радиолиниях, где в пределах существенной области для отражения поверхность Земли достаточно ровная и плоская, модуль коэффициента отражения $R \approx 1$, $\theta \approx \pi$.

Для таких условий интерференционная формула имеет вид:

$$E_D = \frac{\sqrt{30G_1P_1'}}{r} \cdot 2 \sin \left[\frac{2\pi h'_{1Э} h'_{2Э}}{\lambda r} \right]. \quad (4.4)$$

Формула для расчета напряженности поля еще более упрощается, если рассматривать большие расстояния r (в пределах освещенной зоны), при которых в (5.4) синус можно заменить его аргументом. Это можно сделать, если $\frac{2\pi h'_{1Э} h'_{2Э}}{\lambda r} \leq \frac{\pi}{9}$. Тогда на расстояниях $R \geq \frac{18h'_{1Э} h'_{2Э}}{\lambda}$ формула для расчета напряженности поля приобретает вид:

$$E_D = \frac{\sqrt{30G_1 P_1'}}{r^2} \cdot \frac{4\pi h'_{1\varepsilon} h'_{2\varepsilon}}{\lambda}. \quad (4.5)$$

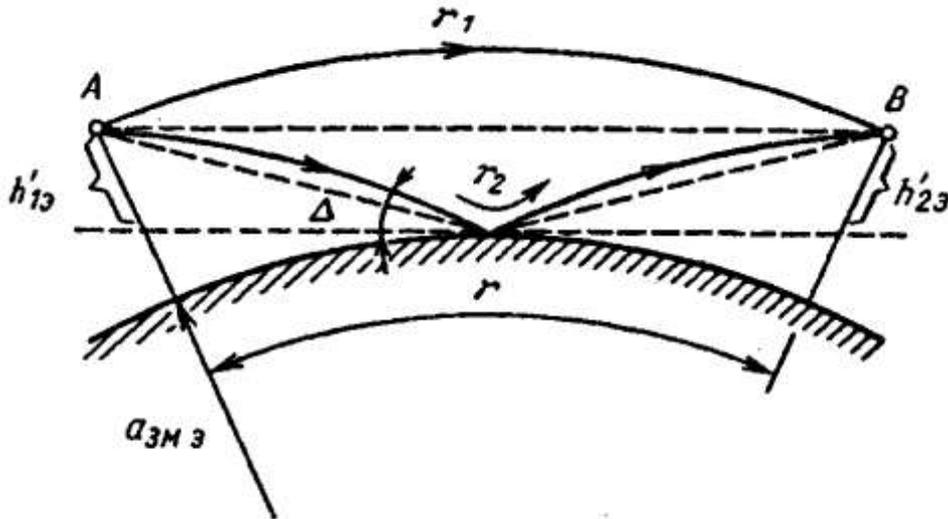


Рисунок 5.3

Эта формула была получена Б.А.Введенским и называется квадратичной формулой Введенского.

Видно, что на указанных расстояниях r интерференционная структура поля перестает существовать и величина поля уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния. Столь резкое убывание поля можно объяснить тем, что при увеличении расстояния уменьшается разность хода $\Delta r = r_2 - r_1$, т.е. сокращается пространственная разность фаз $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r$. В то

же время при скользящем отражении $R \rightarrow -1$ при любой поляризации. Другими словами, чем больше расстояние r , тем полнее взаимная компенсация прямой и отраженной волн в точке приема, что и вызывает сравнительно быстрое убывание поля.

На рисунке 5.4 представлена зависимость множителя ослабления от расстояния, которая соответствует формулам (5.4) и (5.5).

Расчет поля с учетом рельефа местности. Земная поверхность никогда не бывает идеально гладкой. Даже равнинная местность покрыта большим числом хаотически расположенных неровностей. В зависимости от их размеров, электрических свойств, количества, а также от длины распространяющейся волны элементы рельефа оказывают различное влияние на поле в точке приема.

Рассмотрим сначала влияние мелких неровностей, которые придают земной поверхности свойства так называемой шероховатой поверхности. Поверхность считается шероховатой, если выполняется известный из курса физики критерий Рэлея:

$$\Delta h > \frac{\lambda}{8 \sin \Delta} \quad (4.6)$$

где Δh – средняя высота неровностей в пределах существенной области для отражения; Δ – угол возвышения траектории отраженной волны (см. рисунок 5.4).

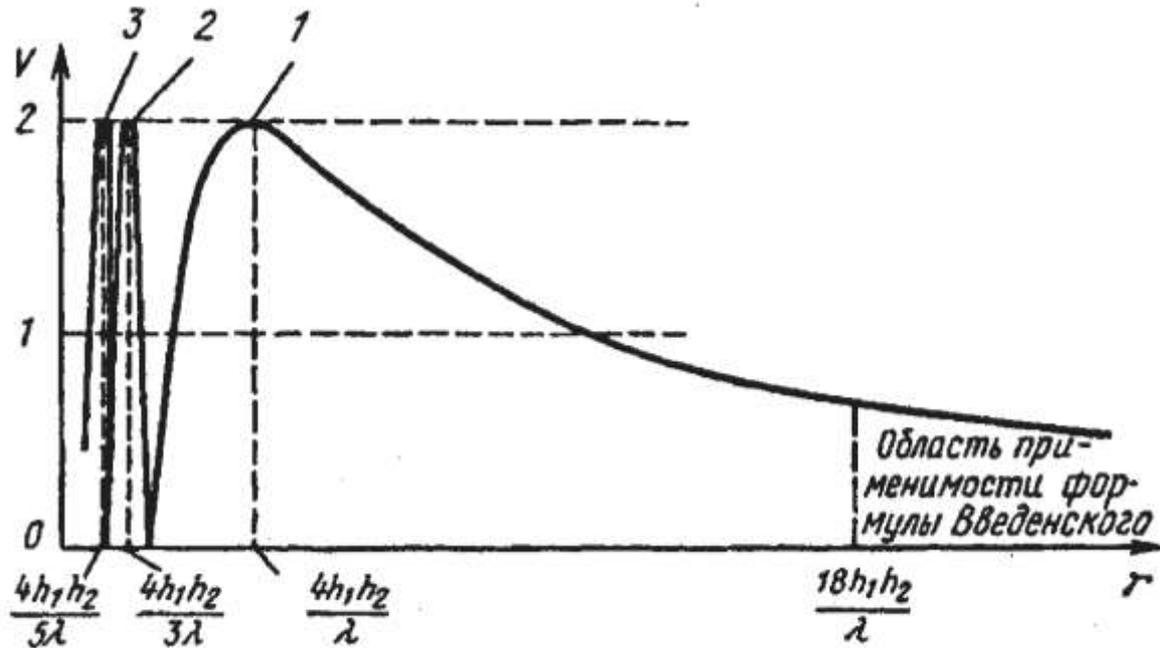


Рисунок 5.4 - Зависимость множителя ослабления от расстояния

Если условие (5.6) выполняется, то отражение от Земли считается рассеянным (диффузным) и в формулах для расчета напряженности поля коэффициент отражения R заменяется на эффективный $R_{\text{эф}} < R$. Значения $R_{\text{эф}}$ для различных видов неровной земной поверхности приведены в литературе.

Крупные элементы рельефа местности в виде, например, гор и долин, холмов и оврагов, строений разнообразны по размерам, форме, местоположению на трассе. Неровности земной поверхности такого типа существенно влияют на условия распространения земной волны. Чем меньше длина волны, тем это влияние более резко. В диапазоне УКВ существуют два различных подхода к учету рельефа.

На наземных линиях связи (РРЛ) с интервалами в пределах прямой видимости, где одно передающее устройство обслуживает один фиксированный пункт приема, применяют детерминированные методы учета рельефа. Эти методы основаны на приближенной аппроксимации больших неровностей земной поверхности телами правильной геометрической формы: сферой, клином и т.п. Отметим лишь, что наличие крупных препятствий на трассе иногда приводит к неожиданным эффектам, которые на первый взгляд кажутся неожиданными.

Рассмотрим, например, случай, когда на пути распространения земной волны имеется одиночное препятствие (рисунок 5.5). Даже при небольшом

расстоянии между пунктами передачи и приема препятствие закрывает прямую видимость, и точка приема оказывается в зоне тени. Затенение точки приема препятствием приводит, как правило, к значительному ослаблению сигнала. Однако в некоторых случаях, как показывают эксперименты, напряженность поля в точке приема может в несколько раз превышать значение напряженности поля в отсутствие препятствия. Этот эффект называют эффектом усиления за счет препятствия.

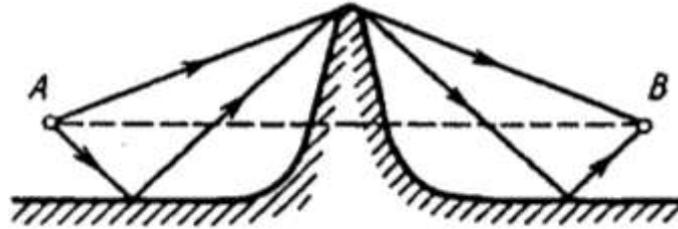


Рисунок 5.5 - Эффект усиления за счет препятствия

В рамках отражательной трактовки эффект усиления за счет препятствия можно пояснить следующим образом. Как показано на рисунке 5.5, вершина препятствия возбуждается двумя волнами: прямой и отраженной от Земли, амплитуды которых будем считать одинаковыми и равными E_0 . Если эти две волны складываются в фазе, то вершина препятствия возбуждается полем с амплитудой $2E_0$. Возбужденная вершина является источником вторичных волн, которые достигают точки приема также по двум путям: как прямая и отраженная от Земли волны, амплитуды которых примерно одинаковы. Если эти волны в точке приема складываются в фазе, то при идеальной ситуации напряженность поля в точке B будет равна $4E_0$.

Таким образом, при удачном стечении обстоятельств напряженность поля за препятствием может превышать значение поля в свободном пространстве. Если учесть, что на реальных радиоприемах напряженность поля в точке приема обычно меньше напряженности поля в свободном пространстве, то выигрыш в усилении за счет препятствия по сравнению с полем в его отсутствие получается еще больше и может достигать десятков децибел.

Практическое использование эффекта усиления за счет препятствия реализуется установкой на вершинах гор и холмов специальных пассивных ретрансляторов, имитирующих этот эффект.

Расчет систем радиовещания и телевидения, а также систем связи с подвижными объектами выполняется с помощью статистических методов. В основе вероятностных оценок условий приема в разных участках зоны, обслуживаемой тем или иным передатчиком, лежат, как правило, обобщенные результаты измерений напряженности поля. Наиболее сложные условия распространения наблюдаются в крупных городах, застроенных разноэтажными зданиями.

Распространение УКВ в городе. Условия приема сигналов в диапазоне УКВ существенно зависят от расположения приемной антенны относи-

тельно окружающих ее предметов. В городских условиях такими предметами являются здания, деревья, заводские трубы, мачты и т.п. Близко расположенные здания могут в зависимости от их расположения оказаться затеняющими препятствиями или источниками местных отраженных волн.

Затеняющее действие отдельного препятствия приводит к тому, что поле за препятствием появляется в результате двух процессов: дифракции и проникновения через препятствие. Дифракция в рассматриваемом диапазоне волн протекает с большими потерями. Проникновение сквозь препятствия типа стен зданий также сопровождается большими потерями за счет поглощения. Измерения показывают, что напряженность поля за отдельно стоящим кирпичным зданием на 20...30 дБ ниже, чем перед ним, а за железобетонным строением уровень сигнала падает на 30...40 дБ. В целом внутри городской застройки имеются многочисленные теневые зоны, где сигнал значительно ослаблен.

Действие окружающих зданий как источников отраженных волн проявляется как в виде неравномерного распределения амплитуды поля в пространстве из-за интерференции многочисленных отраженных волн, так и в своеобразном подсвечивании теневых зон. В случае вертикальной поляризации первичного поля отражения наиболее интенсивны от предметов, протяженных по вертикали (стены зданий, деревья). Большое влияние местных предметов на условия приема вертикально-поляризованного поля является одной из причин преимущественного применения горизонтальной поляризации в системах телевизионного вещания.

Сложность условий распространения УКВ в городе определяет статистический характер как теоретических, так и экспериментальных исследований. По условиям приема сигнала можно выделить три наиболее типичных ситуации: передающая и приемная антенны находятся над уровнем городской застройки, и между ними имеется прямая видимость; связь между подвижным объектом и базовой станцией; связь между двумя подвижными объектами.

В первом случае, характерном для приема сигналов телевизионного вещания, расчет напряженности поля ведут по квадратичной формуле Введенского (5.4), умножая результат на поправочный коэффициент (обычно 0.4...0.6).

Во втором и третьем случаях между пунктами передачи и приема, как правило, нет прямой видимости, и основной вклад в формирование многолучевого поля вносят отражения от зданий в окрестности подвижного пункта.

Рассмотрим закономерности изменения напряженности поля в точке приема в городских условиях в зависимости от расстояния, частоты волны и высот установки антенн.

На рисунке 5.6 приведены зависимости среднего (медианного) значения мощности сигнала P_C от расстояния r при различных высотах подъема антен-

ны базовой станции h_1 , измеренные на частоте 922 МГц. Высота подъема антенны на подвижном объекте принята равной 3 м.

Штриховой линией показана зависимость P_C от расстояния для условий свободного пространства. Уровень 0 дБ соответствует полю в свободном пространстве на расстоянии 1 км от базовой станции.

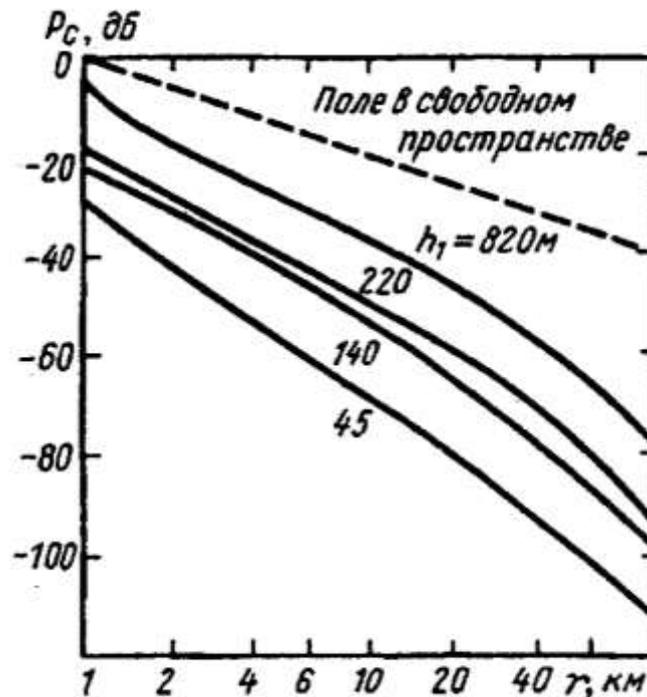


Рисунок 5.6 - Зависимость мощности сигнала P_C от расстояния r на частоте $f = 922$ МГц

Анализ приведенных зависимостей показывает, что при увеличении расстояния до 15 км мощность сигнала убывает как r^{-3} . Последующее увеличение r приводит к еще более быстрому уменьшению уровня сигнала.

Ослабление сигнала в городе возрастает также с увеличением его частоты. На поле в точке приема влияют и другие факторы. Установлено, что уровень сигнала зависит от расположения улиц в городе, которые оказывают канализирующее действие на радиоволны. Вдоль радиально расположенных улиц (относительно базовой станции) уровень сигнала на 10...20 дБ выше, чем в перпендикулярных направлениях.

5 РАСПРОСТРАНЕНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ ВОЛН НА КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛИНИЯХ

5.1 Особенности спутниковой связи

Широкое применение находят радиолинии большой протяженности, на которых обмен информацией между конечными пунктами ведется с помощью ретрансляционной станции, установленной на ИСЗ. Работа идет по схеме Земля - ИСЗ - Земля (рисунок 5.7). Самостоятельное значение имеют также радиолинии Земля - ИСЗ для передачи информации на спутник и линии ИСЗ - Земля для приема информации со спутника. Все упомянутые радиолинии относятся к классу космических. Условия работы космических линий имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при изучении процессов распространения радиоволн.

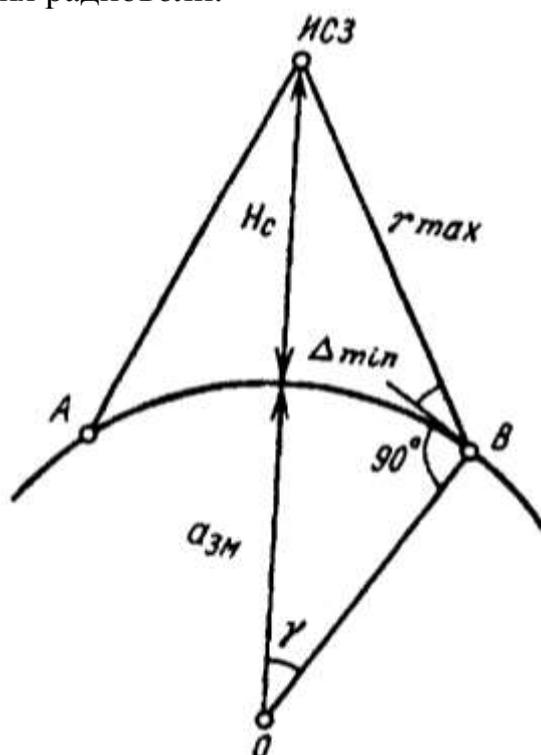


Рисунок 5.7 - Схема радиолинии «Земля - ИСЗ – Земля»

Оптимальные высоты полета связных ИСЗ лежат в пределах 10000...40000 км над поверхностью Земли. Такое расположение бортовых ретрансляторов приводит к необходимости использовать на космических линиях волны с частотами выше 100 МГц ($\lambda < 3$ м), не отражающиеся от ионосферы.

Большинство внутренних и международных спутниковых линий связи в настоящее время работают в полосах 6/4 и 8/7 ГГц (числитель соответствует

полосе частот на участке линии Земля - ИСЗ, знаменатель – ИСЗ – Земля). В более высоких частотных диапазонах выделены полосы 14/12 и 30/20 ГГц.

Основные явления, сопровождающие распространение радиоволн таких частот, сводятся к затуханию в атмосферных газах и осадках, изменению поляризации волн за счет эффекта Фарадея и осадков, случайным флуктуациям амплитуды и фазы принимаемого поля, вариациям углов прихода, ограничению полосы частот, передаваемой без искажений.

При движении ИСЗ по любой орбите, кроме геостационарной (экваториальная круговая орбита с высотой $H_C = 35860$ км), происходит перемещение ИСЗ относительно земных пунктов передачи и приема. При этом изменяются угол возвышения траектории распространения волны относительно линии горизонта и длина пути, проходимого волной в атмосфере. Ранее было показано, что при малых углах возвышения условия распространения значительно ухудшаются. Поэтому спутниковые линии связи работают только при углах $\Delta \geq 5^\circ$. При проектировании таких линий должны учитываться изменяющиеся условия распространения при перемещении спутника в секторе углов возвышения от 5 до 90° .

Перемещение спутника относительно наземной станции обуславливают прием, сопровождающийся эффектом Доплера. Доплеровское смещение частоты является причиной искажения спектра сигнала.

Высокие требования к устойчивости работы спутниковых систем связи делают необходимым тщательное изучение условий распространения на линии.

5.2 Потери в тракте распространения

Основные потери передачи. Большая протяженность линии Земля - ИСЗ, оцениваемая десятками тысяч километров, является причиной больших основных потерь передачи L_0 . Если высоты орбит спутников составляют $10000 \dots 36000$ км, то максимальная дальность между наземным пунктом и ИСЗ изменяется от 17000 до 40000 км. Таким расстояниям согласно соответствуют основные потери передачи на частоте 3 ГГц от 185 до 193 дБ, а на частоте 30 ГГц – от 205 до 214 дБ. Для компенсации таких больших потерь необходим высокий энергетический потенциал линии, который в значительной степени обеспечивается сложным наземным оборудованием.

При расчете энергетики определяют основные потери для максимального расстояния r_{\max} между ИСЗ и наземным пунктом при минимально допустимом угле возвышения Δ_{\min} траектории распространения волны. Согласно рисунку 5.7:

$$r_{\max} = \sqrt{H^2 + a_{3M}^2 - 2a_{3M}H \cos\gamma}, \quad (5.1)$$

где $H = H_C + a_{3M}$ – расстояние от центра Земли до спутника;
 $\gamma = 90^\circ - \Delta_{\min} = \arcsin \left[\frac{a_{3M} \cos \Delta_{\min}}{H} \right]$.

В случае эллиптической орбиты расчет следует производить для $H_C = H_A$, где H_A – высота апогея.

Ослабление и деполяризация волн в тропосфере. В диапазонах волн, выделенных для космических линий связи, ослабление волн в тропосфере может быть значительным. Напомним, что ослабление в тропосфере складывается из потерь в газах и рассеяния и поглощения в дожде, тумане, облаках.

Поглощение в газах согласно [2] в диапазоне частот 1...10 ГГц при углах возвышения $\Delta > 5^\circ$ невелико. Однако при повышении частоты ослабление быстро возрастает, и на частоте 20 ГГц множитель ослабления V_T достигает значения –10 дБ.

Ослабление в дожде незначительно на частотах $f < 6$ ГГц при любой интенсивности дождя (J_D – интенсивность осадков, мм/ч) и углах возвышения траекторий $\Delta > 5^\circ$. Но на частотах $f > 10$ ГГц даже в условиях умеренного дождя ($J_D < 10$ мм/ч), ослабление составляет единицы децибел, увеличиваясь в периоды ливней ($J_D > 40$ мм/ч) до десятков децибел.

Значительное ослабление в дожде волн с частотами выше 10 ГГц приводит к необходимости повышать энергетические запасы на линиях, работающих на частотах этого диапазона. Однако не всегда такие запасы могут быть реализованы. Для уменьшения ослабления рекомендуют работать при больших углах возвышения, когда путь, проходимый через толщу дождя, относительно невелик.

В интенсивных осадках, особенно в дожде, кроме ослабления наблюдаются явление деполяризации, т.е. изменение поляризации волны в результате ее рассеяния на сфероидальных каплях дождя. Это явление следует учитывать при работе на частотах выше 10 ГГц, когда два канала работают в одном частотном диапазоне, но с ортогональными поляризациями. Деполяризация приводит к взаимным помехам между каналами.

Тепловые и поляризационные потери, связанные с прохождением радиоволн через ионосферу.

Тепловые потери в ионосфере обусловлены ее конечной проводимостью. Удельная проводимость ионосферы в первом в первом приближении обратно пропорциональна квадрату частоты и существенна лишь на частотах $f < 100$ МГц. Спутниковые системы связи работают на более высоких частотах, и поэтому тепловыми потерями в ионосфере можно пренебречь.

Поляризационные потери обусловлены рассогласованием поляризации принимаемого поля и приемной антенны в результате эффекта Фарадея. Перемещение спутника, а также изменение параметров ионосферы являются причиной непрерывного изменения угла поворота Ψ_Φ плоскости поляризации принимаемого поля. Если поле с меняющейся поляризацией принимать на ан-

тенну с линейной поляризацией, то появятся поляризационные замирания, что эквивалентно потерям.

Максимальное значение угла поворота плоскости поляризации $\Psi_{\Phi \max}$, когда ИСЗ находится во внешней ионосфере и волна под углом возвышения Δ пересекает всю ее толщу:

$$\Psi_{\Phi \max} = \frac{2.32 \cdot 10^{19}}{f^2 \sqrt{1 - 0.9 \cos^2 \Delta}}, \quad (5.2)$$

где $\Psi_{\Phi \max}$ измеряется в градусах, а f – в герцах. Расчеты показывают, что углы $\Psi_{\Phi \max}$ на частоте 100 МГц составляют тысячи градусов, а на частоте 3 ГГц уменьшаются до единиц градусов, поэтому поляризационные потери учитывают на частотах $f < 3$ ГГц. Абсолютная величина потерь, дБ:

$$L_{\Phi} = \frac{P(\Psi = 0)}{P(\Psi \neq 0)} = \frac{1}{\cos^2 \Psi_{\Phi}} \quad (5.3)$$

или $L_{\Phi} = -20 \lg |\cos \Psi_{\Phi}|$.

Флуктуации уровня сигнала. На трассах Земля - ИСЗ при углах возвышения более 5° прием сопровождается быстрыми неглубокими замираниями (мерцаниями) интерференционного происхождения. Точки приема помимо прямой волны достигает множество волн слабой интенсивности, рассеянных на локальных неоднородностях в атмосфере.

На частотах, обычно используемых на космических линиях, в основном проявляются тропосферные мерцания, характеризующиеся следующими закономерностями: глубина флуктуации увеличивается с уменьшением угла возвышения траектории и при укорочении длины волны (рисунок 5.8); на более пологих траекториях путь, проходимый волной в тропосфере, увеличивается, и все большее число неоднородностей участвует в рассеянии. Приведенные на рисунке 5.8 зависимости справедливы для угла возвышения $\Delta = 5^\circ$.

Внешние шумы, влияющие на работу космических радиолиний. На работу космических линий существенное влияние оказывают внешние шумы, в отличие от наземных систем, где условия приема лимитируются внутренними шумами аппаратуры. Объясняется это тем, что на космических линиях низкий уровень принимаемого сигнала приводит к необходимости использовать земные приемники с параметрическими или молекулярными усилителями высокой частоты, часто охлаждаемыми азотом или гелием. При этом внутренние шумы приемника в диапазоне 1...10 ГГц снижаются до 12...30 К и внешние шумы становятся соизмеримы, а в ряде случаев – значительно превосходящими по уровню внутренние шумы приемника.

Суммарный уровень шумов космического излучения и нагретой атмосферы имеет четко выраженное «окно», расположенное в диапазоне 1...10 ГГц. Нижняя граница «окна» лимитируется космическим излучением, которое на частотах ниже 1 ГГц достигает яркостной температуры в сотни градусов, чем ограничивает диапазон применимых частот при работе с малошумя-

щими приемниками. Верхняя граница закрывается шумами атмосферы, которые на частотах больше 10 ГГц быстро возрастают и достигают максимальной температуры 20...300 К на частотах 20...25 ГГц. При оценке атмосферных шумов необходимо учитывать, что их уровень на входе приемника понижается по мере подъема ДН приемной антенны над линией горизонта.

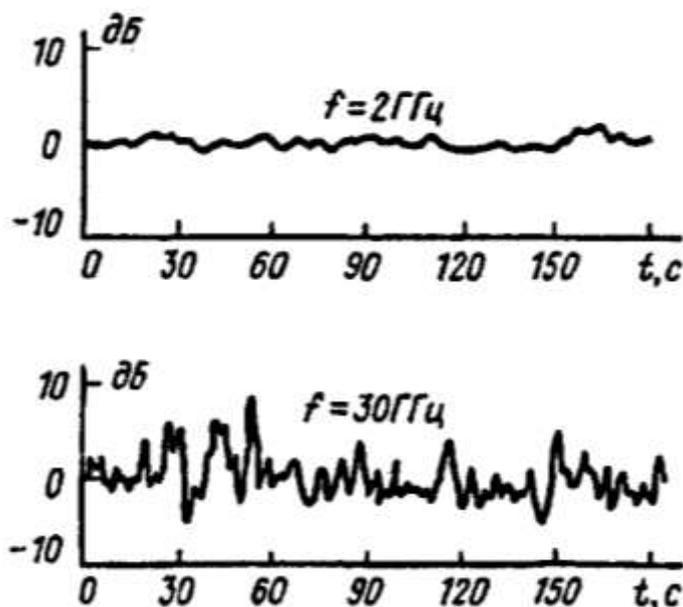


Рисунок 5.8 - Тропосферные мерцания

При средних метеорологических условиях, узкой ДН антенны, углах возвышения $\Delta > 5^\circ$ в диапазоне частот 4...6 ГГц суммарная шумовая температура от внешних источников оценивается значением 30...50 К.

Для бортового приемника основным внешним источником помех, когда бортовая антенна ориентирована в направлении на Землю, является радиоизлучение нагретой поверхности Земли.

5.3 Энергетические соотношения на космических радиолниях

При расчете энергетики систем связи через ИСЗ параметры антенн и приемных устройств связаны многими ограничениями. Антенны земных комплексов должны иметь максимально возможные коэффициенты усиления для компенсации больших потерь в тракте распространения. Такое решение оказывается экономически наиболее выгодным. Выбор бортовой антенны ограничен допустимой массой и габаритными размерами. Во многих случаях коэффициент усиления бортовой антенны регламентирован только угловыми размерами зоны обслуживания на поверхности Земли. Выбор земных приемных устройств однозначно определяется типом малошумящих приемников из-за нормируемого низкого уровня принимаемого сигнала. Бортовые прием-

ники нерационально выполнять с шумовой температурой ниже 290 К, если бортовая антенна ориентирована на Землю. Рабочая частота системы выбирается в соответствии с частотным регламентом МККР, а также с учетом частотной зависимости характеристик антенн, потерь в тракте распространения и интенсивности внешних шумов. Мощность бортового передатчика практически всегда задается исходя из общей энергоемкости космического аппарата. Поэтому одним из наиболее подвижных элементов энергетики космических радиолиний является мощность земного передатчика.

Рассмотрим метод расчета мощности передатчика для случая, когда электрические характеристики приемного устройства и антенн заданы и расчет сводится к определению параметров тракта распространения.

Мощность земного передатчика, дБ:

$$P_{1\text{ЗМ}} = P_{2\text{Б}} + L_1 - \eta_{1\text{ЗМ}} - \eta_{1\text{Б}}, \quad (5.4)$$

где $P_{2\text{Б}}$ – мощность сигнала на входе бортового приемника, необходимая для обеспечения заданного качества работы линии; L_1 – наибольшие потери передачи на участке Земля - ИСЗ, который обозначен индексом 1 ; $\eta_{1\text{ЗМ}}$, $\eta_{1\text{Б}}$ – КПД фидеров земной передающей антенны и бортовой приемной соответственно.

При расчете $P_{2\text{Б}}$ будем исходить из заданного отношения сигнал-помеха на входе приемника $\left(\frac{P_C}{P_{\text{Ш}}}\right)_{\text{ВХ}}$, которое зависит от требуемого качества работы, вида модуляции, помехозащищенности приемника и других технических параметров оборудования. Тогда:

$$P_{2\text{Б}} = \left(\frac{P_C}{P_{\text{Ш}}}\right)_{\text{ВХ}} \cdot P_{\text{Ш.ВХ.Б}},$$

где $P_{\text{Ш.ВХ.Б}}$ – мощность шума на входе бортового приемника:

$$P_{\text{Ш.ВХ.Б}} = kT_{\text{Ш.Б}}\Delta f.$$

При определении $T_{\text{Ш.Б}}$ учитывают, что шумовая температура приемной бортовой антенны определяется радиоизлучением поверхности Земли T_3 , поскольку космический фон воспринимается только слабыми боковыми лепестками ДН антенны.

5.4 Особенности распространения волн оптического диапазона

5.4.1 Общие вопросы распространения волн оптического диапазона

Оптическое излучение охватывает диапазон волн примерно от 0.01 до 1000 мкм (частоты $3 \cdot 10^{11} \dots 3 \cdot 10^{16}$ Гц). Весь диапазон принято разбивать на ультрафиолетовую ($\lambda = 0.01 \dots 0.38$ мкм), видимую ($\lambda = 0.38 \dots 0.76$ мкм) и инфракрасную ($\lambda = 0.76 \dots 1000$ мкм) области. Такое деление носит несколько условный характер, поскольку строгих границ между областями не существует.

Специфическими преимуществами волн оптического диапазона по сравнению с волнами радиодиапазона являются потенциальная возможность передачи больших объемов информации и возможность достижения высокой степени концентрации излучаемой энергии. Эти две особенности определяют повышенный интерес к оптическим системам связи. Однако использование этих систем в условиях земной атмосферы ограничивается влиянием тракта распространения. Длина волны оптического излучения соизмерима с размерами молекул и различных взвешенных частиц, содержащихся в атмосфере. Это вызывает ослабление поля за счет молекулярного поглощения, рассеяние на молекулах и взвешенных частицах. Взаимодействие оптического излучения с турбулентной атмосферой приводит к изменению траектории пучка волн и его расширению, ослаблению за счет рассеяния, ухудшению пространственной когерентности и поляризационным флуктуациям.

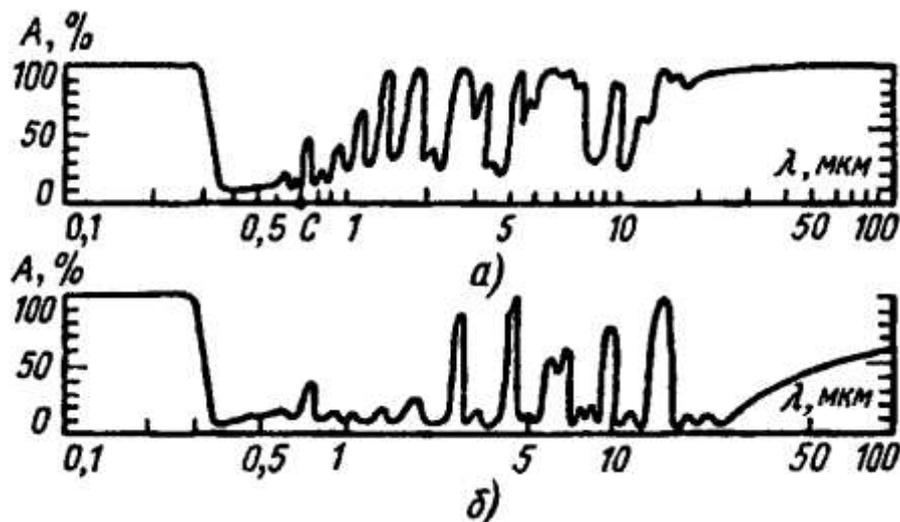
Волны оптического диапазона могут распространяться только как земные и прямые. В атмосфере с плавно меняющимися параметрами возникает рефракция волн оптического диапазона. Радиус кривизны траектории вследствие меньшего влияния на столь высоких частотах молекул водяного пара при нормальной атмосферной рефракции составляет $\rho \approx 50000$ км против значения $\rho \approx 25000$ км для диапазона УКВ.

5.4.2 Ослабление волн оптического диапазона в атмосфере

Молекулярное поглощение. В оптическом диапазоне, так же как и в диапазоне радиоволн, молекулярное поглощение обусловлено переходом молекул в более высокие энергетические состояния. Оптическое излучение поглощается одновременно почти всеми атмосферными газами, однако наибольшие потери происходят в молекулах паров воды, углекислого газа, кислорода и озона.

Для количественной оценки степени поглощения в оптическом диапазоне часто пользуются величиной A , которая называется поглощением (по мощности): $A = 1 - V^2$, где V – модуль множителя ослабления по напряженно-

сти поля. Поглощение A обычно выражается в процентах. Наглядное представление о распределении поглощения в диапазоне длин волн $0.01...100$ мкм можно получить из рисунка 5.9, на котором приведены две записи спектра поглощения солнечного излучения у поверхности Земли (рисунок 5.9, *а*) и на высоте 11 км (рисунок 5.9, *б*). Видно, что ультрафиолетовые лучи с длиной волны до 0.3 мкм и инфракрасные лучи с длиной волны $25...100$ мкм практически полностью поглощаются атмосферой (погонное ослабление составляет $100...1000$ дБ/км).



а) поверхность Земли; *б*) высота 11 км

Рисунок 5.9 - Распределение поглощения A от λ

В диапазоне волн $0.3...25$ мкм в атмосфере существуют так называемые *окна прозрачности*, соответствующие участкам длин волн: $0.4...0.85$; $0.95...1.05$; $1.2...1.3$; $1.6...1.75$; $2.1...2.4$; $3.4...4.2$; $8...12$ мкм. Коэффициент ослабления в окнах прозрачности снижается до $1...10$ дБ/км.

С увеличением высоты над поверхностью Земли концентрация паров воды и углекислого газа уменьшается. Поэтому ширина окон прозрачности увеличивается, и поглощение соответствующих им излучений уменьшается (см. рисунок 5.9, *б*). Отметим, что каждая из полос поглощения на рисунке 5.9 состоит из многих тысяч отдельных линий поглощения, между которыми располагаются многочисленные микроокна прозрачности.

Рассеяние на молекулах и взвешенных частицах. Отдельные молекулы атмосферных газов, частицы пыли и дыма, а также капли воды в облаках, туманах, дождях рассеивают волны оптического диапазона. Характер рассеянного поля, как всегда, зависит от соотношения размеров частиц и длины волны.

Размеры молекул и микроскопических капель воды в дымке малы по сравнению с длиной волны. Вносимые ими потери на рассеяние следуют закону Рэля, при котором с увеличением длины волны потери уменьшаются пропорционально $1/\lambda^4$. При длине волны больше 0.6 мкм коэффициент ослаб-

ления за счет рэлеевского рассеяния в атмосфере не превышает 1 дБ/км, и обычно этим видом ослабления можно пренебречь.

Частицы пыли, дыма, капли воды в облаках, тумане и дожде имеют размеры порядка длины световой волны и более, поэтому они оказывают значительное влияние на распространение волн оптического диапазона. При распространении в наиболее часто встречающихся облаках и туманах с размерами капель воды 4...6 мкм коэффициент ослабления сравнительно мало зависит от длины волны и при оптической видимости 200 м составляет примерно 90 дБ/км. Это означает, что при прохождении пути длиной всего 1 км интенсивность излучения уменьшается в 10^9 раз.

Осадки в виде дождей содержат частицы воды размерами до 100 мкм и более, при этом коэффициент ослабления практически не зависит от длины волны и определяется только интенсивностью осадков: $\gamma_D \approx -0.9J_D^{0.74}$, где γ_D – коэффициент ослабления, дБ/км; J_D – интенсивность осадков, мм/ч. По этой формуле построен график, представленный на рисунке 5.10, из которого видно, что коэффициент ослабления волн оптического диапазона в осадках велик и может достигать значений в несколько десятков децибел на километр.

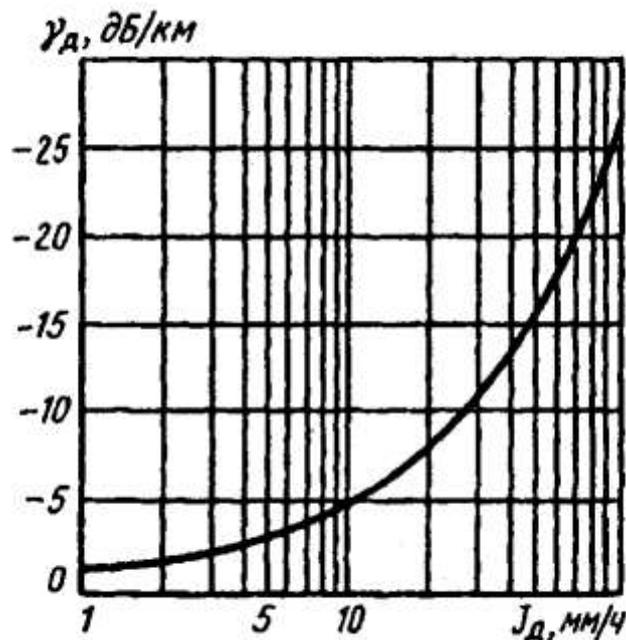


Рисунок 5.10 - Зависимость коэффициента ослабления от интенсивности осадков $\gamma_D \approx -0.9J_D^{0.74}$

Ослабление на турбулентных неоднородностях. Ослабление узких пучков волн оптического диапазона на турбулентных неоднородностях атмосферы существенно зависит от соотношения диаметра пучка и размеров этих неоднородностей. В общем случае причиной ослабления поля могут служить расширение пучка (линзоподобное действие), отклонение траектории распространения волны (эффект преломления) или рассеяние волны.

В реальных условиях поперечные размеры пучка волны меньше или примерно равны размеру турбулентностей, поэтому может происходить заметное расширение пучка волн, а также сильное отклонение траектории распространения от первоначального направления. Ослабление за счет рассеяния на турбулентностях обычно невелико – ниже 1 дБ/км. В целом потери передачи за счет турбулентностей изменяются во времени, а в тех случаях, когда в результате преломления узкий пучок волн проходит мимо приемной антенны, связь полностью нарушается.

Из сказанного выше следует, что передача информации через атмосферу с помощью волн оптического диапазона затруднена рядом факторов. Наиболее существенный из них – резкое увеличение ослабления при наличии на трассе осадков, когда погонное ослабление может достигать нескольких десятков децибел на километр. Поэтому атмосферные лазерные системы связи пока широко не применяются. Имеющиеся линии используются, как правило, для передачи цифровой информации с высокой скоростью на расстояния от нескольких сотен метров (связь между отдельными зданиями) до нескольких километров.

В условиях космического пространства узконаправленные пучки волн оптического диапазона распространяются практически без потерь, что делает более перспективным применение этого диапазона для линий типа «космос – космос».

5.4.3 Нелинейные эффекты в атмосфере при распространении лазерного излучения

При распространении в атмосфере сверхмощного излучения, достигаемого в современных лазерах, обнаруживаются нелинейные эффекты, возникающие в средах, свойства которых зависят от интенсивности воздействующего поля.

Эффект насыщения заключается в том, что при увеличении мощности излучения коэффициент молекулярного поглощения атмосферы уменьшается и наступает своеобразное «просветление» – увеличение ее прозрачности. Этот эффект может иметь место при достижении плотности потока мощности около 10^7 Вт/см², что вполне реально для современных лазеров.

Самофокусировка лазерного излучения в атмосфере. При распространении лазерного излучения в атмосфере могут происходить изменения коэффициента преломления воздуха в канале пучка. При этом разница в значениях коэффициента преломления в канале пучка и вне его может быть такой, при которой устраняется расходимость пучка. Это явление называют самофокусировкой лазерного излучения. Факт самофокусировки мощного лазерного излучения в атмосфере подтверждается экспериментально.

Воздействие лазерного излучения на облака и туманы. Облучение облаков и туманов мощным направленным излучением сопровождается рядом эффектов, приводящих к изменению условий распространения. Наибольший практический интерес представляет значительное уменьшение ослабления поля за счет полного или частичного испарения капель воды под действием мощного излучения. Просветление облаков и туманов сильнее всего проявляется на длинах волн, которым соответствуют максимальные значения коэффициентов поглощения воды. Наиболее перспективен для этих целей интервал длин волн 10...25 мкм.

Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
f , ГГц	4	3	6	5	7	2.5	1.4	1.6	1.8	2

6 ЗАДАЧИ. РАДИОВОЛНЫ В МАТЕРИАЛЬНЫХ СРЕДАХ

6.1 Основные формулы

Отношение плотностей тока смещения и тока проводимости в данной среде, выраженное в комплексной форме:

$$\frac{\dot{j}_{CM}}{\dot{j}_{ПП}} = \frac{j\omega\varepsilon_a \dot{E}}{\sigma \dot{E}} = j \frac{\omega\varepsilon_a}{\sigma}. \quad (6.1)$$

Комплексная диэлектрическая проницаемость среды:

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_a - j \frac{\sigma}{\omega}. \quad (6.2)$$

Углы падения φ , отражения φ_o и преломления φ_{Π} связаны следующими зависимостями:

$$\varphi = \varphi_o; \quad \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_{\Pi}} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (6.3)$$

где $n_1 = \frac{c}{v_1}$ – показатель преломления первой среды; $n_2 = \frac{c}{v_2}$ – показатель преломления второй среды.

Концентрация молекул в тропосфере N_M падает с увеличением высоты. Это приводит к снижению диэлектрической проницаемости воздуха ε , а значит, и его показателя преломления $n = \sqrt{\varepsilon}$. Показатель преломления воздуха в пределах тропосферы мало отличается от единицы при любых условиях. В инженерных расчетах применяют *индекс преломления* N :

$$N = (n - 1) \cdot 10^6. \quad (6.4)$$

В среднем значение N колеблется в пределах от 250 до 450, в зависимости от пункта наблюдения на поверхности Земли. При увеличении высоты h индекс преломления тропосферы падает практически по линейному закону со скоростью $\frac{dN}{dh} = -40 \text{ км}^{-1}$. Формула справедлива в интервале высот, не превышающих несколько километров.

Непостоянство показателя преломления с высотой вызывает искривление луча, это явление называется *атмосферной рефракцией*. Чертеж приведен на рисунке 6.1. Слой неоднородного воздуха представлен в виде двух соприкасающихся однородных слоев 1 и 2 с показателями преломления n_1 и n_2 причем $n_2 < n_1$. Углы падения φ и преломления φ_{Π} связаны между собой формулой (6.3):

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_{\Pi}} = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}. \quad (6.5)$$

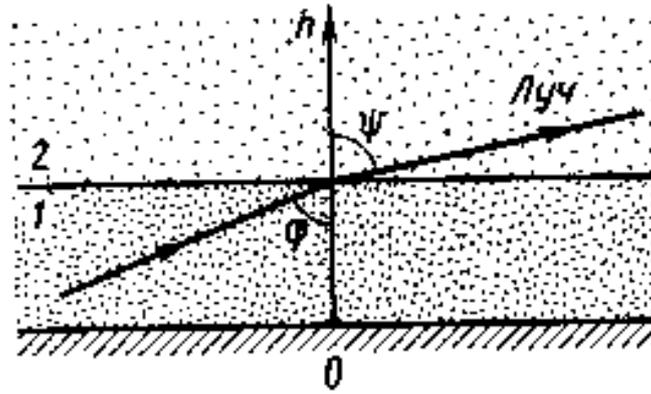


Рисунок 6.1 – Атмосферная рефракция

Легко видеть, что в рассматриваемом случае $\psi > \varphi$, т.е. луч в неоднородной по высоте тропосфере *искривляется в сторону земной поверхности*.

Относительная диэлектрическая проницаемость и показатель преломления слоя ионосферы, имеющего электронную концентрацию N_e при частоте f , записываются в виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon' &= 1 - 80.8 \frac{N_e}{f^2} = 1 - \frac{f_{nl}}{f}; \\ n &= \sqrt{1 - \left(\frac{f_{nl}}{f}\right)^2}, \end{aligned} \quad (6.6)$$

где $f_{nl} = 8.98\sqrt{N_e}$ – плазменная частота в Гц; N_e в эл/м³; f в Гц.

Полубесконечный плазменный слой полностью отражает все электромагнитные волны, частоты которых не превосходят критической частоты $f_{кр}$, численно совпадающей с плазменной частотой $f_{пл}$.

При падении плоской волны на полубесконечную плазму под произвольным углом φ , который отсчитывается от направления нормали к границе раздела плазма-воздух. В общем случае в плазме возникает преломленная волна, угол преломления ψ может быть найден из закона Снелля:

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_{пл}} = n = \sqrt{1 - \left(\frac{f_{nl}}{f}\right)^2}. \quad (6.7)$$

Если $f < f_{пл}$, то правая часть равенства (6.7) становится мнимой, это означает, что угол преломления $\varphi_{пл}$ оказывается комплексным. Вся мощность падающей волны при этом отражается от границы раздела назад в воздушную среду.

Если $f > f_{пл}$ (плазма прозрачна для электромагнитных волн), то преломленная волна в плазме принципиально может существовать. Однако следует учитывать, что показатель преломления плазмы n_2 является действительным числом, но всегда меньше единицы. Поэтому в данном случае ($\varphi_{пл} > \varphi$) возможно явление полного внутреннего отражения, когда $\varphi_{пл} = 90^\circ$, так как пре-

ломленная волна перестает быть обычной плоской волной [1]. Критическим углом падения $\varphi_{кр}$ плоской волны на однородный плазменный слой называют такой угол падения φ , при котором возникает полное внутреннее отражение от границы раздела (рисунок 6.2). В соответствие с формулой (6.7):

$$\varphi_{кр} = \arcsin \sqrt{1 - \left(\frac{f_{нл}}{f}\right)^2}. \quad (6.8)$$

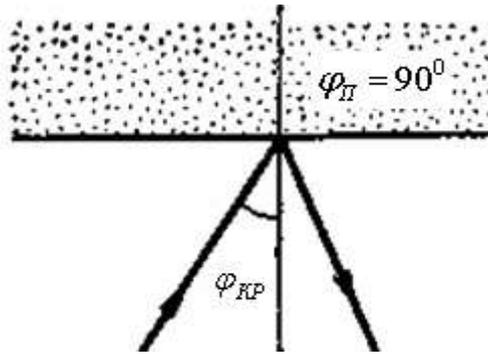


Рисунок 6.2 – Падение плоской волны на плазменное полупространство под критическим углом

Если $\varphi \geq \varphi_{кр}$, то падающая из воздуха плоская волна целиком отражается от полубесконечного плазменного слоя; если же $\varphi < \varphi_{кр}$, то падающая волна частично преломляется внутрь плазмы.

Минимально применимая волна:

$$\lambda_{\min} = \lambda_{кр} \cdot \sin \Delta, \quad (6.9)$$

где $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны отражающего слоя; Δ – угол наклона луча к земной поверхности.

Максимально применимая частота (МПЧ) в соответствии с (6.7) удовлетворяет уравнению:

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{f_{нл}}{f_{\max}}\right)^2},$$

откуда:

$$f_{\max} = \frac{f_{нл}}{\cos \varphi}.$$

При отсутствии потерь за счет среды распространения связь мощности, излучаемой на одном конце радиолинии ($P_{прд}$), и мощности, поступающую на вход приемника ($P_{пр}$) на другом конце радиолинии, выражается формулой идеальной радиосвязи:

$$P_{пр} = P_{прд} D_{прд} D_{пр} \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2, \quad (6.10)$$

где $D_{\text{прд}}$ – коэффициент направленного действия передающей антенны (КНД); $D_{\text{пр}}$ – коэффициент направленного действия приемной антенны, R – расстояние между передатчиком и приемником.

$$D_{\text{пр(прд)}} = \frac{4\pi S_{\text{пр(прд)}}}{\lambda^2}, \quad (6.11)$$

где $S_{\text{пр(прд)}}$ – эффективная площадь раскрыва приемной (передающей) антенны.

В радиоканале на входе приемника неизбежно присутствует шум, эффективная мощность которого:

$$P_{\text{ш}} = kT_{\text{ш}}\Delta f, \quad (6.12)$$

где k – постоянная Больцмана, $T_{\text{ш}}$ – шумовая температура приемника, приведенная к его входу, Δf – полоса пропускания приемника.

Расстояние прямой видимости при отсутствии атмосферной рефракции (геометрический горизонт):

$$R_{\text{ГОР}} = 3.57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \text{ км}, \quad (6.13)$$

где h_1, h_2 – высоты передающей и приемной антенн в м.

Расстояние прямой видимости при нормальной атмосферной рефракции (радиогоризонт):

$$R_{\text{РЕФ}} = 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \text{ км}. \quad (6.14)$$

6.2 Примеры решения типовых задач

6.2.1 Определить значение частоты, при котором в сухой почве с параметрами $\varepsilon = 5$, $\sigma = 10^{-3}$ См/м действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости становятся одинаковыми.

Решение.

В соответствие с формулой (6.2):

$$\text{Re } \tilde{\varepsilon}_a = \varepsilon\varepsilon_0 = \frac{5 \cdot 10^{-9}}{36\pi} = 4.42 \cdot 10^{-11} \text{ Ф/м.}$$

Отсюда искомая частота:

$$\omega = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{10^{-3}}{4.42 \cdot 10^{-11}} = 2.26 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$$

или

$$f = 3.6 \text{ МГц.}$$

Таким образом, на волнах длинноволнового и средневолнового диапазонов сухая почва может рассматриваться как металлоподобная среда с потерями.

6.2.2 Известно, что на уровне земной поверхности значение индекса преломления $N_0 = 300$. Найти относительную диэлектрическую проницаемость воздуха ε на земле и на высоте $h = 3$ км.

Решение.

Формула для определения ε в соответствии с (6.4):

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{N}{10^6}\right)^2.$$

Индекс преломления на высоте 3 км:

$$N = N_0 - \left(\frac{dN}{dh}\right)h = 300 - 40 \cdot 3 = 180.$$

Подставляя в формулу для определения ε , находим, что:

$$\varepsilon(h = 0) = 1.0006 \quad \text{и} \quad \varepsilon(h = 3 \text{ км}) = 1.00036.$$

6.2.3 Оценить эффект атмосферной рефракции для конкретных условий, описанных в задаче 6.2.2. Реальный неоднородный слой заменить двумя однородными слоями с диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_1 = 1.0006$ и $\varepsilon_2 = 1.00036$. Положить угол падения $\varphi = 70^\circ$.

Решение.

Используя полученные в задаче 6.2.2 значения индексов преломления $N_0 = 300$ и $N = 180$, находим показатели преломления обоих слоев по формуле:

$$n = 10^{-6}N + 1,$$

откуда $n_1 = 1.0003$ и $n_2 = 1.00018$.

Подставив эти результаты в формулу (6.5), находим угол преломления:

$$\psi = \arcsin\left(\frac{\sin 70^\circ}{0.99958}\right) = 70^\circ 4'.$$

Если путь, проходимый волной в тропосфере достаточно протяжен (10 км), то угловая ошибка в $4'$ приведет к погрешности в определении координаты цели около 11 м.

6.2.4 Плоская волна падает на слой E ионосферы с электронной плотностью $N_e = 10^{11} \text{ м}^{-3}$ под углом $\varphi = 60^\circ$. Определить наибольшее значение частоты f_{\max} , при котором еще наблюдается полное внутреннее отражение от слоя.

Решение.

Для данного ионосферного слоя плазменная частота:

$$f_{nl} = 8.98\sqrt{10^{11}} = 2.84 \cdot 10^6 \text{ Гц} = 2.84 \text{ МГц}.$$

Заданный угол падения станет критическим на частоте f_{\max} , которая удовлетворяет уравнению:

$$\sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{1 - \left(\frac{2.84 \cdot 10^6}{f_{\max}}\right)^2}.$$

Решив это уравнение, получаем $f_{\max} = 5.68$ МГц.

Вывод: при наклонном падении плазменный слой способен отражать колебания более высоких частот, чем при вертикальном зондировании.

6.2.5 Ионосферный слой F с концентрацией электронов $N_e = 10^{12} \text{ м}^{-3}$ располагается на высоте $h = 400$ км от поверхности Земли. Найти наивысшее значение частоты поля f_{\max} , которое еще обеспечивает полное отражение электромагнитной волны от этого слоя.

Решение.

В соответствии с рисунком 6.3, можно заметить, что угол падения волны на слой φ будет наибольшим в том случае, когда луч падающей волны AC направлен по касательной к земной поверхности, проведенной в точке A , где размещен передатчик. Так как $OA = OB = a_{\text{ЗМ}} = 6370$ км (радиус Земли), то $BC = h = 400$ км (высота слоя F), а треугольник OAC прямоугольный, то:

$$\sin \varphi = \frac{OA}{OC} = \frac{6370}{6770} = 0.941, \quad \varphi = 70^\circ.$$

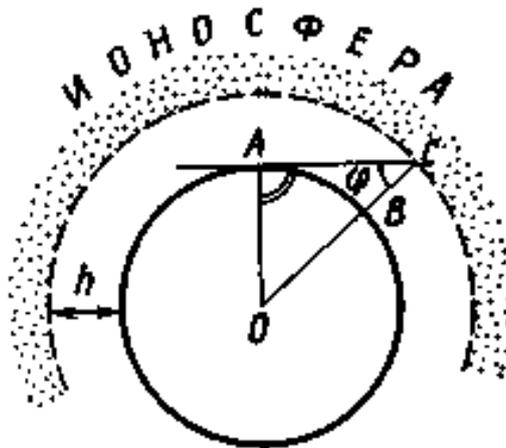


Рисунок 6.3 – Иллюстрация к задаче 6.2.5

Плазменная частота слоя $f_{\text{пл}} = 8.98$ МГц. Поэтому искомая частота есть корень уравнения:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{8.98}{f_{\max}}\right)^2} = \sin \varphi = 0.941,$$

из которого находим, что $f_{\max} = 27$ МГц. Все волны с более высокими частотами ни при каких условиях не могут отражаться от ионосферы.

6.2.6 Космическая линия связи имеет протяженность 400 км. Мощность передатчика 80 Вт, длина волны 3 см. Антенны передатчика и приемника идентичны и представляют собой параболические зеркала диаметром 1 м. Определить мощность, поступающую на вход приемника.

Решение.

Геометрическая площадь каждой антенны $S = 0.785 \text{ м}^2$, эффективная площадь $S_{\text{эф}} = 0.54S = 0.424 \text{ м}^2$. В соответствии с (6.11) значение КНД каждой антенны:

$$D = \frac{12.56 \cdot 0.424}{0.03^2} = 5900.$$

Подставив полученные цифры в (6.10), получим мощность на входе приемника радиолинии $P_{\text{пр}} = 10^{-9} \text{ Вт}$.

6.2.7 Космическая радиолиния снабжена антеннами и передатчиком, описанными в условиях задачи 6.2.6, используется приемник с шумовой температурой 150 К. Линия предназначена для передачи телевизионного изображения среднего качества и имеет полосу пропускания шириной 4 МГц. Вычислить длину трассы R , при которой мощность принятого сигнала в 10 раз превышает мощность шума, т.е. отношение сигнал/шум $C_{\text{с/ш}} = \frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}} = 10$.

Решение.

В рассматриваемой системе мощность шума, приведенная ко входу приемника:

$$P_{\text{ш}} = 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 150 \cdot 4 \cdot 10^6 = 8.28 \cdot 10^{-15} \text{ Вт}.$$

Чтобы реализовать заданное отношение сигнал/шум, мощность принятого сигнала приемником $P_{\text{пр}}$ должна составить $8.28 \cdot 10^{-14} \text{ Вт}$.

Уравнение идеальной радиосвязи (6.10) можно разрешить относительно искомой длины трассы R и получить:

$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \left(\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{прд}} D_{\text{пр}} D_{\text{прд}}} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Подставив в формулу соответствующие значения параметров, находим, что $R = 4.38 \cdot 10^5 \text{ км}$. Рассматриваемая радиолиния способна обеспечить передачу телевизионных сигналов в пределах орбиты Луны.

6.3 Задачи для самостоятельного решения

6.3.1 Определить отношение плотности тока смещения к плотности тока проводимости в морской воде ($\epsilon_a = 80\epsilon_0$, $\mu_a = \mu_0$, $\sigma = 8 \text{ См/м}$) для волн с частотами $f = 10^4$; 10^6 ; 10^8 Гц .

6.3.2 Сравните отношения плотностей токов смещения и проводимости в морской воде ($\epsilon_a = 80\epsilon_0$, $\mu_a = \mu_0$, $\sigma = 8 \text{ См/м}$) и сухой почве ($\epsilon_a = 4\epsilon_0$, $\mu_a = \mu_0$, $\sigma = 0.001 \text{ См/м}$) при частоте $f = 10^8 \text{ Гц}$.

6.3.3 Электромагнитные волны с амплитудой напряженности электрического поля $E_{\text{м.пад}} = 1 \text{ мВ/м}$, распространяясь в диэлектрике ($\epsilon = 2.5$, $\mu = \mu_0$, σ

= 0), падают на плоскую поверхность идеального проводника. Определить максимальные амплитуды напряженностей полей.

6.3.4 Выразить комплексную относительную диэлектрическую проницаемость $\tilde{\epsilon}$ через длину волны λ , измеряемую в метрах.

6.3.5 Для частоты $f = 600$ МГц определить комплексную относительную диэлектрическую проницаемость среды $\tilde{\epsilon}$, имеющую относительную проницаемость $\epsilon = 50$ и удельную проводимость $\sigma = 4 \cdot 10^{-3}$ См/м. Каково соотношение между токами смещения и проводимости в данной среде?

6.3.6 Покажите, что сухая почва на частоте 300 МГц может рассматриваться как диэлектрическая среда с потерями.

6.3.7 Определить критическую длину волны слоя ионосферы с электронной концентрацией $N_e = 2.5 \cdot 10^9$ м⁻³.

6.3.8 Слой ионосферы имеет концентрацию электронов $N_e = 1.5 \cdot 10^{12}$ м⁻³. Каковы показатели преломления ионосферы n для частот $f = 2$ МГц и 7 МГц?

6.3.9 Какой электронной концентрации ионизированного слоя соответствует критическая длина волны 30 м?

6.3.10 На слой ионосферы F_2 с критической длиной волны $\lambda_{кр} = 30$ м падают электромагнитные волны под различными углами. Определите минимально применимую длину волны λ_{min} при отвесном падении ($\Delta = 90^\circ$) и при углах наклона лучей $\Delta = 60^\circ, 30^\circ, 10^\circ$.

6.3.11 Рассмотрите задачу об атмосферной рефракции в плоскостростой среде, образованной соприкасающимися слоями без потерь толщиной d каждый. Слои имеют убывающие по высоте показатели преломления $n_1 > n_2 > n_3 > \dots$. Известным считается угол падения на первый слой из вакуума.

6.3.12 На полубесконечную плазменную среду падает плоская электромагнитная волна с частотой, в 1.5 раза превышающей плазменную частоту. Найдите значение критического угла падения на такую среду.

6.3.13 Передающий конец космической радиoliniи снабжен передатчиком мощностью 10 Вт и зеркальной параболической антенной с площадью 100 м². Аналогичная по конструкции приемная антенна имеет площадь 30 м². Рабочая длина волны 7.5 см. Приемник с полосой пропускания 1 МГц имеет шумовую температуру 120 К. Определите предельную длину радиoliniи, при которой отношение сигнал/шум на входе приемника будет не ниже 10 дБ.

6.3.14 На сколько сократится длина линии, рассмотренной в задаче 6.3.13, если полосу пропускания приемника расширить до 10 МГц?

6.3.15 Спроектируйте линию КВ-связи длиной 1200 км, работающую за счет отражения радиоволн от слоя F ионосферы. Концентрация электронов в слое $1.5 \cdot 10^{12}$ м⁻³, высота слоя 260 км.

6.3.16 Найдите предельную длину трассы с прямой видимостью между антенной Останкинского телецентра ($h = 500$ м) и антенной коллективного приема телевидения, расположенной на крыше жилого дома ($h = 40$ м).

6.3.17 Передающая и приемная антенны имеют высоты $h_1 = h_2 = 10$ м. Определить расстояние R прямой видимости при отсутствии атмосферной рефракции и при наличии нормальной атмосферной рефракции.

6.3.18 Определить расстояние прямой видимости при отсутствии атмосферной рефракции и наличии нормальной атмосферной рефракции, если высота передающей антенны $h_1 = 100$ м, а приемной – $h_2 = 10$ м.

6.3.19 Высота расположения передающей телевизионной антенны равна h_1 [м], расстояние между телецентром и пунктом приема равно R [км]. Определите необходимую высоту расположения приемной антенны для обеспечения приема телевизионного сигнала в случаях отсутствия и присутствия атмосферной рефракции.

Значения h_1 и R приведены в таблице 6.1 и зависят от номера варианта, представляющего двухзначное число.

Таблица 6.1 – Исходные данные к задаче 6.3.19

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
h_1 , м	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
R , км	40	43	46	49	52	55	58	62	66	70

6.3.20 Определить электронную концентрацию ионосферного слоя N_e [м^{-3}], при которой наблюдается отражение волны при зондировании на частоте f [МГц] при угле падения φ [°].

Значения f и φ приведены в таблице 6.2 и зависят от номера варианта, представляющего двухзначное число.

6.3.21 Какова максимально применимая частота (МПЧ) при зондировании слоя ионосферы с электронной концентрацией N_e [м^{-3}] при угле падения луча φ [°].

Значения N_e [м^{-3}] и φ приведены в таблице 6.3 и зависят от номера варианта, представляющего двухзначное число.

6.3.22 Передающий конец космической радиолинии снабжен параболической антенной площадью 400 м^2 . Приемная параболическая антенна имеет площадь 36 м^2 . Рабочая длина волны равна 10 см. Мощность передатчика составляет 10 Вт. Определите предельную длину радиолинии, при которой отношение сигнал/шум на входе приемника будет не ниже 10 дБ, если приемник имеет полосу пропускания Δf , шумовую температуру T .

Значения Δf [МГц] и T [К] приведены в таблице 6.4 и зависят от номера варианта, представляющего двухзначное число.

Таблица 6.2 – Исходные данные к задаче 6.3.20

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
f , МГц	0.1	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	8.5
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
φ , °	0	9	18	27	38	45	54	63	72	80

Таблица 6.3 – Исходные данные к задаче 6.3.21

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
N_e , м ⁻³	10^8	$5 \cdot 10^8$	10^9	$5 \cdot 10^9$	10^{10}	$5 \cdot 10^{10}$	10^{11}	$5 \cdot 10^{11}$	10^{12}	$2 \cdot 10^{12}$
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
φ , °	80	72	63	54	45	36	27	18	9	0

Таблица 6.4 – Исходные данные к задаче 6.3.22

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Δf , МГц	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
T , К	200	180	160	140	135	130	125	120	115	110

7 ЗАДАЧИ. ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНОВ

7.1 Основные формулы

В свободном пространстве ($\varepsilon = 1$, $\mu = 1$, $\sigma = 0$) амплитуда напряженности электрического поля в точке наблюдения (точке приема):

$$E_{0\max} = \frac{\sqrt{60G_1P_1'}}{r}, \quad (7.1)$$

где G_1 – коэффициент усиления передающей антенны относительно изотропного излучателя; P_1' – мощность, подводимая к передающей антенне; R – расстояние от точки передачи до точки приема.

При расчете радиолиний в диапазоне сверхдлинных (СДВ), длинных (ДВ), средних (СВ) и коротких волн пользуются не амплитудным, а действующим значением напряженности поля, которое в условиях свободного пространства (7.1):

$$E_{0Д} = \frac{E_{0\max}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{30G_1P_1'}}{R}. \quad (7.2)$$

Если к вертикальному электрическому вибратору, расположенному на идеально проводящей плоскости ($\sigma = \infty$), подвести такую же мощность, как и в случае его расположения в свободном пространстве, то за счет распределения излученной мощности только в верхнем полупространстве плотность потока мощности возрастет в 2 раза, а напряженность поля в $\sqrt{2}$ раз по сравнению со свободным пространством, т.е. $E_{\inftyД} = \sqrt{2}E_{0Д}$ или с учетом (7.2):

$$E_{\inftyД} = \frac{\sqrt{60G_1P_1'}}{R} \quad (7.3)$$

Сверхдлинные и длинные волны до расстояний 300...400 км распространяются преимущественно как поверхностные. При таких расстояниях действующее значение напряженности поля, создаваемое вертикальным электрическим вибратором, установленным на Земле, можно вычислять с помощью формулы:

$$E_{\text{зм.д}} = E_{\inftyД} \cdot V_{\text{зм}}(\rho), \quad (7.4)$$

где $E_{\inftyД}$ – действующее значение напряженности поля над идеально проводящей плоскостью; $V_{\text{зм}}(\rho)$ – модуль множителя ослабления, показывающий во сколько раз напряженность поля над реальной Землей меньше напряженности поля над идеально проводящей плоскостью, при прочих равных условиях. Если E выразить в мВ/м, P_1' в кВт, R в км, то формула (7.4) приобретает следующий вид:

$$E_{3M.д} = \frac{245\sqrt{P'_1 \cdot G_1}}{R} V_{3M}(\rho) \text{ [мВ/м]}. \quad (7.5)$$

Формула для множителя ослабления $V_{3M}(\rho)$ без вывода дается в [10]:

$$V_{3M}(\rho) = \left| 1 - j \cdot \sqrt{\pi\rho} e^{-\rho} - 2e^{-\rho} \sqrt{\rho} \int_0^{\sqrt{\rho}} e^{x^2} dx \right|, \quad (7.6)$$

где ρ – параметр, называемый численным расстоянием (безразмерная величина):

$$2\rho \approx \frac{\pi R}{\lambda \sqrt{\varepsilon_{3M}^2 + (60\lambda\sigma_{3M})^2}}. \quad (7.7)$$

Формула (7.4), в которой $V_{3M}(\rho)$ определяется формулой (7.6) с учетом формулы (7.7) называется формулой Шулейкина – Ван-дер-Поля. Кривые зависимости множителя ослабления V_{3M} от численного расстояния ρ приведены на рисунке 7.1.

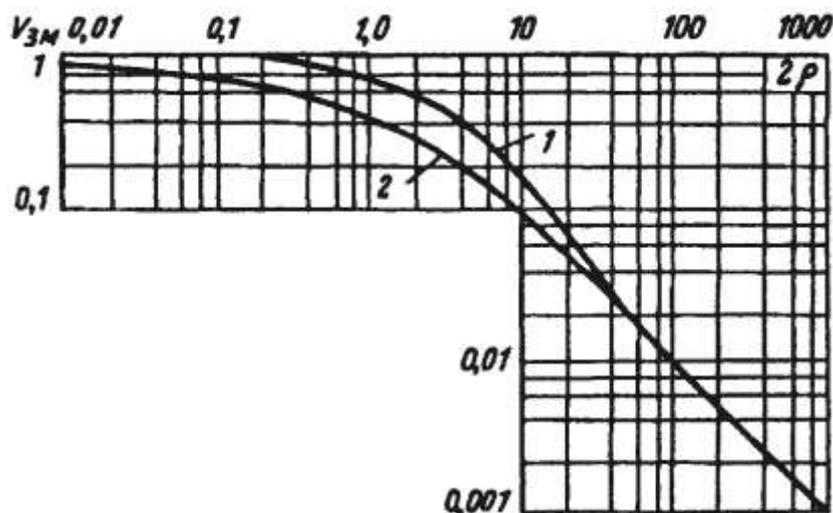


Рисунок 7.1 – Зависимость множителя ослабления V_{3M} от численного расстояния ρ

Кривая 1 относится к случаю $60\lambda\sigma_{3M} \gg \varepsilon_{3M}$, что характерно для длинных (сверхдлинных волн) и хорошо проводящих почв. Кривая 2 соответствует $60\lambda\sigma_{3M} \ll \varepsilon_{3M}$, что справедливо для коротких волн и плохо проводящих волн.

Сравнение расчетов по формуле Шулейкина – Ван-дер-Поля, справедливых для плоской Земли, и точной дифракционной формулы Фока показывает, что приближение плоской Земли справедливо для расстояний:

$$R < 7 \cdot 10^3 \cdot \lambda^{1/3}. \quad (7.8)$$

При этом ошибка вычисления напряженности поля, связанная с неучетом сферичности Земли, не превышает 10%.

На расстояниях свыше 400 км в диапазонах СДВ и ДВ необходимо учитывать влияние отраженной от ионосферы волны. Расчет напряженности поля

в этом случае сводится к решению распространения радиоволн в сферическом волноводе, образованном поверхностью земли и нижней границей ионосферы. Так как формулы, полученные в результате строго решения, сложны, то инженерный расчет напряженности поля в диапазоне СДВ и ДВ производят по эмпирическим формулам. Обычно ведут расчеты по формуле Остина:

$$E_D \left[\frac{мВ}{м} \right] = \frac{300\sqrt{P}}{R} \cdot V_{СФ.ЗМ} = \frac{120\pi \cdot h_D \cdot I_D}{\lambda \cdot R} \cdot V_{СФ.ЗМ}, \quad (7.9)$$

где P – излучаемая мощность, [кВт]; R – расстояние между передатчиком и пунктом приема, [км]; h_D – действующая высота антенны, [м]; I_D – действующее значение тока у основания антенны, [А]; λ – длина волны, [м]; $V_{СФ.ЗМ}$ – функция ослабления для сферической Земли, которая определяется выражением:

$$V_{СФ.ЗМ} = \sqrt{\frac{\theta}{\sin \theta}} \cdot e^{-\frac{0.0014R}{\lambda^{0.6}}}. \quad (7.10)$$

В (7.10) λ и R выражены в км, а центральный угол $\theta [рад] = \frac{R}{a_{ЗМ}}$, $a_{ЗМ}$ –

радиус Земли.

Для расчета напряженности поля средних волн днем (напряженность поля поверхностной волны) широко применяются графики Международного Консультативного Комитета по Радио (МККР), которые представляют результат расчета напряженности поля по дифракционным формулам для разных проводимостей подстилающей поверхности. На рисунке 7.2 приведены такие графики для почвы с параметрами: $\varepsilon_{ЗМ} = 4$, $\sigma_{ЗМ} = 10^{-3}$ См/м.

Значения напряженности поля, приведенные на графиках, соответствуют излученной мощности 1 кВт и короткой вертикальной передающей антенне (элементарному вибратору), стоящей на поверхности идеальной Земли. Реально напряженность поля, определенную из графика, следует умножить на $\sqrt{G_1 P'_1}$, где P'_1 – мощность, подводимая к передающей антенне, [кВт]; G_1 – коэффициент усиления передающей антенны в направлении вдоль Земли, вычисленный по отношению к элементарному электрическому вибратору, расположенному на идеальной Земле.

В ночное время кроме земной волны необходимо учитывать наличие волны, отраженной от ионосферы. Напряженность поля ионосферной волны $E_{и}$ [мкВ/м] рекомендуют определять, используя результаты статистической обработки измерений, проведенных на Европейском континенте [10]:

$$E_{и} = \frac{10233}{\sqrt{R}} \cdot \sqrt{G_1 P'_1} \cdot \exp\left(-8.94 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^{-0.26} \cdot R\right), \quad (7.11)$$

где P'_1 выражена в киловаттах, а все длины – в километрах.

В [10] приводятся многочисленные графики, позволяющие внести поправку на время суток, уровень солнечной активности, ДН антенны и др.

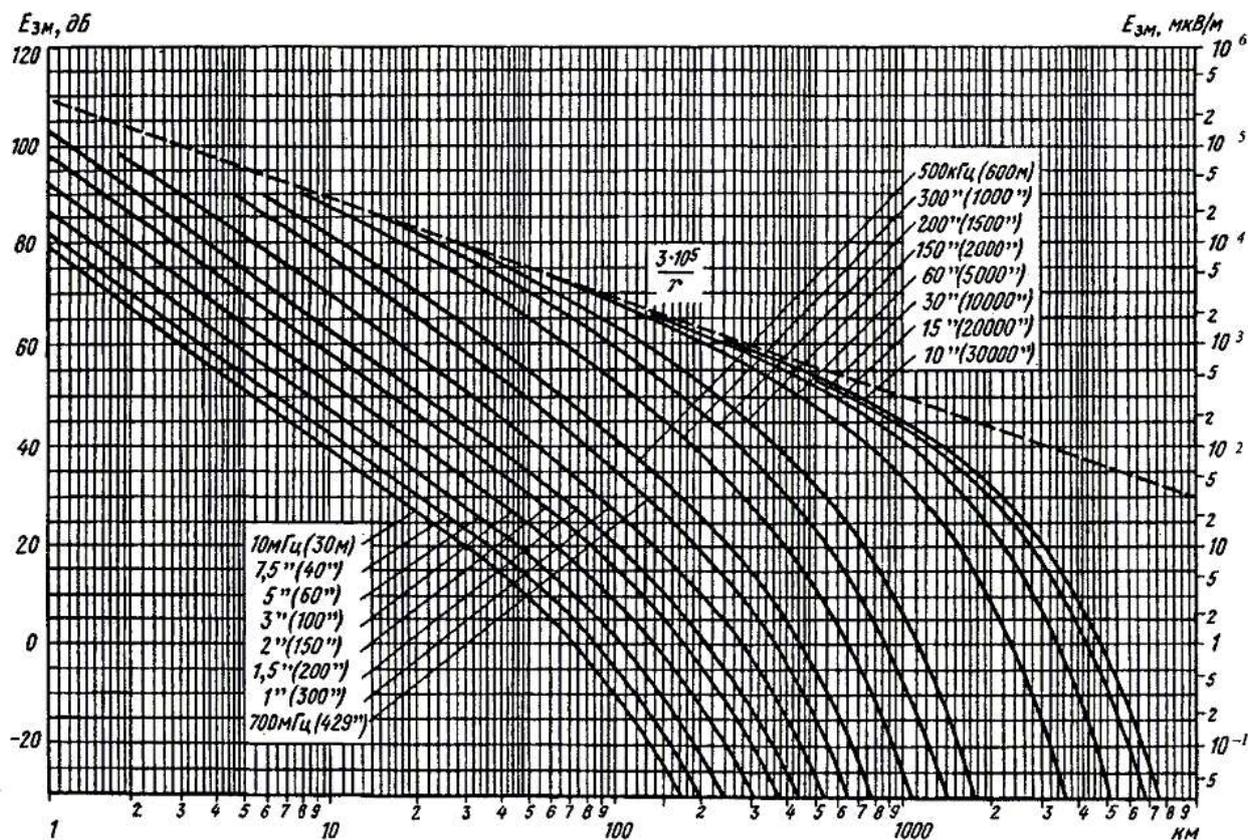


Рисунок 7.2 – Зависимость напряженности поля для почвы

Ослабление поля на коротковолновых (КВ) радиоприемах вызвано расхождением волны, поглощением в ионосфере, отражением от поверхности Земли и другими причинами.

Одним из основных методов расчета напряженности поля является метод, предложенный А.Н. Казанцевым [10]. Наибольшую точность этот метод обеспечивает при расчете

е трасс, проходящих в средних широтах.

В соответствии с указанным методом действующее значение напряженности поля в точке приема:

$$E_D = \frac{\sqrt{30P_1G_1(\Delta)}}{R} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1+R_{OTP}}{2} \cdot R_{OTP}^{n-1} \cdot \exp(-\Gamma_{II}). \quad (7.12)$$

Поясним структуру этой формулы.

Первый множитель соответствует полю в свободном пространстве. Здесь P_1' – мощность, подводимая к передающей антенне; $G_1(\Delta)$ – коэффициент усиления передающей антенны относительно изотропного излучателя с учетом влияния Земли, т.е. $G_1(\Delta) = G_{1\max} F^2(\Delta)$, где $F(\Delta)$ – нормированная ДН передающей антенны в вертикальной плоскости с учетом влияния Земли; Δ – угол возвышения траектории волны; R – путь, проходимый волной от точки передачи до точки приема.

Второй множитель $\left(\frac{1}{2}\right)$ соответствует уменьшению поля (или мощности) на 6 дБ. Из них 3 дБ А.Н. Казанцев относит за счет того, что приемная антенна имеет линейную поляризацию, а волна в процессе отражения от ионосферы приобретает эллиптическую (а иногда и круговую) поляризацию. Другие 3 дБ обусловлены тем, что волна в ионосфере расщепляется на обыкновенную и необыкновенную; необыкновенная составляющая сильно поглощается, а для приема оказывается полезной только половина излученной мощности.

Третий множитель $\frac{1+R_{\text{отр}}}{2}$ ($R_{\text{отр}}$ – коэффициент отражения) учитывает влияние отраженной от Земли волны в месте расположения приемной антенны. Если бы приемная антенна B (рисунок 7.3) находилась на оптимальной высоте h_2 над земной поверхностью, то волны 1 и 2 имели бы одинаковую фазу в точке приема и результирующее поле (при горизонтальной поляризации) имело бы значение $(1 + R_{\text{отр}})E_0$, где E_0 – поле прямой волны 1. В реальных условиях вследствие колебаний высоты отражающего слоя обеспечить оптимальное сложение волн 1 и 2 не удастся, и А.Н. Казанцев берет среднее значение коэффициента, учитывающего влияние отраженной от Земли волны, а именно $\frac{1+R_{\text{отр}}}{2}$. Обычно выбирают среднее значение $R_{\text{отр}}$ порядка 0.8.

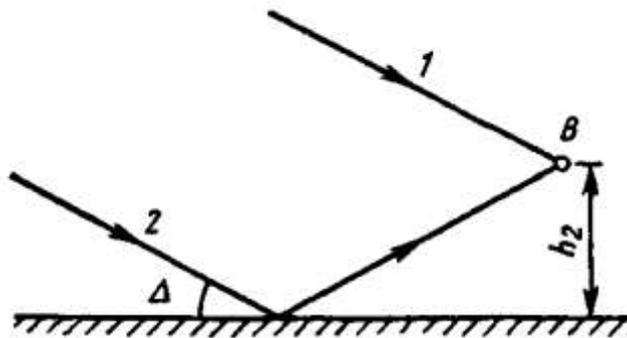


Рисунок 7.3 – Влияние отраженной от Земли волны в месте расположения приемной антенны

Четвертый множитель $R_{\text{отр}}^{n-1}$ учитывает дополнительные потери при отражении от Земли в промежуточных точках в случае многоскачкового рас-

пространения. Здесь n – число отражений от ионосферы. На односкачковых линиях (с одним отражением от ионосферы) $n = 1$ и $R_{OTP}^{n-1} = 1$.

Наконец, пятый множитель $\exp(-\Gamma_{и})$ учитывает поглощение в ионосфере.

Полный интегральный коэффициент поглощения $\Gamma_{и}$ определяется как сумма поглощения в тех слоях ионосферы, которые волна проходит (неотклоняющее поглощение), и поглощения в отражающем слое ионосферы (отклоняющее поглощение). В литературе имеется обширная информация для определения $\Gamma_{и}$ в зависимости от различных параметров радиотрассы.

При проектировании радиолинии необходимо учитывать не только диапазонные особенности распространения радиоволн, но шумовые характеристики радиотрасс и технические характеристики антенн, радиоприемных и радиопередающих устройств. В качестве примеров рассмотрим расчет космической радиолинии и наземной радиолинии декаметрового диапазона [11].

Первым шагом при проектировании космической системы радиосвязи является расчет радиолинии: спутниковый ретранслятор – наземная станция или абонентский терминал.

Исходными данными для такого расчета являются:

- протяженность линии радиотрассы – прямого луча – между антеннами спутника и наземной станцией, т.е. значения R ;

- выбор диапазона частот или длины волны λ ;

- выбор типа антенн и определение их параметров (эффективной площади антенны S_A , коэффициента усиления антенны $G = \frac{4\pi S_A}{\lambda^2}$);

- определение затухания в атмосфере Земли $B_{ТР}$ с помощью таблиц или графиков в зависимости от длины волны λ ;

- определение затухания в антенно-фидерных трактах спутниковой и наземной радиостанций $B_{Фид}$;

- определение требуемой полосы пропускания радиоприемника по промежуточной полосе $\Delta f_{ПР}$, исходя из заданной скорости передачи сообщения, выбранного метода модуляции и нестабильности частоты сигналов несущей и гетеродина;

- определение требуемого соотношения сигнал-шум на входе блока обработки сигнала радиоприемника $C_{С/Ш}$;

- расчет реальной чувствительности радиоприемника.

Реальная чувствительность радиоприемника, определяемая мощностью радиосигнала на его входе для получения требуемого соотношения сигнал-шум $C_{С/Ш}$ на выходе линейной части приемника с учетом шумов канала радиосвязи и собственных шумов устройства, определяется в виде [11]:

$$P_{ПРМ} = kT_0 \Delta f C_{С/Ш} \frac{T_{ШЛ} + T_{Ш.ПРМ}}{T_0} \text{ [Вт]}, \quad (7.13)$$

где $kT_0 = 4 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц – спектральная плотность шума при стандартной температуре $T_0 = 290$ К;

$T_{\text{шл}}$ – эквивалентная температура шума линии связи;

$T_{\text{ш.прм}}$ – эквивалентная температура шума приемника, пересчитанная к его входу;

$\Delta f_{\text{пр}}$ – полоса пропускания тракта промежуточной частоты до блока обработки сигнала [Гц].

Та же чувствительность приемника, выраженная в децибелах относительно мощности в 1 Вт:

$$P_{\text{прм.дб}} = 10 \lg P_{\text{прм}} = -174 + 10 \lg \Delta f [\text{кГц}] + 10 \lg C_{\text{с/ш}} + 10 \lg \left(\frac{T_{\text{шл}} + T_{\text{ш.прм}}}{T_0} \right) [\text{дБ Вт}]. \quad (7.14)$$

В формулах (7.13) и (7.14) значение температуры шумов канала радиосвязи $T_{\text{шл}}(f)$, обусловленной радиоизлучением Галактики и атмосферным поглощением, можно определить с помощью графиков, приведенных на рисунке 7.4.

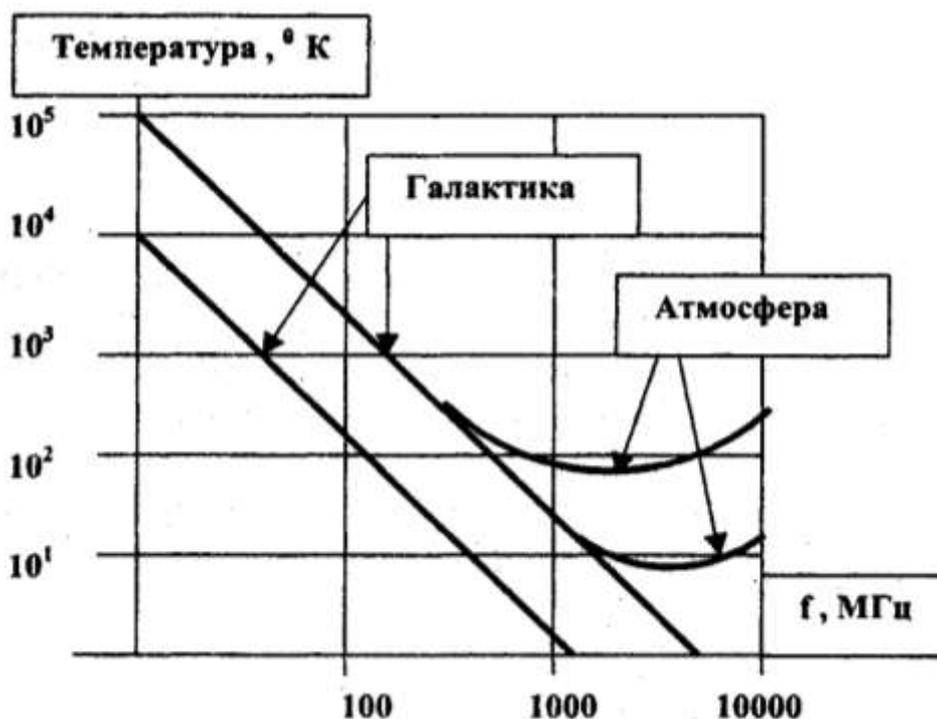


Рисунок 7.4 – Значение температуры шумов канала радиосвязи

Конечная цель расчета радиолинии состоит в определении мощности радиопередатчика, обеспечивающей устойчивую радиосвязь при передаче требуемого объема информации с заданной скоростью.

Предположим, что точечный источник равномерно излучает сигнал мощностью $P_{\text{изл}}$ по всей сфере. Тогда на расстоянии R на площадке размером S_A мощность сигнал составит:

$$P_C = \frac{P_{ИЗЛ} S_A}{4\pi R^2}. \quad (7.15)$$

Заменив P_C на реальную чувствительность радиоприемника $P_{ПРМ}$, а $P_{ИЗЛ}$ на произведение $P_{ПЕР} G_{АНТ}$, получим из (7.15) с учетом коэффициентов потерь в тропосфере и фидере ($B_{ТР}$ и $B_{ФИД}$) следующую формулу по определению требуемой мощности радиопередатчика:

$$P_{ПЕР} = \frac{4\pi R^2 P_{ПРМ} B_{ТР} B_{ФИД}}{G_{ПЕР} S_{ПРМ}}, \quad (7.16)$$

где $S_{ПРМ}$ – площадь приемной антенны.

При неизменной площади передающей ($S_{ПЕР}$) и приемной ($S_{ПРМ}$) антенн (с учетом $G_A = \frac{4\pi S_A}{\lambda^2}$) преобразуем (7.16) к виду:

$$P_{ПЕР} = \frac{R^2 \lambda^2 P_{ПРМ} B_{ТР} B_{ФИД}}{S_{ПЕР} S_{ПРМ}}. \quad (7.17)$$

При неизменном значении коэффициентов усиления антенн формула (7.17) примет вид:

$$P_{ПЕР} = \frac{(4\pi)^2 R^2 P_{ПРМ} B_{ТР} B_{ФИД}}{\lambda^2 G_{ПЕР} G_{ПРМ}}. \quad (7.18)$$

Для проведения расчетов значения параметров, входящих в формулы (7.16) – (7.18), целесообразнее выразить в децибелах. Тогда, например, формула (7.16) примет вид:

$$\begin{aligned} P_{ПЕР, дБ} &= 10 \lg P_{ПЕР} = \\ &= 71 + 20 \lg R[\text{км}] + 10 \lg P_{ПРМ} + 10 \lg(B_{ТР} B_{ФИД}) - 10 \lg G_{ПЕР} - 10 \lg S_{ПРМ}. \end{aligned} \quad (7.19)$$

Перепишем формулу чувствительности радиоприемника в децибелах относительно 1 Вт (7.14) в следующем виде:

$$P_{ПРМ, дБ} = 10 \lg P_{ПРМ} = -174 + 10 \lg \Delta f[\text{кГц}] + 10 \lg C_{СШ} + 10 \lg K_T \text{ [дБ Вт]}, \quad (7.20)$$

где $K_T = \frac{T_{ШЛ} + T_{Ш.ПРМ}}{T_0}$ – реальный коэффициент шума (с учетом шума линии радиосвязи).

При работе в декаметровом (КВ) диапазоне волн и использовании в качестве антенн четвертьволновых вибраторов расчет проводится по методике, разработанной академиком Б.А. Введенским [11]. В основе такой методики лежат две формулы, позволяющие рассчитать линию УКВ радиосвязи не только в пределах прямой видимости, но и за линией радиогоризонта. Расстояние до линии радиогоризонта для идеальной модели Земли, т.е. шара радиусом 6370 км:

$$R_{ГОР} = 3.57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \text{ [км]}, \quad (7.21)$$

где h_1 ; h_2 – высота поднятия антенн в пунктах приема и передачи сигнала [м].

Напряженность электрического поля в точке приема при четвертьволновом вертикальном вибраторе в месте излучения сигнала:

$$E = \frac{90 \cdot h_1 h_2 \sqrt{P_1}}{\lambda R^2 K_p K_3} \text{ [мкВ/м]}, \quad (7.22)$$

где P_1 – излучаемая мощность [Вт]; λ – длина волны [м]; R – протяженность радиолинии [км]; $K_p > 1$ – коэффициент дополнительных потерь, учитывающий затухание сигнала вдоль трассы распространения волны за счет атмосферы и разного рода препятствий – зданий и иных сооружений; K_3 – коэффициент загоризонтной радиосвязи.

Значение K_p определяется экспериментально для разных трасс распространения радиоволн при определенной частоте сигнала. Согласно проведенным измерениям в г. Москве при частоте 40 МГц значение K_p колеблется в пределах 5...10.

При использовании декаметрового диапазона волн можно выделить три зоны приема: *ближнюю, среднюю и дальнюю*.

Ближней будем называть зону приема в пределах *прямой радиовидимости*, т.е. в теоретической модели распространения радиоволн при $R \leq R_{\text{ГОР}}$.

В *средней* зоне, лежащей за линией радиогоризонта и ориентировочно ограниченной пределами $R_{\text{ГОР}} \leq R \leq (2...3)R_{\text{ГОР}}$, прием сигнала возможен за счет явлений дифракции и рефракции, приводящих к искривлению луча и распространению поверхностной волны, огибающей Землю.

В *дальней* зоне, лежащей за пределами $R \gg R_{\text{ГОР}}$, прием сигнала возможен за счет пространственной волны и ионосферной рефракции, что позволяет удлинить трассу радиоприема до 3000...4000 км.

В радиосвязи декаметрового диапазона используются ближняя и средняя зоны приема, в загоризонтной радиолокации – средняя и дальняя. Следует иметь в виду, что деление зон приема на ближнюю и среднюю зоны в реальных условиях достаточно условно, поскольку в ближней зоне ($R \leq R_{\text{ГОР}}$) из-за рельефа местности и разного рода строений, особенно в условиях города, радиовидимость между пунктами связи может отсутствовать, а прием основываться на явлениях дифракции, т.е. огибании поверхностной радиоволной препятствий. Будем, однако, для определенности считать, что в формуле (7.22) в ближней зоне, т.е. при $R \leq R_{\text{ГОР}}$, коэффициент $K_3 = 1$, а все дополнительные потери в радиотрассе учитывать за счет коэффициента K_p . В средней зоне, т.е. при $R_{\text{ГОР}} \leq R \leq (2...3)R_{\text{ГОР}}$, возникают дополнительные потери, учитываемые с помощью коэффициента загоризонтной радиосвязи:

$$K_3 = \left(\frac{R}{R_{\text{ГОР}}} \right)^n, \quad (7.23)$$

где $n > 1$ – показатель степени, зависящий от многих факторов, в том числе, рельефа местности, состояния атмосферы и частоты сигнала. Согласно экспериментальным данным для диапазона частот 30...40 МГц значение $n = 1.5...3$. Поскольку значение n возрастает с повышением частоты сигнала, то при загоризонтной радиосвязи более предпочтителен диапазон 27...58 МГц, чем 146...174 МГц.

При вертикальном четвертьволновом вибраторе в месте приема мощность сигнала на входе радиоприемника с входным сопротивлением 50 Ом [11]:

$$P_{\text{ПР}} = \left(\frac{E^2 \lambda^2}{800} \right) \cdot 10^{-12} \text{ [Вт]}. \quad (7.24)$$

Подставив (7.22) в (7.24), получим:

$$P_{\text{ПР}} = \frac{10P_1 h_1^2 h_2^2}{R^4 K_p^2 K_3^2} \cdot 10^{-12} \text{ [Вт]}. \quad (7.25)$$

Согласно (7.25) при антеннах – вертикальных четвертьволновых вибраторах на обоих концах радиолинии – мощность принимаемого сигнала не зависит от длины волны и с расстоянием уменьшается по закону $\frac{1}{R^4}$.

Выразим (7.25) в децибелах относительно уровня в 1 Вт:

$$P_{\text{ПР.дБ}} = -110 + 10 \cdot \lg P_1 + 20 \cdot \lg(h_1 h_2) - 40 \cdot \lg R - 20 \cdot \lg K_p - 20 \cdot \lg K_3 \text{ [дБ Вт]}. \quad (7.26)$$

В частности, при мощности $P_1 = 10$ Вт и $K_p = 10$ Вт из (7.26) имеем:

$$P_{\text{ПР.дБ}} = -120 + 20 \cdot \lg(h_1 h_2) - 40 \cdot \lg R - 20 \cdot \lg K_3 \text{ [дБ Вт]}. \quad (7.27)$$

Значение $P_{\text{ПР.дБ}}$, вычисленное по (7.27), должно превышать реальную чувствительность приемника $U_{\text{ч. ПР}}$ [мкВ] при входном сопротивлении 50 Ом, определяемую как:

$$P_{\text{ч. ПР.дБ}} \text{ [дБ Вт]} = -137 + 20 \cdot \lg U_{\text{ч. ПР}}. \quad (7.27, \text{ а})$$

При чувствительности $U_{\text{ч. ПР}} = 1$ мкВ значение $P_{\text{ч. ПР.дБ}}$ [дБ Вт] = -137 дБ Вт.

При чувствительности $U_{\text{ч. ПР}} = 0.1$ мкВ значение $P_{\text{ч. ПР.дБ}}$ [дБ Вт] = -157 дБ Вт.

На линии радиогоризонта при $P_1 = 10$ Вт, $K_p = 10$ и $K_3 = 1$ из (7.27) с учетом (7.21) получим:

$$P_{\text{ПР.дБ}} = -142 + 40 \lg \frac{\sqrt{h_1 h_2}}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}} \text{ [дБ Вт]}. \quad (7.138)$$

При получении (7.28) использовано очевидное соотношение:

$$20 \cdot \lg(h_1 h_2) = 40 \cdot \lg \sqrt{h_1 h_2}.$$

Согласно (7.28), например, при $h_1 = 10$ м и $h_2 = 20$ м имеем: $P_{\text{ПР дБ}} = 131.3$ дБ Вт, т.е. уровень сигнала в точке приема $R_{\text{ГОР}} = 27.2$ км соответствует чувствительности приемника в 2 мкВ. Следовательно, при реально достижимой чувствительности радиоприемника 0.1 мкВ запас уровня сигнала в точке приема превышает 20 дБ. Такое превышение сигнала позволяет организовать радиосвязь не только в области до радиогоризонта, но и за его пределами. Как показали экспериментальные исследования, при частоте 40 МГц дальность линии радиосвязи превышает значение $R_{\text{ГОР}}$ в 2...4 раза, т.е. при умеренной высоте подъема антенн в 10...20 м может достигать 50... 100 км.

7.2 Примеры решения типовых задач

7.2.1 Найти действующее значение напряженности электрического поля, создаваемого вертикальным электрическим диполем с излучаемой мощностью $P'_1 = 25$ кВт и коэффициентом усиления (коэффициентом направленного действия) 1.5 на расстоянии $R = 300$ км от передающей антенны, если передатчик работает на волне $\lambda = 3000$ м. Расчет поля произвести для случая распространения радиоволн над почвой с параметрами $\varepsilon = 4$, $\sigma = 10^{-2}$ См/м по формуле (7.5) и графику (рисунок 7.1).

Решение.

По формуле (7.7) вычисляем численное расстояние 2ρ :

$$2\rho \approx \frac{\pi \cdot r}{\lambda \sqrt{\varepsilon_{3M}^2 + (60\lambda \cdot \sigma_{3M})^2}} = \frac{\pi \cdot 3 \cdot 10^5}{3 \cdot 10^3 \sqrt{16 + 60^2 \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 0.01^2}} \approx 0.18.$$

Так как $60\sigma\lambda \gg \varepsilon$, то, воспользовавшись рисунком 7.1, находим $V_{3M}(\rho) \approx 0.95$. Действующее значение поля найдем по формуле (7.5):

$$E_{3M.д} = \frac{245\sqrt{P'_1 \cdot G_1}}{R} \cdot V_{3M}(\rho) = \frac{245\sqrt{25 \cdot 1.5}}{300} \cdot 0.95 = 4.8 \text{ [мВ/м]}.$$

7.2.2 Вычислить напряженность поля на расстоянии $R = 2000$ км по данным задачи 7.2.1, приняв радиус Земли $a_{3M} = 6370$ км.

Решение.

Так как при распространении длинных (СДВ) волн в основном определяется потерями при отражении от ионосферы и почти не зависит от свойств земной поверхности, над которой распространяются волны, действующее значение напряженности поля определяем по формуле Остина (7.9).

Для этого находим центральный угол θ :

$$\theta_{РАД} \approx \frac{R}{a} = \frac{2000}{6370} = 0.314 \quad \text{или} \quad \theta \approx 18^\circ.$$

Находим множитель функции ослабления (7.10):

$$\sqrt{\frac{\theta}{\sin \theta}} = \sqrt{\frac{0.314}{0.309}} = 1.008.$$

Вычисляем второй множитель функции ослабления:

$$e^{-\frac{0.0014 \cdot R}{\lambda^{0.6}}} = 0.16.$$

Затем находим $V_{СФ.3М} = 1.008 \cdot 0.16 \approx 0.16$.

Действующее значение напряженности поля находим по (7.9):

$$E_{д} = \frac{300\sqrt{P}}{R} \cdot V_{СФ.3М} = \frac{300\sqrt{25}}{2000} \cdot 0.16 = 0.12 \text{ [мВ/м]}.$$

7.2.3 Найти действующее значение напряженности электрического поля в ночные часы, создаваемого вертикальным электрическим диполем с излучаемой

мой мощностью $P_1' = 12$ кВт и коэффициентом усиления $G_1 = 1$ на расстоянии $R = 1500$ км от передающей антенны, если передатчик работает на волне $\lambda = 900$ м. Расчет поля произвести для случая распространения радиоволн над почвой с параметрами $\varepsilon = 4$, $\sigma = 10^{-2}$ См/м.

Решение.

Расчет произведем по формуле (7.11), учитывающей земную и отраженную от ионосферы волну.

$$E_{и.д} = \frac{10233}{\sqrt{R}} \sqrt{G_1 P_1'} \cdot \exp(-8.94 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^{-0.26} \cdot R);$$

$$E_{и.д} = \frac{10233}{\sqrt{1500}} \sqrt{12 \cdot 1} \cdot \exp(-8.94 \cdot 10^{-4} \cdot 0.9^{-0.26} \cdot 1500) = 915.2 \cdot 0.232 \approx 230 \text{ мкВ/м.}$$

7.2.4 Определить зависимости расстояния прямой видимости [км] при отсутствии атмосферной рефракции (геометрический горизонт) и при нормальной атмосферной рефракции (радиогоризонт) в зависимости от высоты поднятия антенн в точках передачи и приема – h_1, h_2 [м]. Расчеты проводить по формулам 6.13 и 6.14.

Решение.

Ниже приведен листинг программы расчета (MathCAD 2001) и графики зависимости (рисунок 7.5) расстояний прямой видимости R [км] в случае отсутствия атмосферной рефракции. Расчеты проведены для трех значений высоты h_2 (5, 15 и 30 м), высота h_1 изменялась в пределах 0...100 км.

$$\begin{aligned} h_1 &:= 0, 10.. 100 & h_2 &:= 5 & R1(h_1) &:= 3.57 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \\ & & & & R2(h_1) &:= 3.57 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \\ & & h_2 &:= 15 & & \\ & & & & R3(h_1) &:= 3.57 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \\ & & h_2 &:= 30 & & \end{aligned}$$

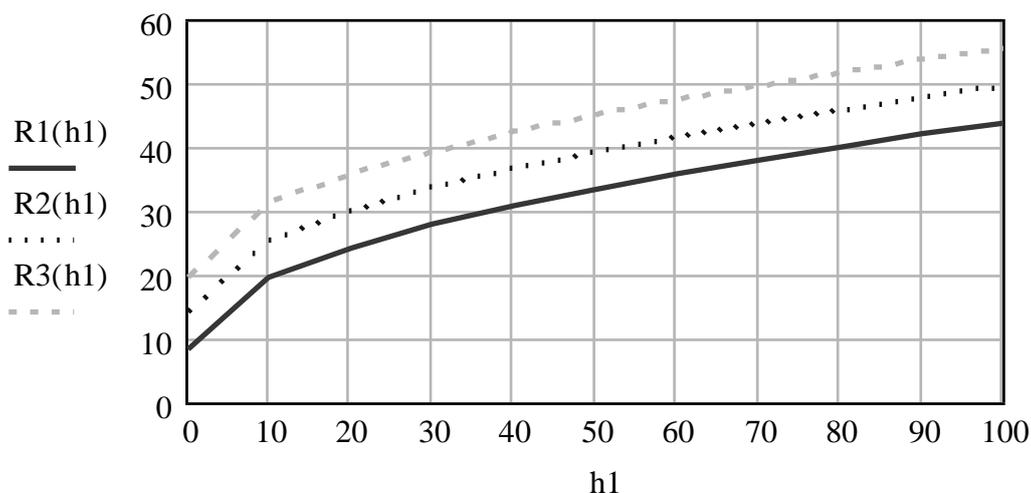


Рисунок 7.5 - Зависимости расстояний прямой видимости R [км] в случае отсутствия атмосферной рефракции

Ниже приведен листинг программы расчета (MathCAD 2001) и графики зависимости (рисунок 7.6) расстояний прямой видимости R [км] в случае отсутствия атмосферной рефракции (геометрический горизонт) $R2(h_1)$ и при нормальной атмосферной рефракции (радиогоризонт) $R1(h_1)$. Расчеты проведены для высоты $h_2 = 15$ м, высота h_1 изменялась в пределах 0...100 км.

$$h1 := 0, 10..100 \quad R1(h1) := 4.2 \cdot (\sqrt{h1} + \sqrt{h2})$$

$$h2 := 15 \quad R2(h1) := 3.57 \cdot (\sqrt{h1} + \sqrt{h2})$$

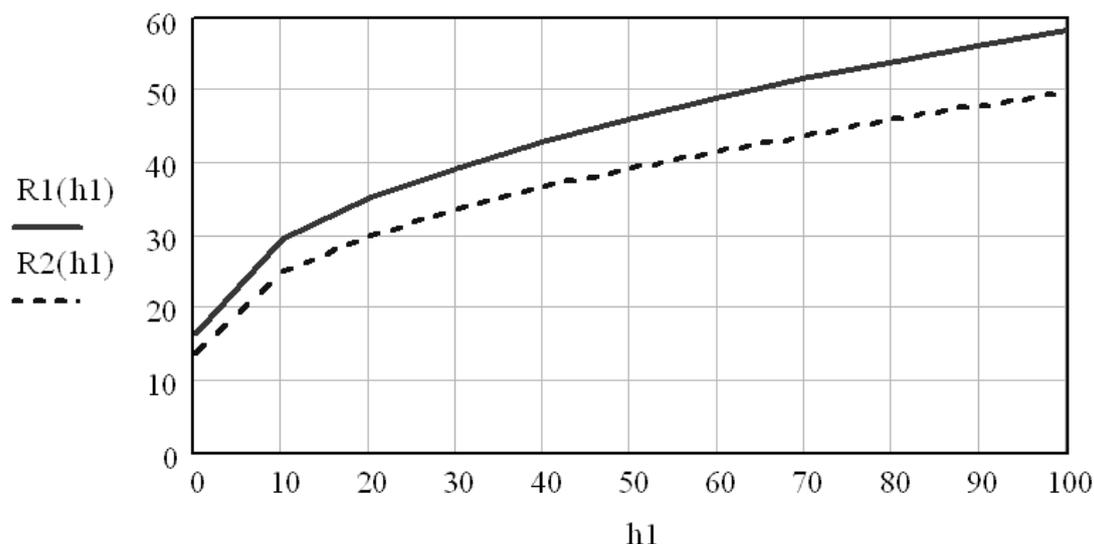


Рисунок 7.6 - Графики зависимости расстояний прямой видимости R [км] в случае отсутствия атмосферной рефракции и при нормальной атмосферной рефракции

7.2.5 Определить зависимости требуемой мощности радиопередатчика на линии радиогоризонта в зависимости от высоты поднятия четвертьволновых антенн над уровнем Земли при трех значениях $P_{\text{ПР, дБ}}$. При расчетах использовать формулы (7.22 – 7.28).

Решение.

В составленной программе (нижеследующий листинг MathCAD 2001) введены обозначения:

- $P(h_1)$, $P(h_2)$, $P(h_3)$ – требуемая мощность радиопередатчика P_1 , дБ Вт;
- K_p – коэффициент дополнительных потерь K_p ;
- K_z – коэффициент загоризонтной радиосвязи K_3 ;
- P_r – чувствительность радиоприемника $P_{\text{ПР, дБ}}$;
- h_1 , h_2 – высота поднятия антенны над уровнем Земли h_1 , h_2 , м;
- R – протяженность радиотрассы R , км.

На рисунке 7.7 представлены графики зависимости мощности радиопередатчика [дБ Вт] от высоты поднятия антенны h_1 при $h_2 = \text{const} = 20$ м.

$$K_p := 10 \quad K_z := 1 \quad h_2 := 20$$

$$Pr := \begin{pmatrix} -130 \\ -140 \\ -150 \end{pmatrix} \quad \text{ORIGIN} = 1$$

$$h_1 := 0, 10.. 100$$

$$F(h_1) := 40 \cdot \log\left(\frac{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}}{\sqrt{h_1 \cdot h_2}}\right)$$

$$P_1(h_1) := 132 + 20 \cdot \log(K_p) + 20 \cdot \log(K_z) + Pr_1 + F(h_1)$$

$$P_2(h_1) := 132 + 20 \cdot \log(K_p) + 20 \cdot \log(K_z) + Pr_2 + F(h_1)$$

$$P_3(h_1) := 132 + 20 \cdot \log(K_p) + 20 \cdot \log(K_z) + Pr_3 + F(h_1)$$

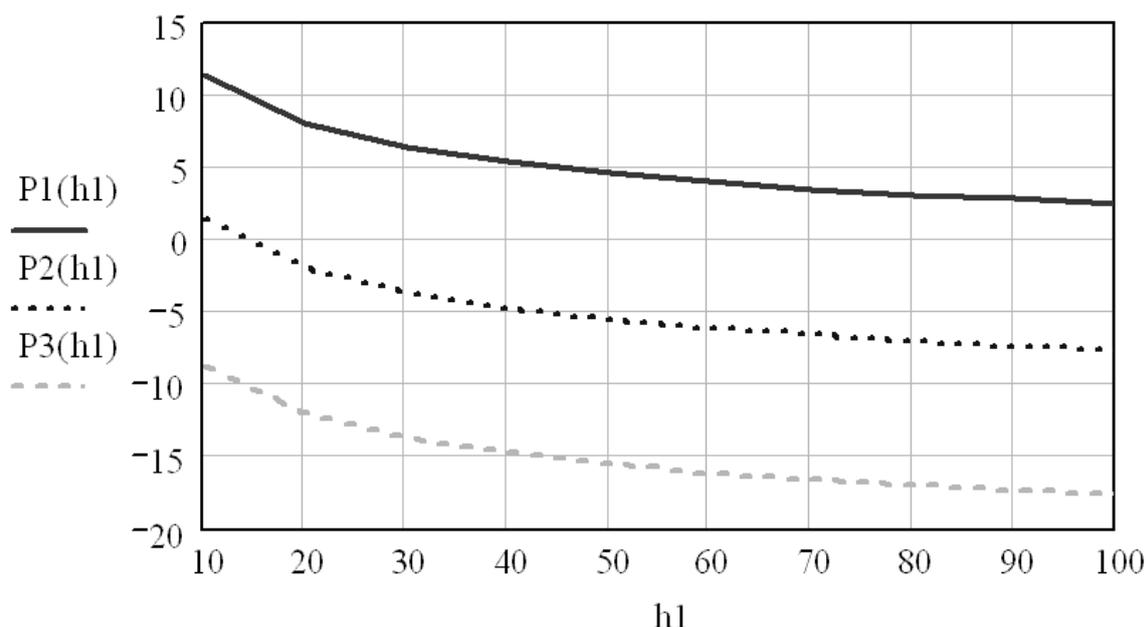


Рисунок 7.7 – Зависимости $P_1(h_1)$ при $h_2 = 20$ м для трех значений чувствительности радиоприемника P_{r1} , P_{r2} , P_{r3} [дБ Вт]

7.2.6 Произвести расчет линии космической радиосвязи по формулам (7.19) – (7.20) при следующих исходных условиях:

- орбита спутника – низкоорбитальная..... $R = 1000$ км;
- полоса пропускания радиоприемника..... $\Delta f = 40$ кГц;
- температура шума радиоприемника..... $T_{шл} = 700$ К;
- температура шума радиоприемника..... $T_{ш.прм} = 500$ К;
- требуемое соотношение сигнал-шум..... $C_{с/ш} = 10$;
- коэффициент потерь в атмосфере..... $B_{тр} = 3$ дБ;
- коэффициент потерь в фидерах..... $B_{фид} = 2$ дБ;
- коэффициент усиления передающей антенны..... $G_{пер} = 10$;
- площадь приемной антенны..... $S_{прм} = 0.1$ м².

Решение.

Согласно (7.19) определим реальную чувствительность радиоприемника спутникового ретранслятора:

$$P_{\text{ПРМ}} = -174 + 10 \cdot \lg 40 + 10 \cdot \lg 10 + 10 \cdot \lg 4 = -174 + 16 + 10 + 6 = -142 \text{ дБ Вт.}$$

Согласно (7.20) мощность радиопередатчика наземного абонента:

$$P_{\text{ПЕР}} = 71 + 20 \cdot \lg 1000 - 142 + 2 + 3 - 10 \cdot \lg 10 - 10 \cdot \lg 0.1 = -6 \text{ дБ Вт}$$

или $P_{\text{ПЕР}} = 0.25 \text{ Вт.}$

Как видно из приведенного примера, для радиосвязи наземного абонента со спутником в виду работы прямым лучом достаточно мощность радиопередатчика с весьма малой мощностью в 250 мВт.

Листинг программы по расчету космической линии радиосвязи согласно (7.19) приведен ниже. В программе приняты следующие обозначения:

- P1(R), P2(R), P3(R) – требуемая мощность радиопередатчика $P_{\text{ПЕР}}$, дБ Вт;

- Pr – чувствительность радиоприемника $P_{\text{ПРМ}}$, дБ Вт;

- R – протяженность радиотрассы R, км;

- Bt – потери в тропосфере $B_{\text{ТР}}$, дБ;

- Bf – потери в фидере $B_{\text{ФИД}}$, дБ;

- Ga – коэффициент усиления передающей антенны $G_{\text{ПЕР}}$;

- S – площадь приемной антенны $S_{\text{ПРМ}}$, м².

$$\begin{array}{l} R := 500, 750.. 20000 \quad \text{ORIGIN} := 1 \\ Bt := 3 \quad S := 0.1 \quad Bf := 2 \quad Ga := 10 \end{array} \quad Pr := \begin{pmatrix} -137 \\ -142 \\ -157 \end{pmatrix}$$

$$P1(R) := 71 + 20 \cdot \log(R) + Bt + Bf - 10 \log(Ga) - 10 \cdot \log(S) + Pr_1$$

$$P2(R) := 71 + 20 \cdot \log(R) + Bt + Bf - 10 \log(Ga) - 10 \cdot \log(S) + Pr_2$$

$$P3(R) := 71 + 20 \cdot \log(R) + Bt + Bf - 10 \log(Ga) - 10 \cdot \log(S) + Pr_3$$

На рисунке 7.8 приведены зависимости $P_{\text{ПЕР.дБ}}(R)$ при трех значениях чувствительности радиоприемника: -137, -142, -157 дБ Вт. Графики позволяют проследить, как меняется требуемая мощность спутникового передатчика в зависимости от протяженности радиотрассы и параметров антенн, чувствительности радиоприемника, затухания в атмосфере и за счет фидера.

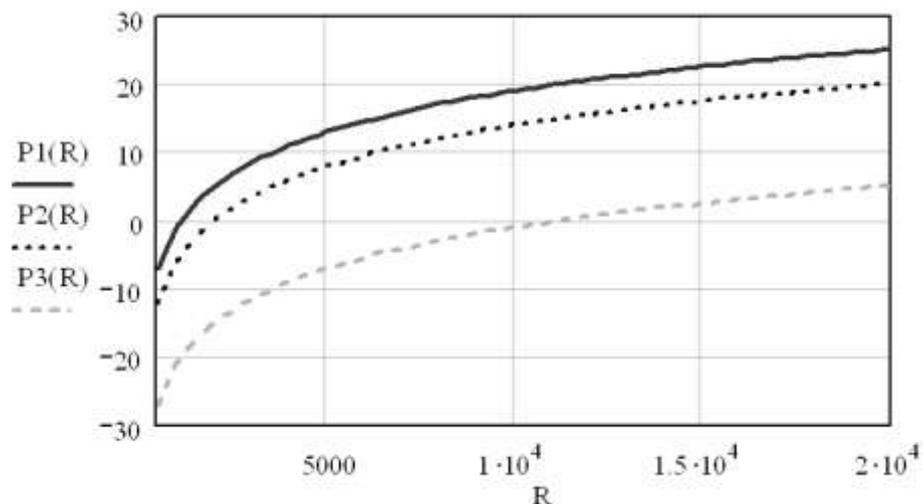


Рисунок 7.8 – Зависимости $P_{\text{пер.дб}}(R)$ при трех значениях чувствительности радиоприемника

7.3 Задачи для самостоятельного решения

7.3.1 Найти действующее значение напряженности электрического поля, создаваемого вертикальным электрическим диполем с излучаемой мощностью $P'_1 = 25$ кВт и коэффициентом усиления $G_1 = 1.5$ на расстоянии $R = 300$ км от передающей антенны, если передатчик работает на волне λ [м]. Расчет поля произвести для случая распространения радиоволн над почвой с параметрами ϵ , σ [См/м].

Значения λ , ϵ и σ приведены в таблице 7.1 и зависят от номера варианта, представляющего трёхзначное число.

7.3.2 Вычислить напряженность поля на расстоянии R [км] по данным задачи 7.2.1, приняв радиус Земли $a_{\text{ЗМ}} = 6370$ км.

Значения P'_1 , r и λ приведены в таблице 7.2 и зависят от номера варианта, представляющего трёхзначное число.

7.3.3 Вычислить действующее значение напряженности поля, создаваемое вертикальным электрическим диполем с излучаемой мощностью P'_1 [кВт] и коэффициентом направленного действия 1.5 на расстоянии R [км] от передающей антенны, если передатчик работает на волне λ [км]. Принять радиус Земли $a_{\text{ЗМ}} = 6370$ км.

Значения P'_1 , r и λ приведены в таблице 7.3 и зависят от номера варианта, представляющего трёхзначное число.

Таблица 7.1 – Исходные данные к задаче 7.3.1

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
λ , м	$1 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^3$
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
ε	25	20	15	10	9	8	7	6	5	4
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
σ , См/м	2	0.6	0.2	0.8	0.06	0.4	0.2	0.08	0.02	0.01

Таблица 7.2 – Исходные данные к задаче 7.3.2

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
λ , м	$1 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^3$
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
P'_1 , кВт	100	80	60	50	40	30	20	10	5	2
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
R , км	300	250	200	180	160	140	120	100	90	80

Таблица 7.3 – Исходные данные к задаче 7.3.3

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
λ , м	$1 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^3$
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
P'_1 , кВт	100	80	60	50	40	30	20	10	5	2
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$R \cdot 1000$, км	16	14	12	10	8	6	4	2	1.5	1

7.3.4 Найти действующее значение напряженности электрического поля в ночные часы, создаваемое вертикальным электрическим диполем с излучаемой мощностью P'_1 [кВт] и коэффициентом усиления $G_1 = 1$ на расстоянии R [км] от передающей антенны, если передатчик работает на волне λ [м].

Значения P'_1 , R и λ приведены в таблице 7.4 и зависят от номера варианта, представляющего трёхзначное число.

Таблица 7.4 – Исходные данные к задаче 7.3.4

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
λ , м	$1 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^2$	$8 \cdot 10^2$	$7 \cdot 10^2$	$6 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^2$	$1.1 \cdot 10^2$
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
P'_1 , кВт	100	90	80	70	60	55	25	30	40	50
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$r \cdot 1000$, км	1.1	1.3	1.5	1.7	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1

7.3.5 Определить зависимость расстояния прямой видимости R [км] в зависимости от высоты поднятия антенн в точках передачи и приема h_1, h_2 [м]: $R = K(\sqrt{h_1^2 + h_2^2})$.

Значения K, h_1 и h_2 приведены в таблице 7.5 и зависят от номера варианта, представляющего трёхзначное число.

Таблица 7.5 – Исходные данные к задаче 7.3.5

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
K	3.57	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0	4.05	4.1	4.15	4.2
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$h_1, \text{ м}$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$h_2, \text{ м}$	1...20	2...30	3...40	4...50	5...60	5...50	4...40	3...30	2...20	1...40

7.3.6 Определить зависимости требуемой мощности радиопередатчика на линии радиогоризонта в зависимости от высоты поднятия четвертьволновых антенн (h_1, h_2) над уровнем Земли при чувствительности радиоприемника $P_{\text{ПРМ}}$ [дБ Вт]. При расчетах считать, что коэффициент дополнительных потерь $K_p = 10$, а коэффициент загоризонтной радиосвязи $K_3 = 1$. Для решения задачи использовать формулы (7.13) – (7.18).

Значения $P_{\text{ПРМ}}, h_1$ и h_2 приведены в таблице 7.6 и зависят от номера варианта, представляющего трёхзначное число.

7.3.7 Произвести расчет реальной чувствительности радиоприемника спутникового ретранслятора линии при следующих исходных условиях:

- орбита спутника – низкоорбитальная..... $R, \text{ км}$;
- полоса пропускания радиоприемника..... $\Delta f, \text{ кГц}$;
- температура шума радиолинии..... $T_{\text{ШЛ}} = 700 \text{ К}$;
- температура шума радиоприемника..... $T_{\text{Ш.ПРМ}} = 500 \text{ К}$;
- требуемое соотношение сигнал-шум..... $C_{\text{С/Ш}}$;
- коэффициент потерь в атмосфере..... $B_{\text{ТР}} = 3 \text{ дБ}$;
- коэффициент потерь в фидерах..... $B_{\text{ФИД}} = 2 \text{ дБ}$;
- коэффициент усиления передающей антенны..... $G_{\text{ПЕР}} = 10$;
- площадь приемной антенны..... $S_{\text{ПРМ}} = 0.1 \text{ м}^2$.

Значения R , Δf и $C_{С/Ш}$ приведены в таблице 7.7 и зависят от номера варианта, представляющего трёхзначное число.

Таблица 7.6 – Исходные данные к задаче 7.3.6

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$P_{ПРМ}$, дБ Вт	120	125	130	135	140	145	150	152	154	156
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
h_1 , м	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
h_2 , м	1...20	2...30	3...40	4...50	5...60	5...50	4...40	3...30	2...20	1...40

Таблица 7.7 – Исходные данные к задаче 7.3.7

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$R \cdot 10^3$, км	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	6
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Δf , кГц	10	20	30	35	40	45	50	55	60	70
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$C_{С/Ш}$	5	6	7	8	9	10	12	13	14	15

7.3.8 Определить требуемую мощность бортового спутникового радиопередатчика в зависимости от протяженности радиотрассы, чувствительности радиоприемника и коэффициенте потерь в атмосфере по следующим данным:

- орбита спутника – низкоорбитальная..... R , км;

- полоса пропускания радиоприемника..... $\Delta f = 40$ кГц;
- температура шума радиолинии..... $T_{\text{ШЛ}} = 700$ К;
- температура шума радиоприемника..... $T_{\text{Ш.ПРМ}} = 500$ К;
- требуемое соотношение сигнал-шум..... $C_{\text{С/Ш}} = 10$;
- коэффициент потерь в атмосфере..... $B_{\text{ТР}}$, дБ;
- коэффициент потерь в фидерах..... $B_{\text{ФИД}} = 2$ дБ;
- коэффициент усиления передающей антенны..... $G_{\text{ПЕР}} = 1$;
- площадь приемной антенны..... $S_{\text{ПРМ}} = 0.5$ м².

Значения R , $P_{\text{ПРМ}}$ и $B_{\text{ТР}}$ приведены в таблице 7.8 и зависят от номера варианта, представляющего трёхзначное число.

Таблица 7.8 – Исходные данные к задаче 7.3.8

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$R \cdot 10^3$, км	1	1.5	2	3	4	5	6	8	10	12
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$P_{\text{ПРМ}}$, дБ Вт	120	125	129	132	134	137	140	143	146	153
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$B_{\text{ТР}}$, дБ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО КУРСУ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Тема 1. Элементы векторного анализа

1.1 Величина работы, которую совершает сила \vec{F} на прямолинейном пути \vec{S} , есть: *a)* вектор; *б)* скаляр; *в)* не определена.

1.2 Скалярное произведение двух векторов равно нулю, если вектора: *a)* коллинеарны; *б)* ортогональны; *в)* единичные.

1.3 Векторное произведение двух векторов равно нулю, если вектора: *a)* компланарны; *б)* ортогональны; *в)* единичные.

1.4 Производная от вектора $\vec{A}(t)$ есть: *a)* отрезок соединяющий концы векторов $\vec{A}(t)$ и $\vec{A}(t + dt)$; *б)* перпендикуляр к векторам $\vec{A}(t)$ и $\vec{A}(t + dt)$; *в)* касательная к линии L описываемой вектором $\vec{A}(t)$;

1.5 Если вектор \vec{C} постоянный (не зависит от t), то производная от вектора вида $\frac{d}{dt}[f(t)\vec{C}]$ оказывается: *a)* перпендикулярна вектору $\vec{A} = F(t) \cdot \vec{C}$; *б)* параллельна вектору \vec{A} ; *в)* в общем случае ответ и не *a)*, и не *б)*.

1.6 Из второго закона Ньютона следует, что: *a)* работу производит лишь тангенциальная составляющая силы; *б)* работу производит лишь нормальная составляющая силы; *в)* обе составляющие силы искривляют траекторию.

1.7 Градиент скалярной функции всегда есть: *a)* вектор; *б)* скаляр; *в)* зависит от выбранной системы координат.

1.8 Дивергенция векторного поля всегда есть: *a)* вектор; *б)* скаляр; *в)* зависит от выбранной системы координат.

1.9 Дивергенция векторного поля это: *a)* количество силовых линий, начинающихся в бесконечно малом объеме; *б)* поток поля \vec{A} через поверхность этого объема; *в)* скорость изменения проекции вектора вдоль соответствующей координаты.

1.10 Ротор векторного поля есть: *a)* новое векторное поле; *б)* псевдовектор; *в)* циркуляция поля по замкнутому контуру.

Тема 2. Основные положения теории электромагнетизма

2.1 Векторное поле $\vec{A}(x, y, z)$ задано однозначно, если: а) известна $\operatorname{div}\vec{A}(x, y, z)$; б) известен $\operatorname{rot}\vec{A}(x, y, z)$; в) известны $\operatorname{div}\vec{A}(x, y, z)$ и $\operatorname{rot}\vec{A}(x, y, z)$.

2.2 Необходимым и достаточным условием потенциальности поля является: а) $\operatorname{div}\vec{A}(x, y, z) = 0$; б) $\operatorname{rot}\vec{A}(x, y, z) = 0$; в) $\operatorname{div}\vec{A}(x, y, z) = 0$ и $\operatorname{rot}\vec{A}(x, y, z) = 0$.

2.3 Необходимым и достаточным условием соленоидальности поля являются: а) $\operatorname{div}\vec{A}(x, y, z) = 0$; б) $\operatorname{rot}\vec{A}(x, y, z) = 0$; в) $\operatorname{div}\vec{A}(x, y, z) = 0$ и $\operatorname{rot}\vec{A}(x, y, z) = 0$.

2.4 Из формулы для силы Лоренца следует, что фокусировку пучка заряженных частиц можно осуществить: а) электрическим полем; б) магнитным полем; в) необходимо использовать оба поля.

2.5 Увеличить кинетическую энергию пучка заряженных частиц можно: а) электрическим полем; б) магнитным полем; в) необходимо использовать оба поля.

2.6 Собственными токами электромагнитного поля являются: а) ток проводимости; б) ток смещения; в) поляризационный ток.

2.7 Ток генератора есть: а) сторонний ток; б) собственный ток; в) ток проводимости.

2.8 Если в выбранной точке пространства $\operatorname{div} \vec{B} = 0$, то: а) магнитные силовые линии замкнуты; б) векторное поле \vec{B} нигде не имеет источников; в) магнитные заряды в природе отсутствуют.

2.9 Электромагнитное поле в магнитодиэлектрике определено, если известны: а) абсолютная диэлектрическая проницаемость; б) абсолютная магнитная проницаемость; в) относительная диэлектрическая и магнитная проницаемость.

2.10 В средах, в которых вектора \vec{D} и \vec{E} , либо вектора \vec{B} и \vec{H} являются не коллинеарными, диэлектрическая, либо магнитная проницаемости являются: а) тензорами; б) функциями координат; в) независимыми от координат.

Тема 3. Уравнения Максвелла

3.1 Предпочтительнее пользоваться уравнениями Максвелла в интегральной форме, если: а) известно в явном виде уравнение контура, охватывающего электромагнитное поле; б) известны в явном виде уравнения контура и поверхности, через которую проходят силовые линии; в) известны в явном виде уравнения контура, поверхности и объема, содержащего электрические заряды.

3.2 Принцип суперпозиции электромагнитных полей заключается в том, что: а) общее решение уравнений Максвелла есть сумма частных решений; б) общее решение есть сумма частных решений помноженных на произвольные

постоянные коэффициенты a_i , где i – номер частного решения; в) общее решение есть произведение частных решений.

3.3 Мгновенное значение вектора, гармонически изменяющегося во времени, есть: а) реальная часть от комплексной амплитуды; б) реальная часть самого вектора; в) мнимая часть самого вектора.

3.4 Амплитуды двух гармонически изменяющихся во времени векторов имеют вид $\vec{E}_1 = E_0 \cdot \vec{i}_x$ и $\vec{E}_2 = jE_0 \cdot \vec{i}_x$. Из условия следует, что: а) вектора параллельны орту \vec{i}_x ; б) образуют в пространстве угол 90° ; в) вектор \vec{E}_2 опережает вектор \vec{E}_1 по фазе на четверть периода.

3.5 Вектор Пойнтинга для гармонического процесса имеет вид:

$$\vec{P} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [\vec{E} \cdot \vec{H}^*] + \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \vec{E} \cdot \vec{H}^* \right\} \cdot e^{j2\omega t},$$

где: а) первое слагаемое есть колеблющаяся часть мощности, а второе – усредненная за период плотность потока мощности; б) первое слагаемое есть усредненная за период плотность потока мощности, а второе – колеблющаяся часть мощности, среднее значение которой за период равно 0; в) оба слагаемых описывают плотность потока мощности переносимой электромагнитным поле.

3.6 Из четвертого уравнения Максвелла $\operatorname{div} \vec{B} = 0$ следует, что магнитных зарядов в природе не существует. Однако при расчете, например, антенн вводят сторонний магнитный ток j_{CT} с целью: а) придания симметричного вида первого и второго уравнений Максвелла; б) если известно решение для вектора \vec{E} , то автоматическая запись решения для вектора \vec{H} осуществляется путем простой замены $\epsilon \leftrightarrow \mu_a$, $j_{CT}^{\partial} \leftrightarrow j_{CT}^M$; в) доказательства дуальности (двойственности) электромагнитного процесса.

3.7 Введение стороннего магнитного тока позволяет: а) доказать лемму Лоренца; б) не позволяет доказать лемму Лоренца; в) лемма Лоренца не имеет отношения к магнитному току.

3.8 Для того, чтобы найти мгновенное значение поля в методе комплексных амплитуд, необходимо: а) домножить реальную часть на показательную функцию вида $\exp(-j\omega t)$; б) домножить реальную часть на показательную функцию вида $\exp(j\omega t)$; в) поделить на показательную функцию вида $\exp(j\omega t)$.

3.9 Действительная часть диэлектрической проницаемости ($\epsilon_a = \epsilon'_a + j\epsilon''_a$) определяется: а) процессами поляризации в веществе; б) потерями на Джоулево тепло; в) процессами распространения волны в веществе.

3.10 Тангенс угла диэлектрических потерь определяется только: а) величиной мнимой части диэлектрической проницаемости; б) величиной действительной части диэлектрической проницаемости; в) отношением мнимой части к действительной части диэлектрической проницаемости.

Тема 4. Плоские электромагнитные волны

4.1 Математической моделью однородной плоской волны является функция: а) $A(z, t) = A_m \cos(\omega t - \beta z)$; б) $A(z, t) = \operatorname{Re}\{A_m e^{-j\beta z} e^{j\omega t}\}$; в) $A(z, t) = \operatorname{Re}\{\dot{A}_m e^{-j\beta z}\}$.

4.2 Мгновенные значения функции $A(z, t)$ определяется аргументами: а) (x, y, z, t) ; б) (x, y, t) ; в) (z, t) .

4.3 Колебания в точке с координатой $Z > 0$ запаздывает по фазе на величину: а) βz радиан; б) $(\omega t - \beta z)$ радиан; в) ωt радиан.

4.4 Плоскостью равных фаз или волновым фронтом называется плоскость: а) перпендикулярная оси Z ; б) плоскость, удовлетворяющая при любых t уравнению $\omega t - \beta z = \text{const}$; в) плоскость XOY (волна распространяется вдоль оси z).

4.5 Процесс распространения электромагнитной волны характеризуется коэффициентом распространения $\gamma = \alpha + j\beta$, где α – коэффициент ослабления, β – коэффициент фазы. Волновой процесс осуществляется, если: а) γ – комплексное число; б) γ – мнимое число; в) γ – действительное число.

4.6 Электромагнитная волна является плоской однородной волной только в случае, если: а) $E_x \neq 0, E_y = E_z = 0$; б) отличная от нуля проекция E_x удовлетворяет уравнению $-\frac{\partial E_x}{\partial X} = \frac{\partial E_x}{\partial Y} = 0$; в) $E_y \neq 0, E_x = E_z = 0$ и

$$\frac{\partial E_y}{\partial X} = \frac{\partial E_y}{\partial Y} = 0.$$

4.7 В однородной плоской волне векторы \vec{E} и \vec{H} : а) перпендикулярны; б) $\vec{E} \perp \vec{H}$ и перпендикулярны оси распространения Z ; в) ориентированы произвольно.

4.8 Волна называется правополяризованной, если: а) $E_x = E_{m1} \cos \omega t$; б) $E_x = E_{m1} \cos \omega t, E_y = E_{m2} \sin \omega t$; в) $E_x = E_{m1} \cos \omega t, E_y = -E_{m2} \sin \omega t$.

4.9 Комплексный характер характеристического сопротивления среды означает, что: а) среда с потерями на Джоулево тепло; б) среда с потерями, вектора \vec{E} и \vec{H} колеблются не синфазно; в) имеется сдвиг фаз между векторами \vec{E} и \vec{H} , пропорциональный тангенсу угла диэлектрических потерь.

4.10 Волновой вектор \vec{k} плоской волны образует одинаковый угол θ с положительными направлениями осей x, y, z декартовой системы координат. Каков этот угол? **Ответ:** а) 30° ; б) 45° ; в) 57.74° .

Тема 5. Граничные условия для векторов электромагнитного поля

5.1 Нормальные составляющие вектора магнитной индукции на границе раздела двух сред: *a)* претерпевают скачок; *б)* непрерывны; *в)* не определены.

5.2 Касательные составляющие векторов напряженности магнитного поля: *a)* непрерывны; *б)* претерпевают скачок; *в)* непрерывны, если проводимость σ границы раздела конечна.

5.3 На границе раздела идеального проводника плотность поверхностного электрического тока численно равна: *a)* касательной проекции вектора напряженности магнитного поля; *б)* касательной проекции вектора магнитной индукции; *в)* нормальной проекции вектора магнитной индукции.

5.4 Нормальные составляющие векторов электрического смещения на границе раздела двух сред: *a)* непрерывны; *б)* претерпевают скачок; *в)* непрерывны, если на границе отсутствуют электрические заряды.

5.5 Нормальные составляющие векторов напряженности электрического поля на границе раздела: *a)* претерпевают скачок; *б)* непрерывны; *в)* претерпевают скачок, если на границе отсутствуют электрические заряды.

5.6 Касательные составляющие векторов напряженности электрического поля на границе раздела двух сред: *a)* непрерывны; *б)* претерпевают скачок; *в)* претерпевают скачок только на границе идеального проводника.

5.7 Силовые линии электрического вектора подходят к поверхности идеального проводника: *a)* по нормали; *б)* по касательной; *в)* угол преломления всегда равен нулю.

5.8 Если диэлектрическая проницаемость второй среды стремится к бесконечности то, независимо от ориентации электрического поля в первой среде, на границе раздела двух сред имеет место только: *a)* нормальная; *б)* касательная; *в)* обе составляющие электрического поля.

5.9 Граничные условия имеют место только: *a)* в окрестности выделенной точки на поверхности; *б)* на всей поверхности раздела; *в)* на всей поверхности раздела, исключая особые точки.

5.10 Вектор нормали к границе раздела берется со знаком плюс, если: *a)* восстановлен к внешней границе; *б)* восстановлен к внутренней границе; *в)* всегда.

Тема 6. Радиоволны в материальных средах

6.1 Неоднородной изотропной средой являются среды с материальными константами вида: *а)* $\varepsilon_a(x, y, z)$, $\mu_a = \mu_0$; *б)* $\varepsilon_a(x, y, z)$, $\mu_a(x, y, z)$; *в)* $\varepsilon_a = \varepsilon_0$, $\mu_a(x, y, z)$.

6.2 В земной атмосфере приближение геометрической оптики справедливо для волн радиодиапазона: *а)* диапазона ДВ; *б)* диапазона СВ; *с)* диапазона УКВ.

6.3 Метод геометрической оптики не учитывает такого явления, как: *а)* интерференцию; *б)* лучевую картину поля; *в)* дифракцию радиоволн.

6.4 Поверхностный слой Земли является: *а)* полупроводником; *б)* диэлектриком; *в)* имеет электрические свойства металла.

6.5 Диэлектрическая проницаемость тропосферы претерпевает пространственные и временные изменения. Причиной таких изменений является: *а)* магнитное поле Земли; *б)* гравитационное поле Земли; *в)* тепловое поле Земли.

6.6 Какая часть атмосферы Земли является дисперсионной средой: *а)* стратосфера; *б)* ионосфера; *в)* тропосфера.

6.7 Плотность атмосферы ростом высоты уменьшается, т.е. $n_0 \geq n(z)$, где n_0 показатель преломления у поверхности Земли. Плоская волна, падающая на границу слоя под углом θ_0 , будет: *а)* распространяться прямолинейно; *б)* угол θ будет уменьшаться с увеличением z ; *в)* угол θ будет увеличиваться.

6.8 Явление поворота луча имеет место, если: *а)* $\theta = 0$; *б)* $n(z_n) = n_0 \sin \theta_0$; *в)* $\theta_0 \rightarrow \frac{\pi}{2}$, где θ_0 – угол падения волны на границу слоя, $n(z_n)$ – показатель преломления на высоте z_n , n_0 – показатель преломления у поверхности Земли.

6.9 Тропосферная волноводная рефракция – это: *а)* отрицательная рефракция; *б)* критическая рефракция; *в)* положительная рефракция.

6.10 Критическая частота ионосферного слоя определяется: *а)* концентрацией ионов; *б)* концентрацией электронов; *в)* концентрацией нейтральных молекул.

6.11 Максимально применимая частота (МПЧ) зависит от: *а)* мощности излучения $P_{\text{и}}$; *б)* от критической (плазменной) частоты $f_{\text{пл}}$; *в)* от угла падения волны на границу слоя θ_0 .

6.12 Диэлектрическую проницаемость тропосферы можно рассчитать, если известны: *а)* давление газа; *б)* давление водяных паров (абсолютная влажность воздуха); *в)* температура.

Тема 7. Особенности распространения радиоволн различных диапазонов

7.1 Для устойчивой КВ связи в зависимости от состояния ионосферы возникает необходимость смены рабочих частот f_p . При этом определяют максимальную частоту (МЧ) $f_{\text{МЧ}}$, максимально применимую частоту (МПЧ) $f_{\text{МПЧ}}$, наименьшую применимую частоту (НПЧ) $f_{\text{НПЧ}}$ и оптимально рабочую частоту (ОРЧ) $f_{\text{ОРЧ}}$. Рабочую частоту f_p выбирают, исходя из условия: а) $f_{\text{НПЧ}} \leq f_p \leq f_{\text{МПЧ}}$; б) $f_{\text{НПЧ}} \leq f_p \leq f_{\text{ОРЧ}}$; в) $f_p = f_{\text{ОРЧ}}$.

7.2 Радиолинии УКВ работают в условиях прямой видимости. Опытным путем установлено, что длина радиотрассы несколько больше, причиной тому является: а) дифракция; б) рефракция; в) интерференция.

7.3 В каких районах ионосферные магнитные бури вызывают наиболее сильное нарушение КВ связи (от нескольких часов до нескольких суток):

а) в районе экватора; б) в приполярных районах; в) в районах низких широт.

7.4 В диапазоне КВ прием сопровождается непрерывными изменениями уровня сигнала во времени (замираниями). Самой эффективной мерой борьбы с замираниями является: а) применение приемника с повышенным динамическим диапазоном; б) прием на разнесенные в пространстве антенны; в) использование в приемнике системы АРУ.

7.5 По какой формуле ведется расчет радиолинии (СДВ, ДВ, СВ) при низко расположенных антеннах: а) по интерференционной формуле Б.А. Введенского; б) по квадратичной формуле Б.А. Введенского; в) по формуле Шулейкина – Ван-дер-Поля.

7.6 Расчет КВ радиолинии земным лучом дает наибольшую дальность R в случае, если радиолиния расположена: а) над почвой средней влажности (поверхность гладкая); б) над пустыней; в) над морем.

7.7 Внутренний радиус мертвой зоны КВ радиолинии определяется электрическими свойствами: а) подстилающей среды; б) тропосферы; в) ионосферы.

7.8 В результате своеобразных вспышек активности Солнца происходят нарушения КВ связи, причиной этому является воздействующие на атмосферу Земли: а) рентгеновское излучение; б) потоки заряженных частиц; в) ультрафиолетовое излучение.

7.9 В зоне приема ионосферных волн может наблюдаться явление перекрестной модуляции: при настройке приемника на частоту f может прослушиваться передача другого, мощного передатчика, при этом несущая частота мешающего передатчика f_M не входит в полосу пропускания приемника. Явление перекрестной модуляции характерно для радиоволн диапазона:

а) средних волн; б) коротких волн; в) длинных волн.

7.10 На космических радиолиниях, как правило, используются частоты из диапазона 1...10 ГГц. Нижняя частота этого диапазона (1 ГГц) выбрана,

исходя из уровня шумов: а) космического происхождения; б) шумов нагретой земной атмосферы; в) радиоизлучением земной поверхности.

7.11 На космических радиополосах, как правило, используются частоты из диапазона 1...10 ГГц. Верхняя частота этого диапазона (10 ГГц) выбрана, исходя из уровня шумов: а) космического происхождения; б) шумов нагретой земной атмосферы; в) радиоизлучением земной поверхности.

7.12 Интенсивность радиоизлучения атмосферы при изменении угла возвышения (угла места Δ) радиополосы в пределах от 0 до 90° : а) увеличивается; б) уменьшается; в) остается неизменным

7.13 Интенсивность радиоизлучения поверхности Земли при изменении угла возвышения (угла места Δ) радиополосы в пределах от 0 до 90° : а) увеличивается; б) уменьшается; в) остается неизменным

9. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2003. – 558 с.
2. Ерохин Г.А., Чернышев О.В., Козырев Н.Д., Кочержевский В.Г. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 368 с.
3. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Высшая школа, 1992. – 416 с.
4. Красюк Н.П., Дымович Н.Д. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Высшая школа, 1974. – 536 с.
5. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. – М.: - Высшая школа, 1975. – 244 с.
6. Основы электродинамики и распространение радиоволн Часть 1. Электромагнитные поля и волны: Курс лекций / Шостак А. С. - 2012. 143 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/1223>
7. Основы электродинамики и распространение радиоволн Часть 2. Распространение радиоволн: Курс лекций / Шостак А. С. - 2012. 84 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/1221>
8. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 558 с. : В другом месте, <http://www.vixri.ru/?p=3609>
9. Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Техническая электродинамика. - М.: Радио и связь. 2002. – 536 с.: Библиотека ТУСУР,

10. Основы электродинамики и распространение радиоволн: Сборник задач / Корогодов В. С., Козлов В. Г., Шостак А. С. - 2012. 172 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/1224>
11. Техническая электродинамика, Основы электродинамики и распространение радиоволн, Антенны и устройства СВЧ: Лабораторный практикум / Корогодов В. С., Козлов В. Г., Шостак А. С. - 2012. 137 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/1319>
12. Основы электродинамики и распространение радиоволн: Методическое пособие по самостоятельной работе студентов / Шостак А. С. - 2012. 13 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/1705>