



Кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры

А.С. Шостак

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

ЧАСТЬ 2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Учебное пособие для студентов специальности 160905 –
«Техническая эксплуатация транспортного
радиооборудования»



ТОМСК 2012

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

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

А.С.Шостак

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

ЧАСТЬ 2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Учебное пособие для студентов специальности 160905 –
«Техническая эксплуатация транспортного
радиооборудования»

2012

Рецензент: профессор кафедры КИПР, д.т.н. Татаринов В.Н.

Технический редактор: доцент кафедры КИПР ТУСУР, к.т.н. Озёркин Д.В.

Шостак А.С.

Основы электродинамики и распространение радиоволн. Часть 2. Распространение радиоволн. Учебное пособие для студентов специальности 160905 – «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования».

Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 83 с.

Данная книга является второй частью курса «Основы электродинамики 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.

Книга написана для студентов специальности 160905 – «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования», но может быть использована и студентами других специальностей радиотехнического профиля.

© Шостак А.С., 2012

© Кафедра КИПР Томского
государственного университета систем
управления и радиоэлектроники, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

1 ВВЕДЕНИЕ. ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН.....	5
2 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН.....	7
2.1 Классификация радиоволн по диапазонам	7
2.2 Краткая характеристика радиотрасс	8
2.3 Электродинамические свойства природных сред	10
2.4 Типы радиолиний	18
2.5 Распространение радиоволн в свободном пространстве.....	20
2.6 Особенности распространения радиоволн на реальных трассах ..	22
2.7 Область пространства, существенно участвующая в формировании поля на заданной линии	25
3 РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗЕМНОЙ ВОЛНЫ	29
3.1 Физические процессы при распространении земной волны	29
3.2 Поле излучателя в освещенной зоне в приближении плоской Земли	32
3.2.1 Интерференционный множитель с учетом сферичности Земли.....	35
3.3 Поле низко расположенного излучателя в зоне приближения плоской Земли.....	36
3.4 Поле в зонах полутени и тени при высоко поднятых и низко расположенных излучателях	38
4 РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ	41
4.1 Электрические свойства тропосферы и ионосферы	41
4.1.1 Распределение заряженных частиц в ионосфере	41
4.1.2 Диэлектрическая проницаемость и проводимость ионосферы	43
4.1.3 Диэлектрические свойства тропосферы.....	47
4.2 Преломление радиоволн	50
4.2.1 Общий подход к вопросам распространения радиоволн в атмосфере	50
4.2.2 Траектория волны. Радиус кривизны траектории.....	51
4.2.3 Траектория радиоволн в ионосфере	56
5 ДИАПАЗОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН.....	60
5.1 Распространение сверхдлинных и длинных радиоволн.....	60
5.2 Особенности распространения средних волн	61
5.3 Распространение коротких волн	61
5.4 Распространение ультракоротких волн на наземных радиолиниях	65

5.5 Распространение ультракоротких волн на космических радиолиниях	72
5.5.1 Особенности спутниковой связи	72
5.5.2 Потери в тракте распространения.....	73
5.5.3 Энергетические соотношения на космических радиолиниях	76
5.6 Особенности распространения волн оптического диапазона.....	78
5.6.1 Общие вопросы распространения волн оптического диапазона.....	78
5.6.2 Ослабление волн оптического диапазона в атмосфере	78
5.6.3 Нелинейные эффекты в атмосфере при распространении лазерного излучения	81
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	83

1 ВВЕДЕНИЕ. ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

На распространение радиоволн существенное влияние оказывает среда (тракт) распространения, являющаяся связующим звеном между передающей и приемной антеннами. В простейшем случае, когда распространение происходит в свободном пространстве, это влияние заключается только в ослаблении поля за счет расходимости волны. В случае реальных сред оно гораздо сложнее и многообразнее.

Полупроводящие свойства земли приводят к утечке энергии поля в Землю. Из-за сферичности Земли возникает дифракция, т.е. огибание волной земного шара. Различного рода неровности земной поверхности рассеивают и отражают радиоволны, изменяют их поляризацию, создают затенение пункта приема. Земля изменяет также свойства антенн, расположенных вблизи ее поверхности.

Атмосфера Земли является поглощающей неоднородной средой, поэтому возникают ослабление сигнала и искривление траектории движения волн. Кроме общей плавной неоднородности в атмосфере всегда присутствуют локальные (местные) неоднородности, которые рассеивают электромагнитные волны. Такое рассеяние, с одной стороны, ослабляет поле прямой волны, а с другой – способствует распространению рассеянной волны далеко за линию горизонта. Это явление используется в некоторых системах дальней связи.

Верхние слои атмосферы (ионосфера) содержат газ в ионизированном состоянии, что приводит к появлению таких свойств, как дисперсия и анизотропия. Свойство дисперсии означает, что условия распространения волн разных частот различны. Волны с частотами ниже 30 МГц испытывают сильное преломление в ионосфере и отражаются от нее на Землю, обеспечивая дальнюю связь (например, в диапазоне коротких волн). Волны с более высокими частотами сравнительно слабо искривляются в ионосфере, выходят за пределы атмосферы и могут быть использованы в системах космической связи. Из-за дисперсии ионосферы возникают также искажения передаваемых сигналов. Анизотропия ионосферы проявляется в виде двойного лучепреломления волны и эффекта Фарадея (поворота плоскости поляризации волны).

Обычно поле в точке приема формируется несколькими волнами, в результате чего возникают *интерференционные замирания* и *искажения сигналов*. Для ослабления замираний необходимо уменьшить число интерферирующих волн с помощью правильного выбора частоты, формы и ориентации диаграммы направленности антенн. Чтобы искажения сигналов не превышали некоторой нормы, приходится ограничивать полосу сигнала или скорость передачи информации.

Параметры реальной среды распространения, как правило, не могут быть изменены человеком, что приводит к взаимосвязи вопросов распространения радиоволн и проектирования антенн. На практике приходится согласовывать многие параметры элементов радиолинии с трактом распространения. В частности, условия распространения предъявляют требования к диаграмме направленности антенн, необходимой мощности передатчика, чувствительности приемника, виду передаваемой информации и др.

2 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН [1-4]

2.1 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 2.1

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	---

2.2 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.*

2.3 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 2.2

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	$10^{-6} \dots 10^{-5}$

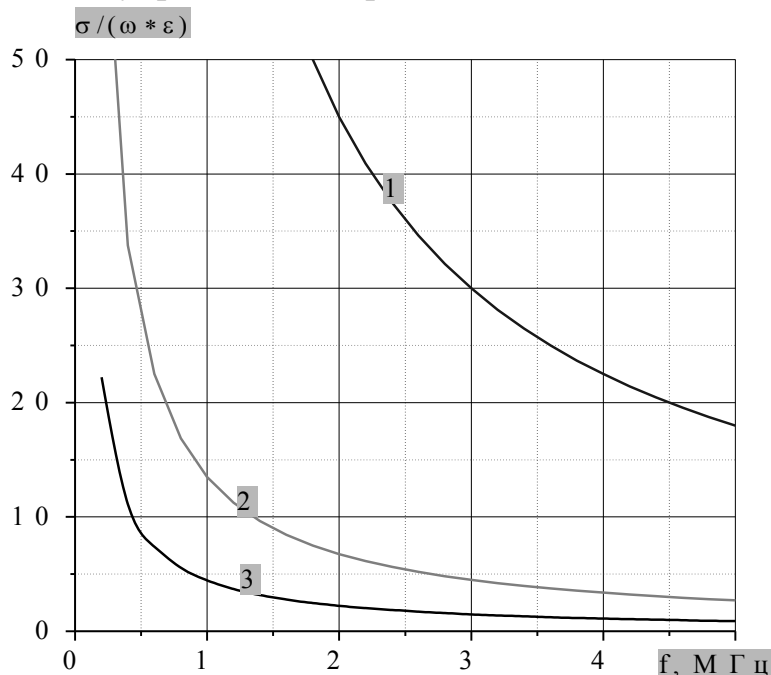
Нужно заметить, что подобные параметры, часто встречающиеся в литературе по распространению радиоволн и по радиолокации, описывают усредненные характеристики, получаемые на основе многочисленных измерений, проводимых в различных географических и метеорологических условиях. Достоверность таких цифр применительно 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.

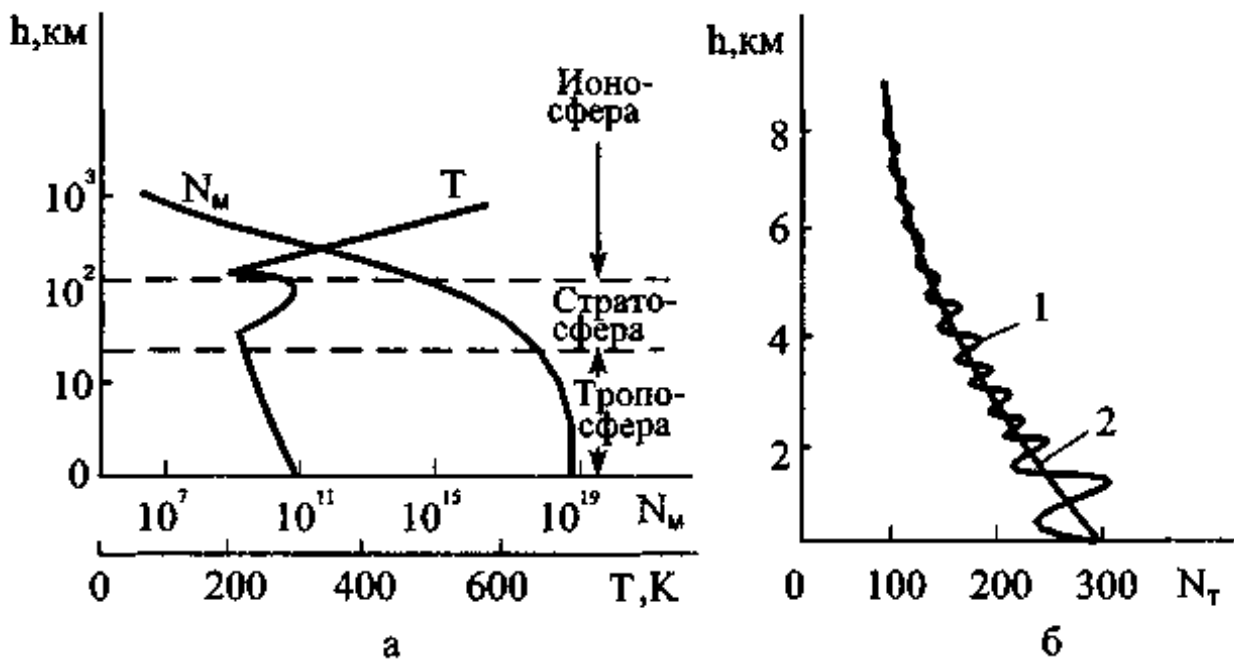


Рисунок 2.2 - Состав и свойства атмосферы

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:

$$D = \varepsilon \varepsilon_0 E = \varepsilon_0 E + p_\varepsilon = \varepsilon_0 E + k_\varepsilon E, \quad (2.1)$$

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:

$$\varepsilon = 1 + \left[\frac{157}{E} + \left(p + \frac{4800 p_n}{T} \right) \right] \cdot 10^{-6} \quad (2.2)$$

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):

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

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.

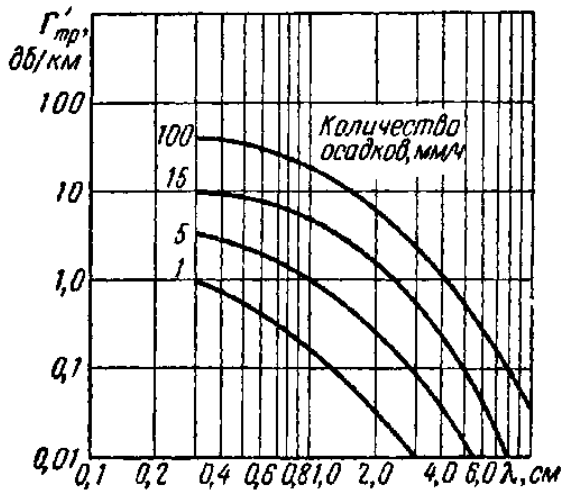


Рисунок 2.3 – Зависимость коэффициента поглощения радиоволн в дожде и тумане от длины волны

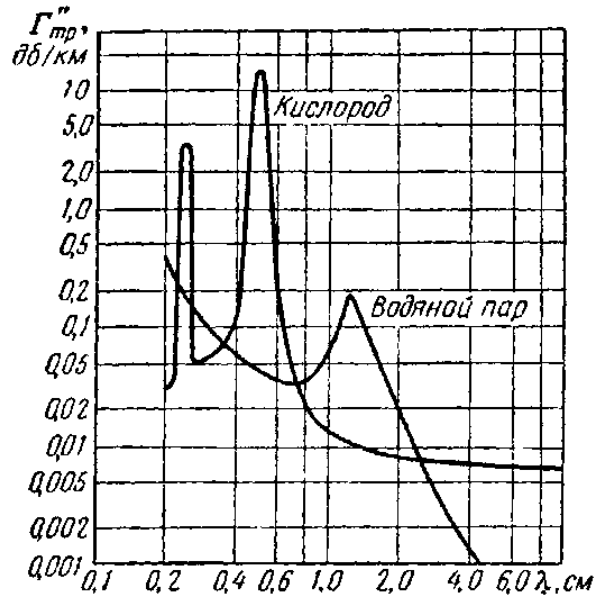


Рисунок 2.4. Зависимость поглощения в тропосфере от длины волны

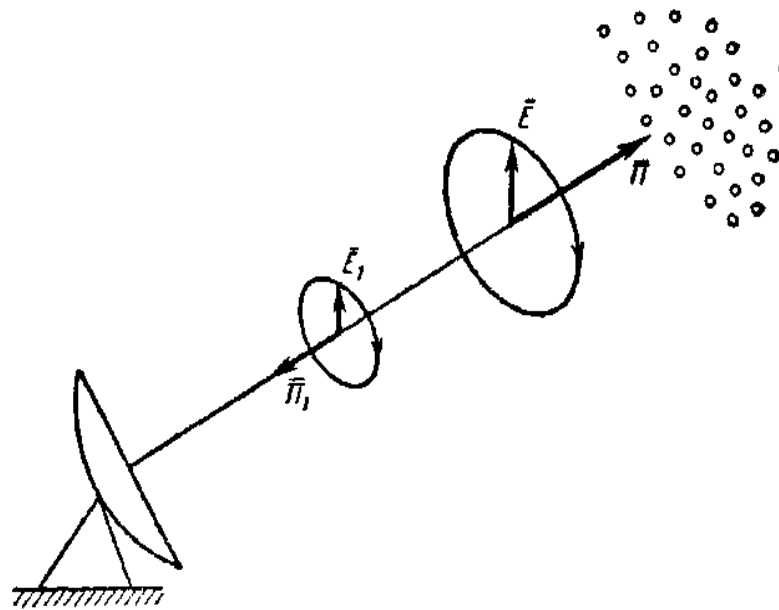


Рисунок 2.5. Изменение направления вращения вектора \vec{E} при отражении радиоволн от дождя

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.

2.4 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.

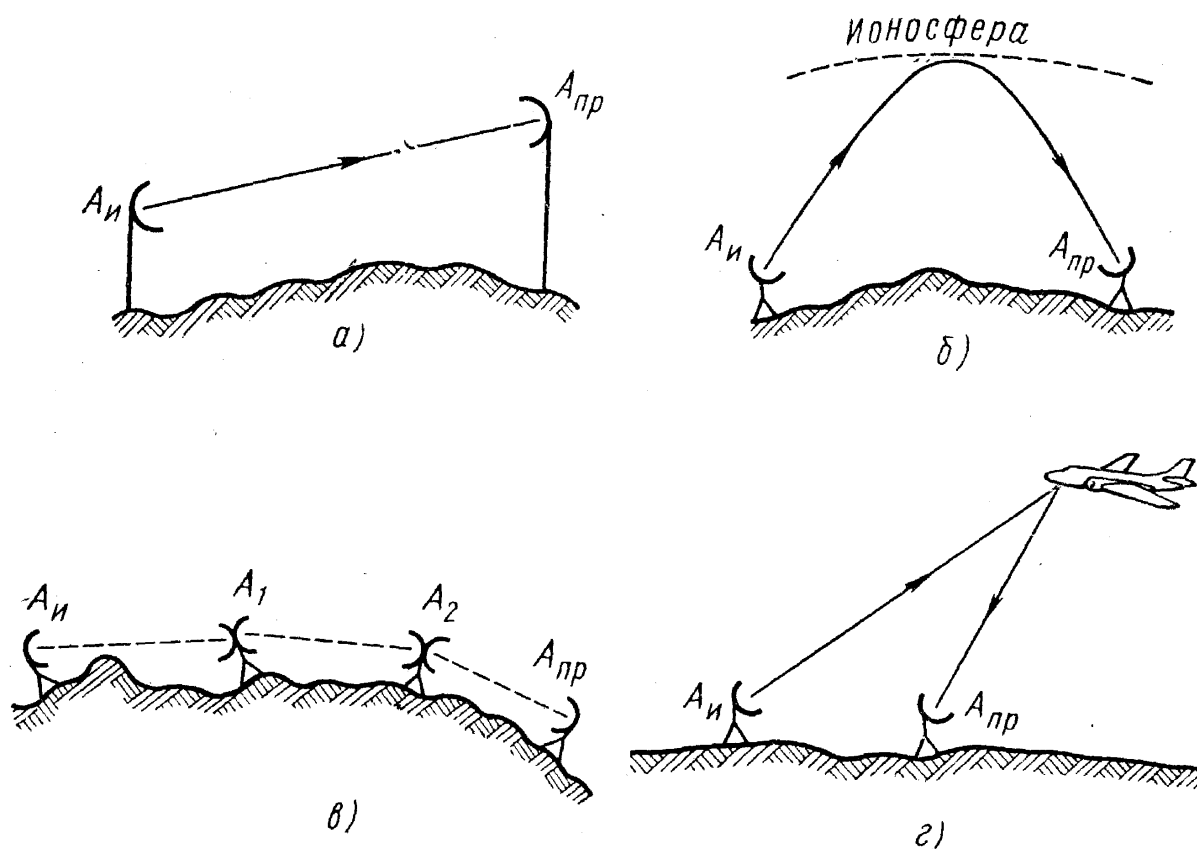


Рисунок 2.6 - Виды радиолиний (первичные, вторичные)

2.5 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:

$$E_{0\max} = \frac{\sqrt{60 \cdot P_1'}}{r}, \quad (2.3)$$

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:

$$E_{0\max} = \frac{\sqrt{60 \cdot P_1' \cdot G_1}}{r}, \quad (2.4)$$

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:

$$P_{\text{ПР}} = \Pi_2 S_{\text{Д}} \eta_2, \quad (2.5)$$

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:

$$\Pi_{02} = \frac{P_1 \eta_1 G_1}{4\pi r^2}. \quad (2.6)$$

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:

$$P'_{02} = \frac{P_1 \eta_1 G_1 G_2 \eta_2 \lambda^2}{4\pi r^2}. \quad (2.7)$$

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:

$$L_0 = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{G_1 G_2}. \quad (2.8)$$

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

$$L_0 = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2. \quad (2.9)$$

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

$$\tilde{V} = \frac{\bar{E}}{E_0} = V \exp(-j\varphi_V), \quad (2.10)$$

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.

2.6 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.

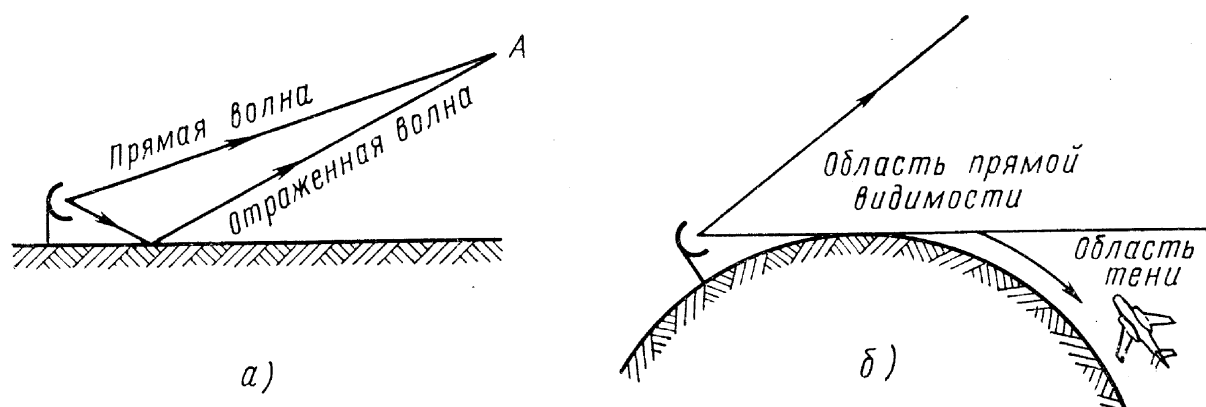


Рисунок 2.7 - Влияние Земли на распространение радиоволн

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.

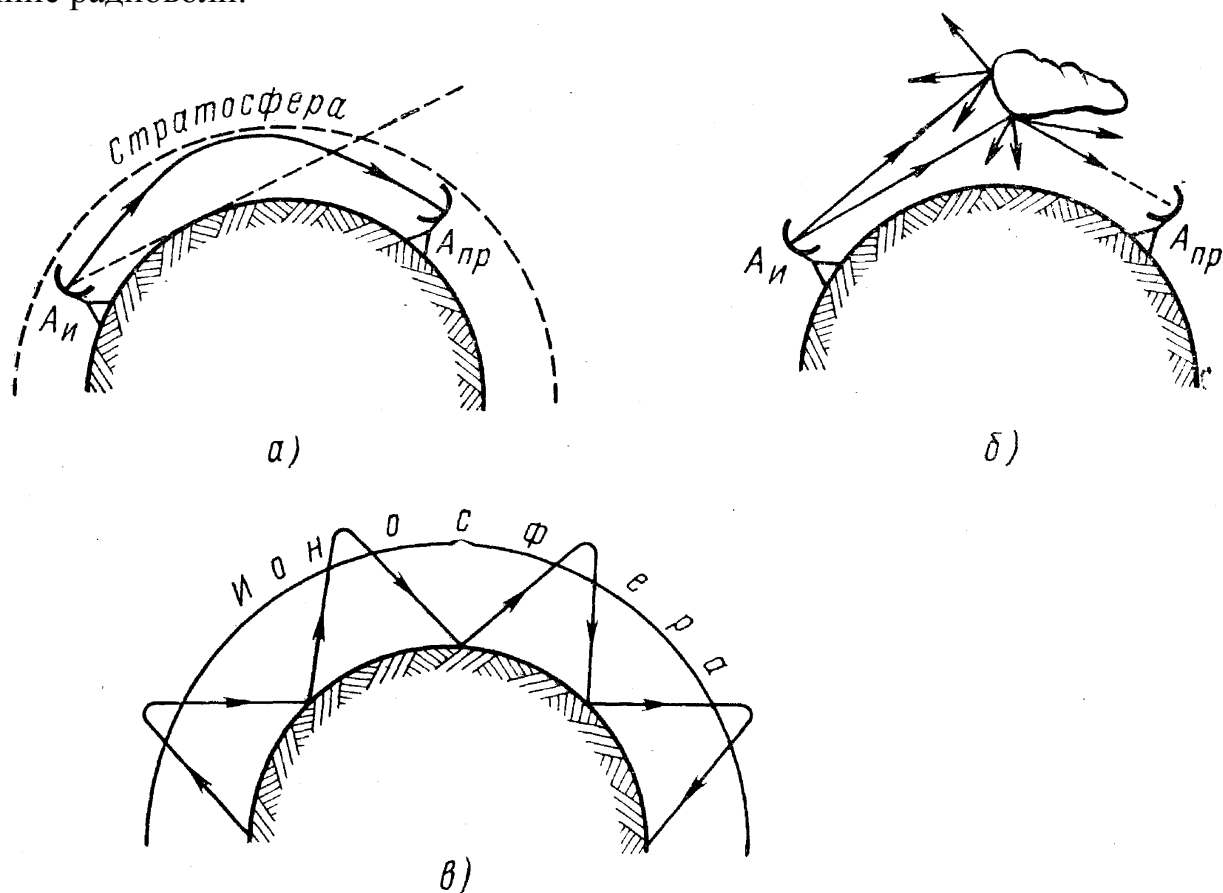


Рисунок 2.8 - Влияние атмосферы на распространение радиоволн

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).

2.7 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).

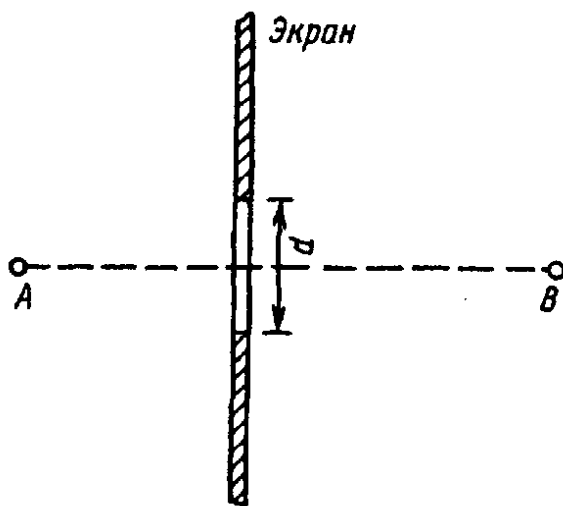


Рисунок 2.9

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.

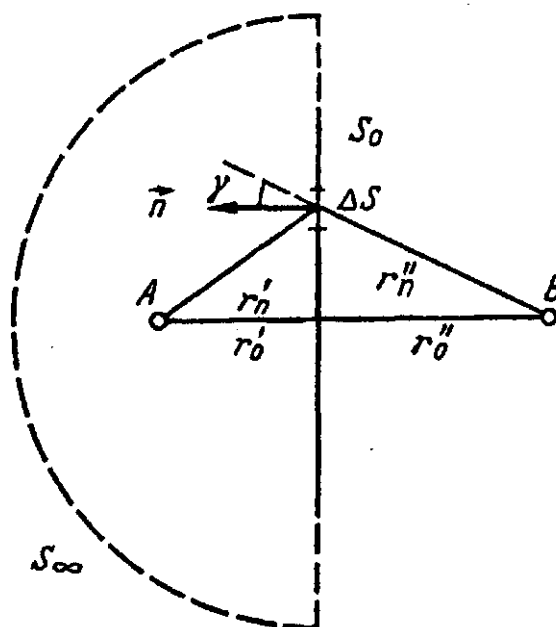


Рисунок 2.10

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:

$$AC_nB = AC_{n-1}B + \frac{\lambda}{2} = (r'_0 + r''_0) + n \cdot \frac{\lambda}{2}. \quad (2.11)$$

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.

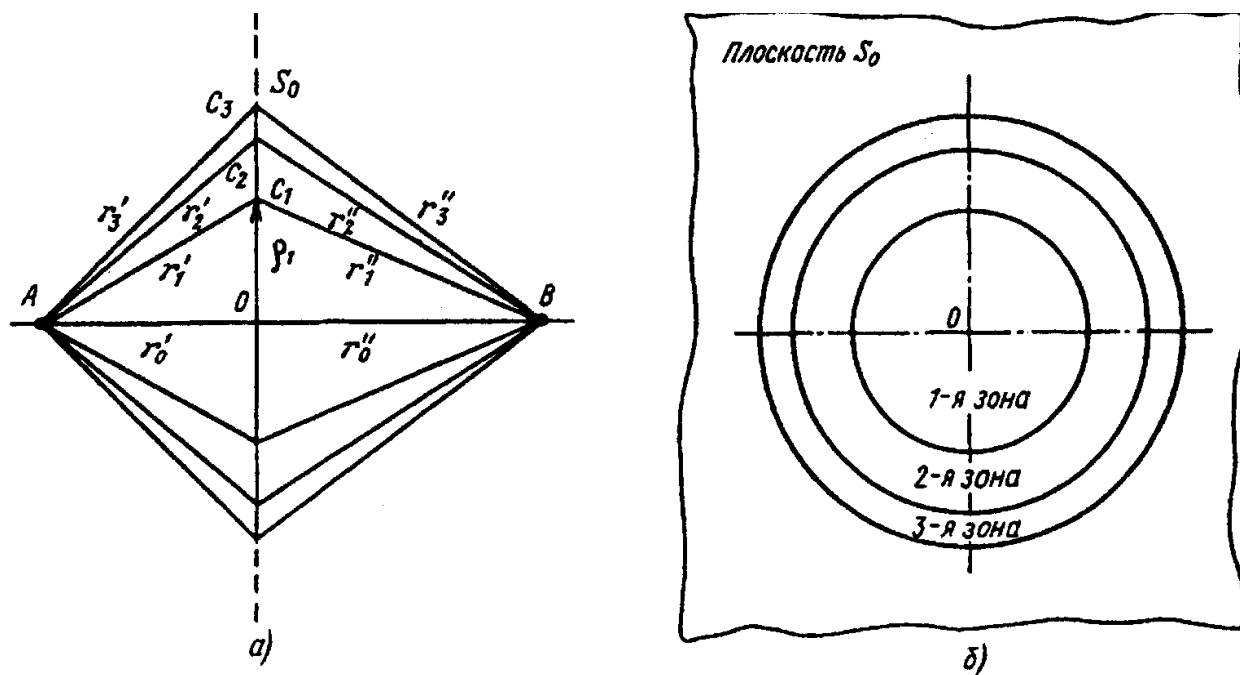


Рисунок 2.11 - Зоны Френеля

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:

$$E_{\max} \approx \frac{E_{1\max}}{2}, \quad (2.12)$$

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 $n \rightarrow \infty$.

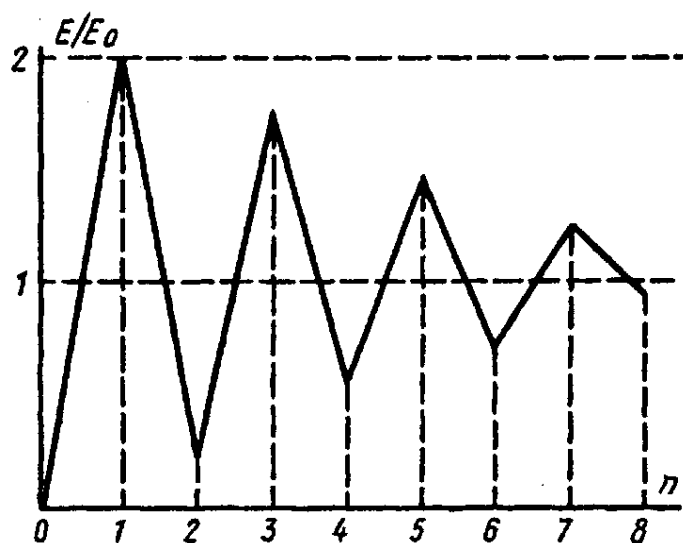


Рисунок 2.12 - Суммирование полей по n

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:

$$\rho_n = \sqrt{\frac{n\lambda r'_0 r''_0}{r'_0 + r''_0}}. \quad (2.13)$$

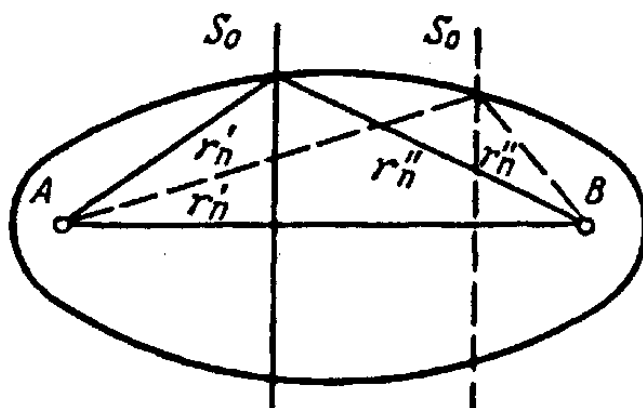


Рисунок 2.13 - Существенная область

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

$$\rho_{n \max} = \frac{\sqrt{n\lambda r}}{2}. \quad (2.14)$$

Максимальный радиус существенного эллипсоида, ограниченного восемью зонами Френеля:

$$\rho_{8 \max} = \frac{\sqrt{8\lambda r}}{2} = \sqrt{2\lambda r}. \quad (2.15)$$

Чем короче волна, тем меньше поперечные размеры существенного эллипсоида. Например, на волнах $\lambda = 10 \text{ м...}10 \text{ см}$ 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.

3 РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗЕМНОЙ ВОЛНЫ [1-4]

3.1 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.

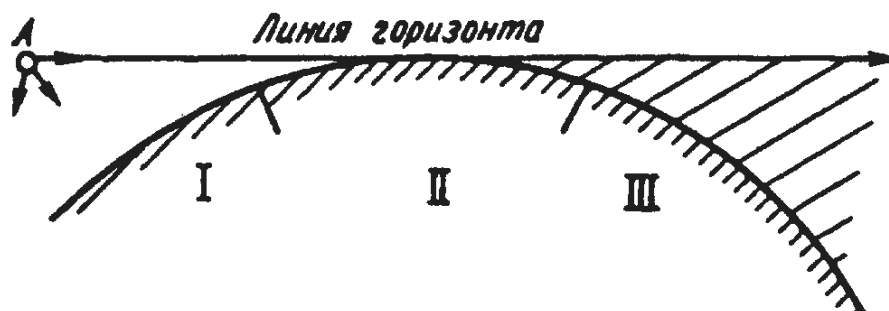


Рисунок 3.1 - Зоны освещенности

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:

$$r_{ПР} = 3.57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}). \quad (3.1)$$

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.

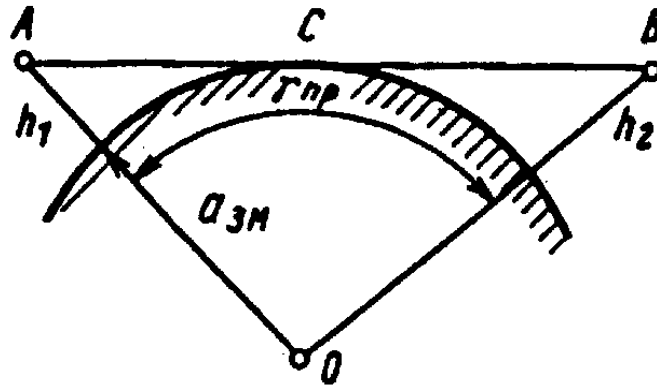


Рисунок 3.2 - Расстояние прямой видимости

3.2 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}_{PP} и отраженной с напряженностью \bar{E}_{OTP} :

$$\bar{E}_{3M} = \bar{E}_{PP} + \bar{E}_{OTP}. \quad (3.2)$$

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:

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

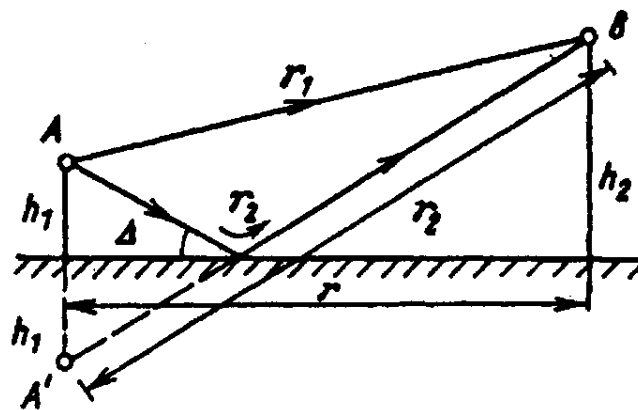


Рисунок 3.3 - Поле в освещенной зоне

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:

$$E_{0\max IP} = E_{0\max OTP} = E_{0\max} = \frac{\sqrt{60P_1'G_1}}{r}. \quad (3.3)$$

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:

$$\bar{E}_{ЗМ} = E_{0\max} \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} r_1\right] \cdot \left[1 + R \cdot \exp\left\{-j \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)(r_2 - r_1) - \theta\right]\right\}\right] \quad (3.4)$$

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:

$$\tilde{V} = 1 + R \cdot \exp\left\{-j \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\Delta r - \theta\right]\right\} = V \exp(-j\varphi_V), \quad (3.5)$$

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

Модуль множителя ослабления из (3.5):

$$V = \sqrt{1 + R^2 + 2R \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} \Delta r - \theta\right]}. \quad (3.6)$$

Фаза множителя ослабления:

$$\varphi_V = \arctg \frac{R \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda} \Delta r - \theta\right]}{1 + R \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} \Delta r - \theta\right]}. \quad (3.7)$$

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 :

$$\Delta r = r_2 - r_1 = \frac{2h_1h_2}{r}. \quad (3.8)$$

Подставляя (3.8) в (3.6), находим:

$$V = \sqrt{1 + R^2 + 2R \cos \left[\frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r} - \theta \right]}. \quad (3.9)$$

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):

$$\frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r_m} - \theta = 2m\pi, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (3.10)$$

В этих точках модуль множителя ослабления достигает максимальной величины:

$$V_{\max} = 1 + R_m, \quad (3.11)$$

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):

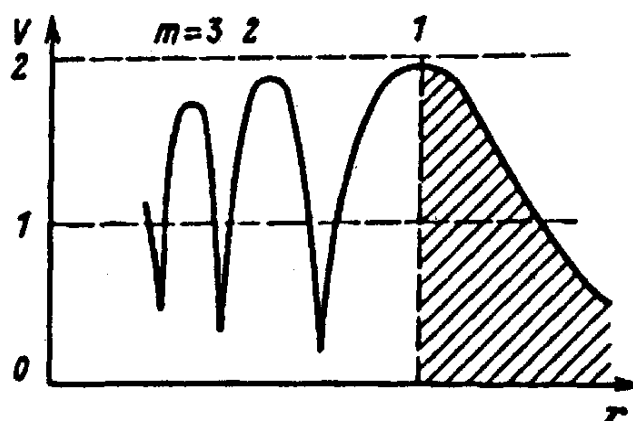
$$\frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r_n} - \theta = (2m + 1)\pi, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (3.12)$$

В точках интерференционных минимумов модуль множителя ослабления уменьшается до величины:

$$V_{\min} = 1 - R_n, \quad (3.13)$$

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 радиоприемах, работающих в пределах освещенной зоны, пункт приема обычно располагают вблизи первого интерференционного максимума.

3.2.1 Интерференционный множитель с учетом сферичности Земли

В рамках отражательной трактовки, когда влияние Земли сводят к интерференции в точке приема 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 – $R_{\text{сф}}$, который определяется через приведенные высоты h'_1, h'_2 и длину радиоприема r .

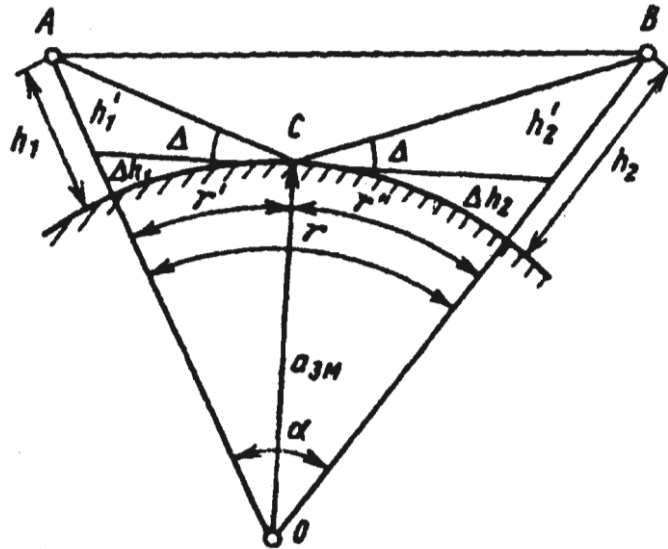


Рисунок 3.5. Определение «приведенных» высот - h'_1 и h'_2

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:

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

3.3 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.

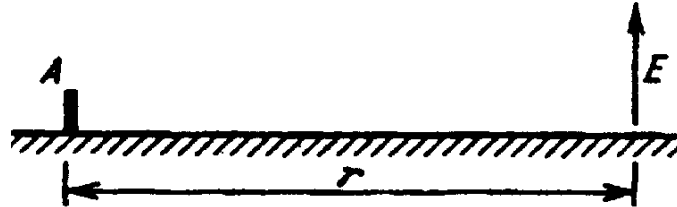


Рисунок 3.6 - Антенны на высоте $h \ll \lambda$

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:

$$E_{ЗМ Д} = E_{\infty Д} V_{ЗМ}(\rho), \quad (3.14)$$

где $E_{\infty Д}$ – действующее значение напряженности поля над идеально проводящей плоскостью; $V_{ЗМ}(\rho)$ – 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):

$$\rho \approx \frac{\pi r}{\lambda \sqrt{\epsilon_{ЗМ}^2 + (60\lambda\sigma_{ЗМ}^2)}}. \quad (3.15)$$

Здесь $\epsilon_{ЗМ}$ и $\sigma_{ЗМ}$ 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. $E_{\infty Д} = \sqrt{2} E_{0 Д}$ или с учетом (2.4):

$$E_{0Д} = \frac{\sqrt{60 \cdot P_1' \cdot G_1}}{r}. \quad (3.16)$$

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.

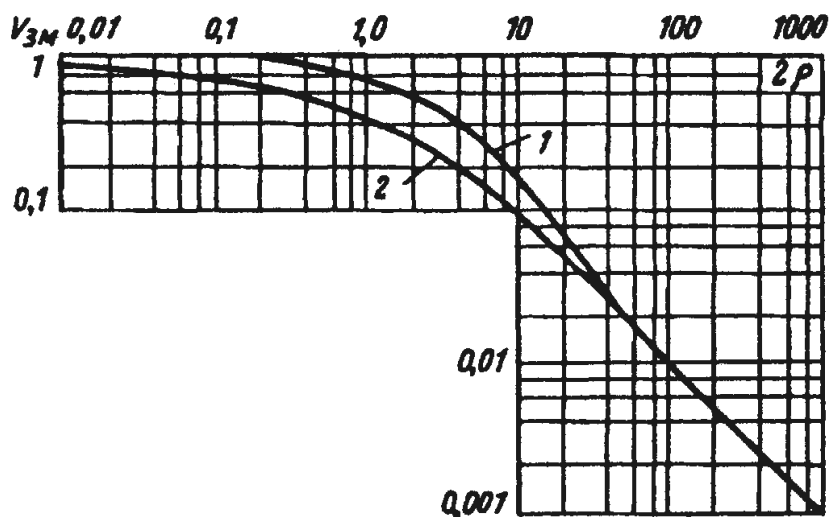


Рисунок 3.7 - Зависимость модуля $V_{ЗМ}$ от ρ

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 $1/r$.

3.4 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.

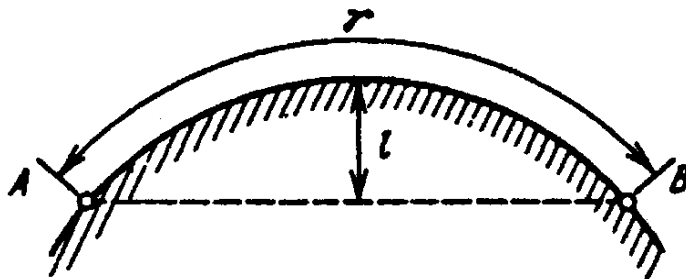


Рисунок 3.8 - Сферическое препятствие

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.

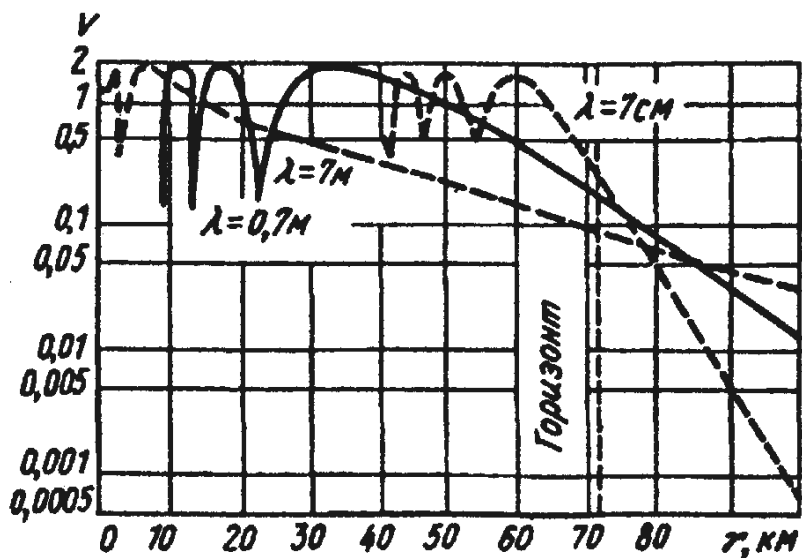


Рисунок 3.9 - Зависимости ослабления от r , км

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.

4 РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ [1,2]

4.1 Электрические свойства тропосферы и ионосферы

4.1.1 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 концентрация 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.

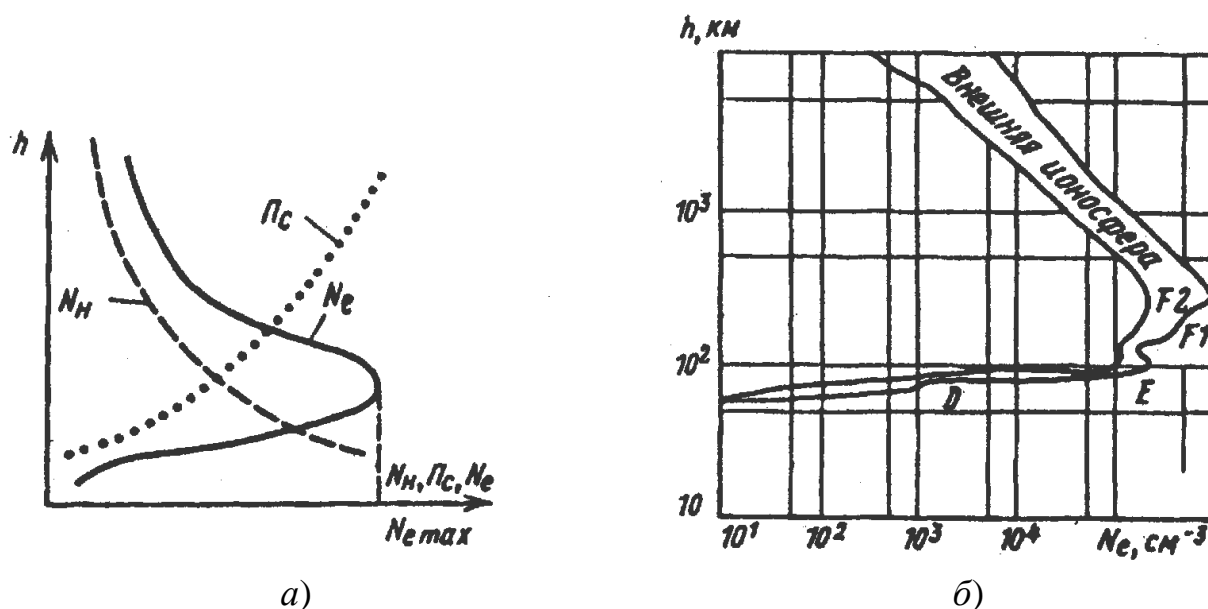


Рисунок 4.1 - Строение ионосферы

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 $\nu_{\text{ЭФ}}$. Значение $\nu_{\text{ЭФ}}$ зависит в основном от расстояния между частицами и скорости их движения. С увеличением высоты над земной поверхностью $\nu_{\text{ЭФ}}$ уменьшается.

4.1.2 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:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{II} &= 1 - \frac{e^2}{m_e \varepsilon_0} \frac{N_e \nu_{\text{ЭФ}}}{\nu_{\text{ЭФ}}^2 + \omega^2}, \\ \sigma_{II} &= \frac{e^2}{m_e} \frac{N_e \nu_{\text{ЭФ}}}{\nu_{\text{ЭФ}}^2 + \omega^2}.\end{aligned}\tag{4.1}$$

После подстановки постоянных значений e , m_e и ε_0 :

$$\varepsilon_{II} = 1 - \frac{3190N_e}{v_{\Delta\Phi}^2 + \omega^2},$$

$$\sigma_{II} = 2.82 \cdot 10^{-8} \frac{N_e v_{\Delta\Phi}}{v_{\Delta\Phi}^2 + \omega^2}.$$

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

$$\varepsilon_{II} = 1 - \frac{80.8N_e}{f^2},$$

$$\sigma_{II} = 7.17 \cdot 10^{-10} \frac{N_e v_{\Delta\Phi}}{f^2}, \quad (4.2)$$

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

Учитывая, что максимальное значение $v_{\Delta\Phi}$, наблюдается в слое D ионосферы и имеет порядок 10^7 1/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 ($\varepsilon_{II} < 1$) 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:

$$\omega_e = \frac{e^2 N_e}{m_e \varepsilon_0}. \quad (4.3)$$

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.

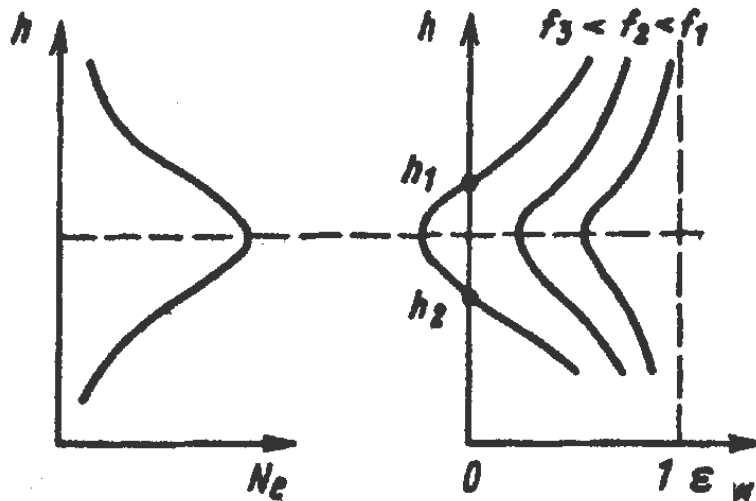


Рисунок 4.2 - Изменение N_e и ϵ_{II} по высоте

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 гиромагнитной частотой.

Учитывая, что в средних широтах $H_{3M} \approx 40$ А/м, гиромагнитная 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 \overline{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 ионосферные 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, начи-

нают двигаться по спиральям 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 основном 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.

4.1.3 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:

$$\varepsilon_T(h) = 1 + \Delta\varepsilon_0 \exp\left(\frac{g_T h}{\Delta\varepsilon_0}\right), \quad (4.4)$$

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

$$g_T = \frac{d\varepsilon_T}{dh}. \quad (4.5)$$

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:

$$\varepsilon_T(h) = 1 + 5.78 \cdot 10^{-8} \cdot \exp(-1.36 \cdot 10^{-4}h), \quad (4.6)$$

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

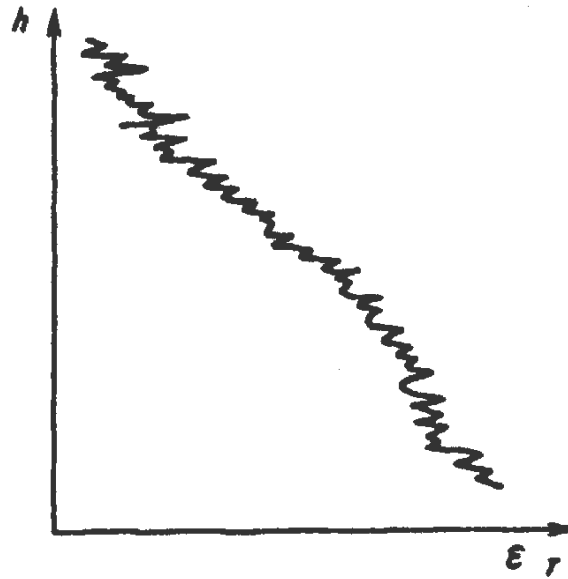


Рисунок 4.3 - Типичное распределение ϵ_T по высоте h

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.

4.2 Преломление радиоволн

4.2.1 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 :

$$c_{GP} = \frac{c_0}{n(h, \omega)_{\omega=\omega_0} + \omega_0 \left(\frac{dn(h, \omega)}{d\omega_{\omega=\omega_0}} \right)}, \quad (4.7)$$

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.

4.2.2 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.

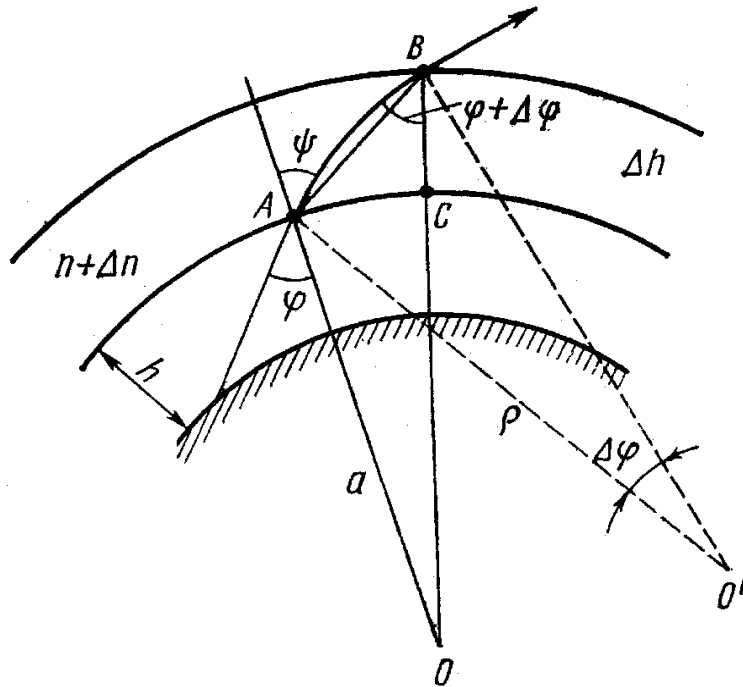


Рисунок 4.4 - Траектория одного луча

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

$$n \cdot \sin \varphi = (n + \Delta n) \cdot \sin \psi. \quad (4.8)$$

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:

$$n \cdot \sin \varphi \cdot (a + h) = (n + \Delta n) \cdot \sin(\varphi + \Delta\varphi) \cdot (a + h + \Delta h). \quad (4.9)$$

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:

$$AB = \frac{\Delta h}{\cos(\varphi + \Delta\varphi)} \approx \frac{\Delta h}{\cos \varphi}. \quad (4.10)$$

Тогда:

$$\rho \approx \frac{\Delta h}{\cos \varphi \cdot \Delta\varphi}. \quad (4.11)$$

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:

$$\rho = \frac{n}{\sin \varphi \cdot \left(-\frac{dn}{dh}\right)}. \quad (4.12)$$

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:

$$\rho = -\frac{1}{\frac{dn}{dh}} = -\frac{10^6}{\frac{dN}{dh}} \text{ [м]}. \quad (4.13)$$

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 $a_э$. 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 $a_э$ (рисунок 4.5, б).

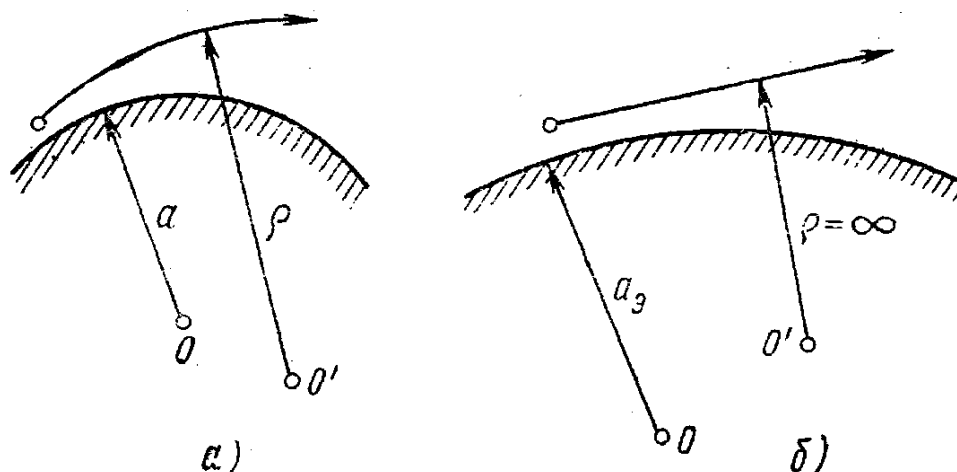


Рисунок 4.5 - Эквивалентный радиус Земли $a_э$

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:

$$\frac{1}{\infty} - \frac{1}{a_э} = \frac{1}{\rho} - \frac{1}{a},$$

откуда:

$$a_{\text{Э}} = \frac{\rho a}{\rho - a} = \frac{a}{1 - \frac{a}{\rho}}. \quad (4.14)$$

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

$$a_{\text{Э}} = \frac{a}{1 + a \frac{dN}{dh} \cdot 10^{-6}}. \quad (4.15)$$

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:

$$k = \frac{a_{\text{Э}}}{a} = \frac{1}{1 - \frac{a}{\rho}}. \quad (4.16)$$

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 $\varepsilon_{\text{T}}(h)$ 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 $g_{\text{T}} > 0$ 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 $g_T = 0$.

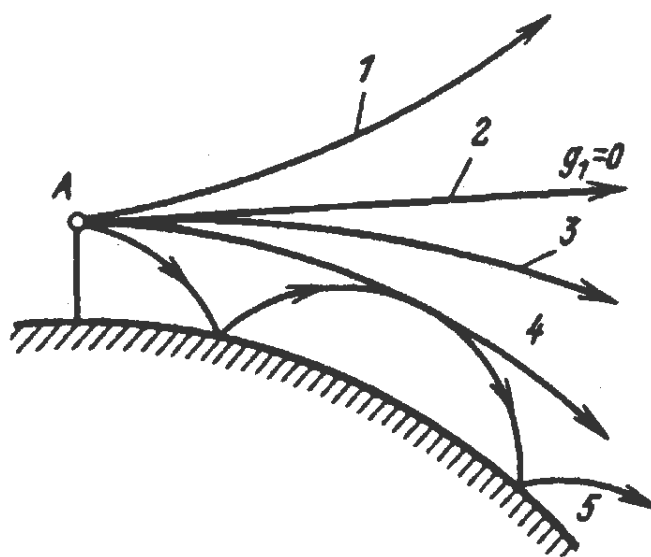


Рисунок 4.6 - Виды рефракции

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.

4.2.3 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 ϵ_{II} 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 $\epsilon_{II}(h)$ 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*.

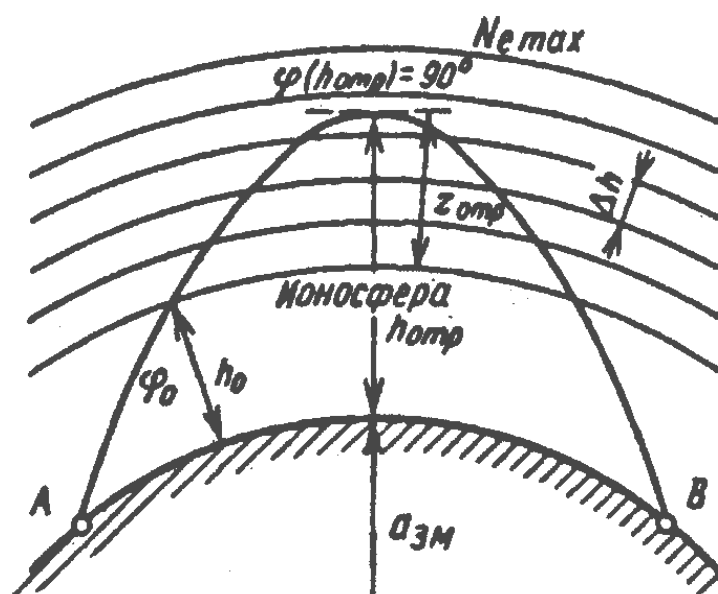


Рисунок 4.7 - Отражение от ионосферы

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

$$n_{II}(h_{OTP}) = \sin \varphi_0(h_0). \quad (4.17)$$

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

$$N_e(h_{OTP}) = \frac{f^2 \cos^2 \varphi_0}{80.8}. \quad (4.18)$$

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:

$$\rho(h_{\text{OTP}}) < (a_3 + h_{\text{OTP}}). \quad (4.19)$$

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:

$$N_e(h_{\text{OTP}}) = \frac{f_B^2}{80.8}, \quad (4.20)$$

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:

$$f \leq \frac{\sqrt{80.8 N_e(h_{\text{OTP}})}}{\cos \varphi_0}. \quad (4.21)$$

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):

$$f_{\text{max}} = \frac{\sqrt{80.8 N_{e \text{ max}}}}{\cos \varphi_{0 \text{ max}}}. \quad (4.22)$$

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).

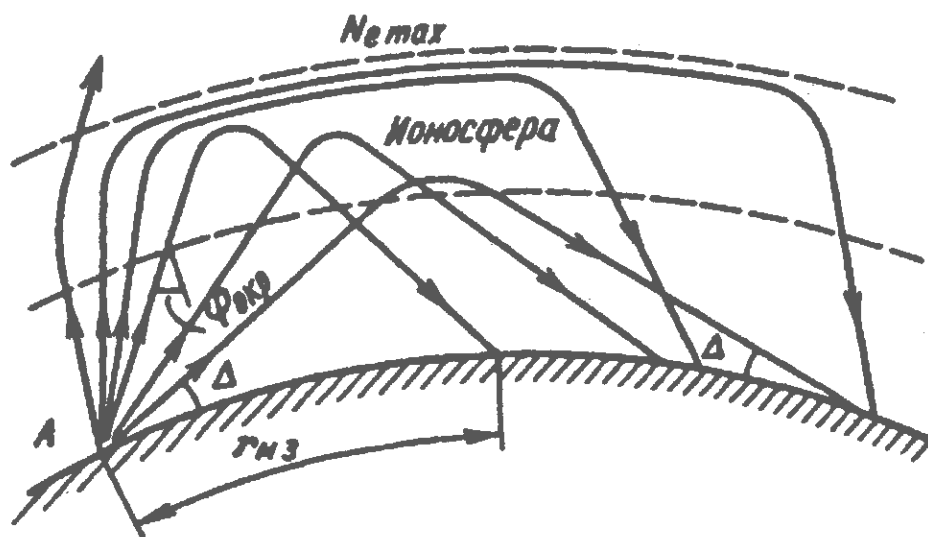


Рисунок 4.8 - Внешний радиус мертвой зоны $r_{МЗ}$

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.

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

5.1 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:

$$E_D = \left(\frac{300}{r} \right) \sqrt{G_1 P_1'} \sqrt{\theta \sin \theta} \exp \left(-0.0014 \frac{r}{\lambda^{0.6}} \right), \quad (5.1)$$

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.

5.2 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 радиолинии, 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 радиолиний соответствует применению земной волны.

5.3 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. С одной стороны высокие частоты ограничивают диапазон радиочастот соответствующим прекращению поворота ионосферной волны к Земле. Соответствующая частота называется максимально применимой частотой – МПЧ ($f_{МПЧ}$):

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

где $f_{ПД}$ – 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).

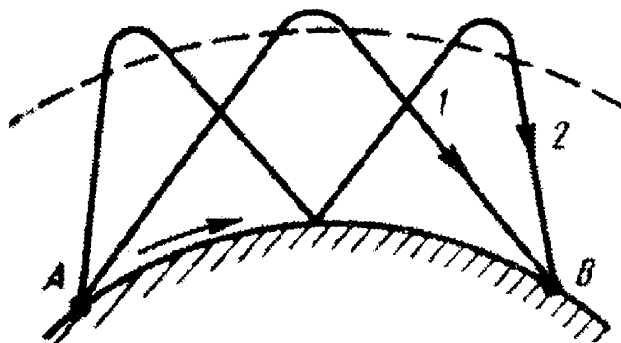


Рисунок 5.1 - Многократные отражения от ионосферы и Земли

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 :

$$\operatorname{tg}\varphi_0 = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\left[1 + \frac{h_{Д}}{a_{ЗМ}} - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right], \quad (5.2)$$

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.

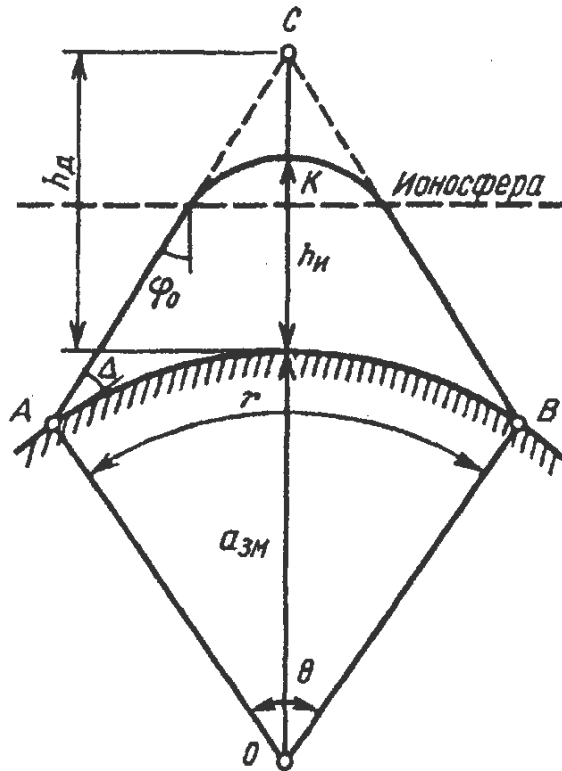


Рисунок 5.2 – Взаимосвязь «угол θ - дуга r »

Угол наклона траектории Δ связан с углом падения φ_0 соотношением:

$$\Delta = \frac{\pi}{2} - \varphi_0 - \frac{\theta}{2}. \quad (5.3)$$

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 малоэффективны 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 5.1

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.

5.4 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:

$$E_D = \frac{\sqrt{30G_1P_1'}}{r} \cdot 2 \sin \left[\frac{2\pi h'_{1Э} h'_{2Э}}{\lambda r} \right]. \quad (5.4)$$

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 $R \geq \frac{18 h'_{1Э} h'_{2Э}}{\lambda}$ формула для расчета напряженности поля приобретает вид:

$$E_D = \frac{\sqrt{30G_1 P_1'}}{r^2} \cdot \frac{4\pi h'_{1\varepsilon} h'_{2\varepsilon}}{\lambda}. \quad (5.5)$$

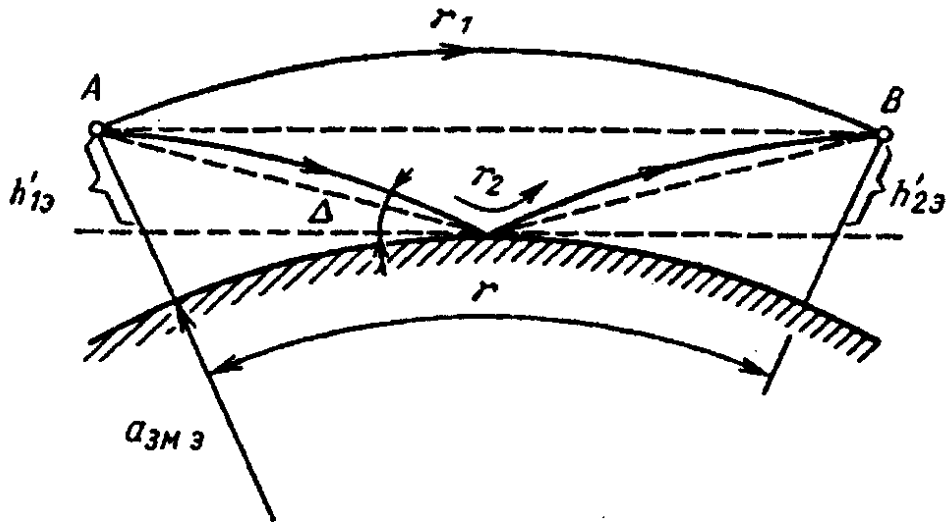


Рисунок 5.3

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:

$$\Delta h > \frac{\lambda}{8 \sin \Delta} \quad (5.6)$$

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

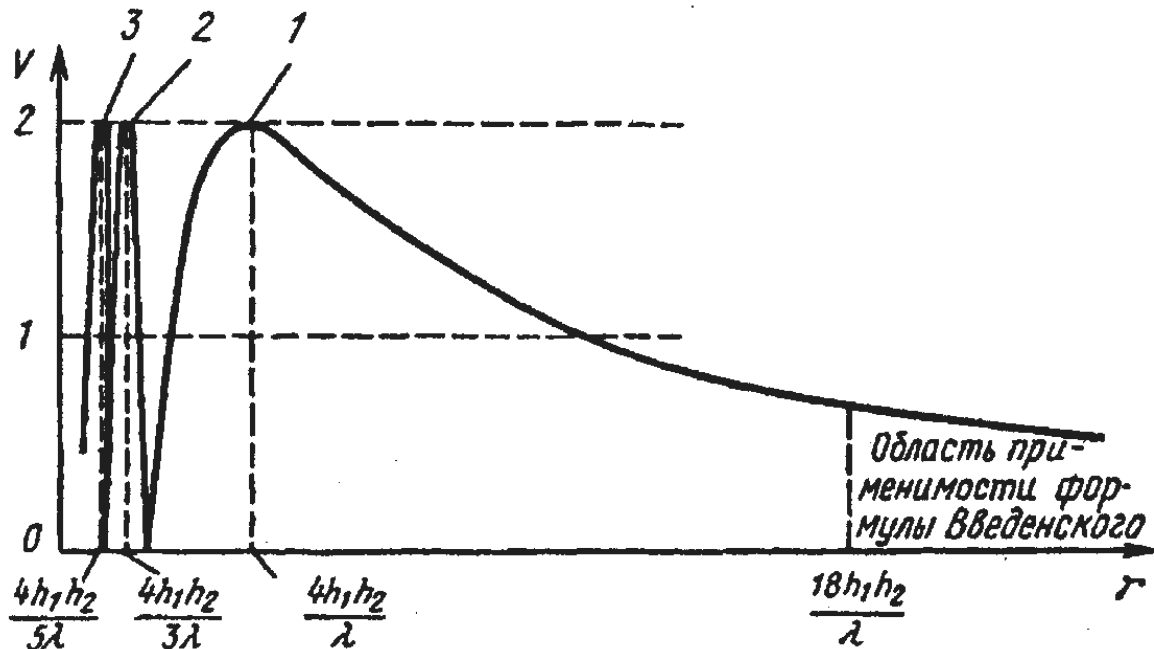


Рисунок 5.4 - Зависимость множителя ослабления от расстояния

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.

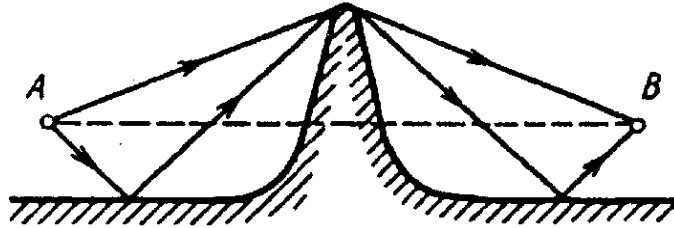


Рисунок 5.5 - Эффект усиления за счет препятствия

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.

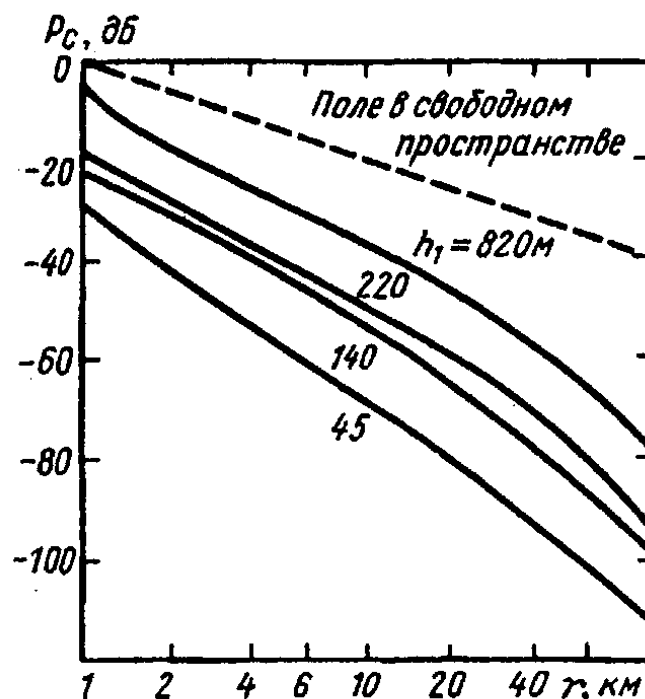


Рисунок 5.6 - Зависимость мощности сигнала P_C от расстояния r на частоте $f = 922$ МГц

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.

5.5 Распространение ультракоротких волн на космических радиоперелиниях

5.5.1 Особенности спутниковой связи

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

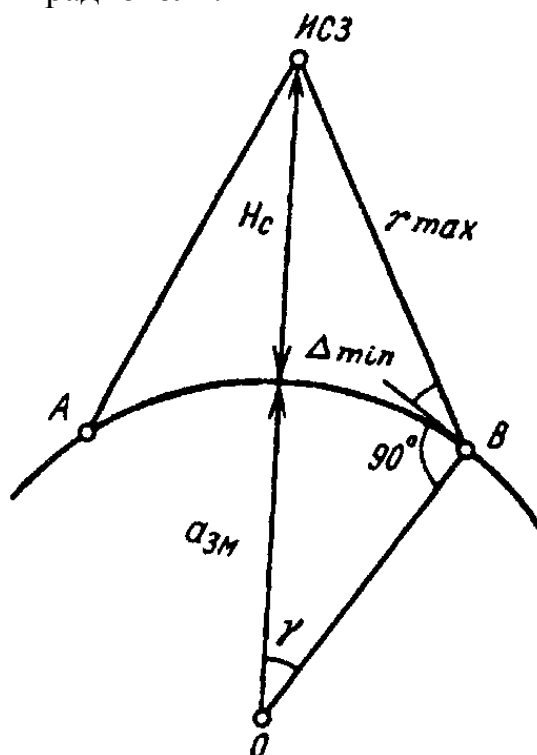


Рисунок 5.7 - Схема радиоперелинии «Земля - ИСЗ – Земля»

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.

5.5.2 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:

$$r_{\max} = \sqrt{H^2 + a_{3M}^2 - 2a_{3M}H \cos \gamma}, \quad (5.7)$$

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:

$$\Psi_{\Phi \max} = \frac{2.32 \cdot 10^{19}}{f^2 \sqrt{1 - 0.9 \cos^2 \Delta}}, \quad (5.8)$$

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:

$$L_{\Phi} = \frac{P(\Psi = 0)}{P(\Psi \neq 0)} = \frac{1}{\cos^2 \Psi_{\Phi}} \quad (5.9)$$

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.

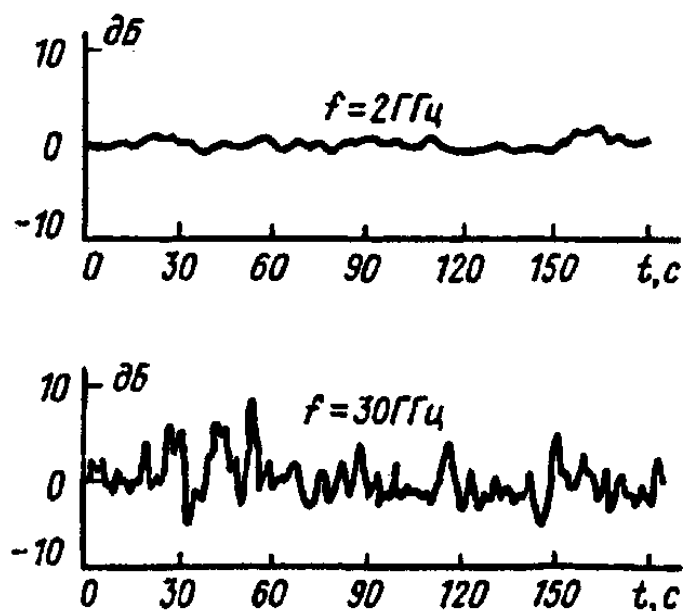


Рисунок 5.8 - Тропосферные мерцания

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.

5.5.3 Энергетические соотношения на космических радиолиниях

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:

$$P_{1\text{ЗМ}} = P_{2\text{Б}} + L_1 - \eta_{1\text{ЗМ}} - \eta_{1\text{Б}}, \quad (5.10)$$

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.

5.6 Особенности распространения волн оптического диапазона

5.6.1 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.

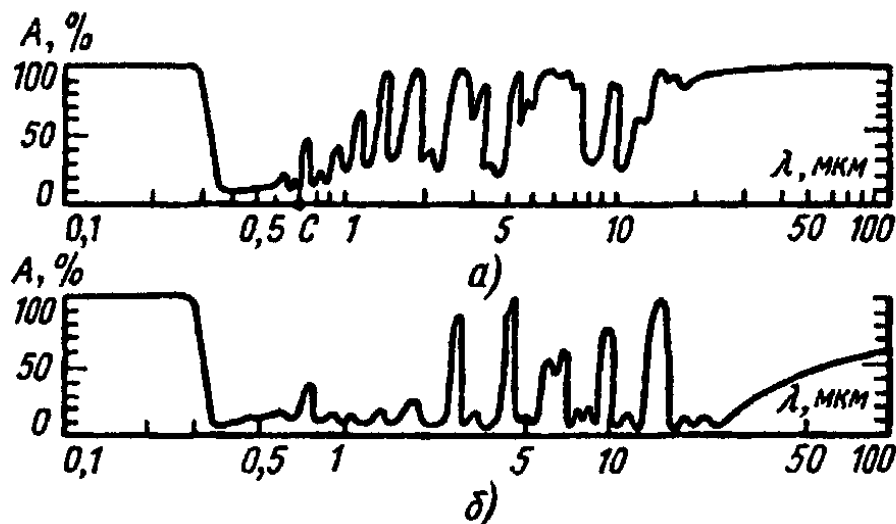
Волны оптического диапазона могут распространяться только как земные и прямые. В атмосфере с плавно меняющимися параметрами возникает рефракция волн оптического диапазона. Радиус кривизны траектории вследствие меньшего влияния на столь высоких частотах молекул водяного пара при нормальной атмосферной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

5.6.2 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 напряженности 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 Рэлея, 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.

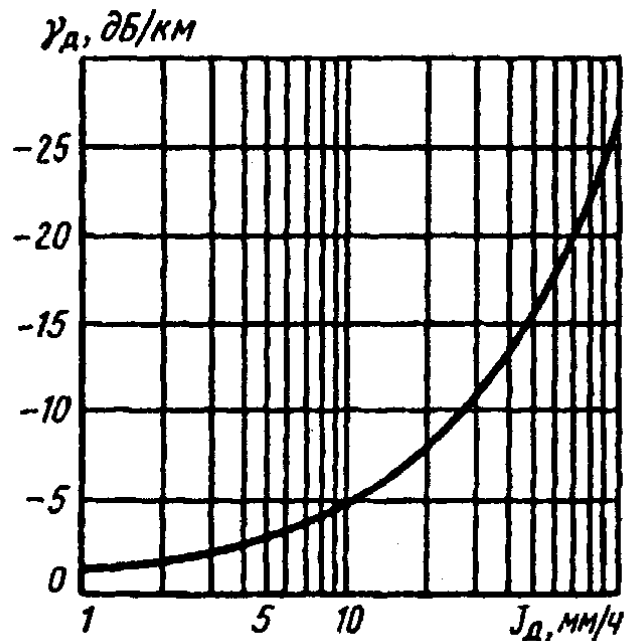


Рисунок 5.10 - Зависимость коэффициента ослабления от интенсивности осадков $\gamma_D \approx -0.9J_D^{0.74}$

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».

5.6.3 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.

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.