

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

Северо-Западный государственный заочный технический университет

**Л.Я. Родос**

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И  
РАСПРОСТРАНЕНИЕ  
РАДИОВОЛН**  
(распространение радиоволн)

Учебно-методический комплекс  
Учебное пособие

Санкт-Петербург  
Издательство СЗТУ  
2007

УДК.621.371

Родос, Л.Я. Электродинамика и распространение радиоволн (распространение радиоволн): учеб.-метод. комплекс (учебное пособие) / Л.Я. Родос. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007. – 90 с. 40 илл., 7 библ.

Пособие соответствует Государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования, утвержденному в 2000-м году, и предназначено для студентов третьего курса специальности 210302.65 – радиотехника.

В пособии рассмотрены общие вопросы распространения радиоволн на естественных трассах, изучается влияние Земли и ее атмосферы на распространение радиоволн различных диапазонов.

Основное внимание уделено физике процессов, происходящих при распространении радиоволн.

Рецензенты: кафедра радиотехники СЗТУ (зав. каф. Худяков Г.И., д-р техн. наук, проф.); Калашников В.С., д-р техн. наук, проф. ГУАП; Гулюшин В.Л., канд. техн. наук, директор СПКБ «ИК – Энергия».

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее пособие предназначено для студентов третьего курса специальности 210302 – радиотехника института радиоэлектроники СЗТУ, изучающих дисциплину «Электродинамика и распространение радиоволн». В нем освещаются вопросы распространения радиоволн – второй (прикладной) части указанного курса. Содержание пособия соответствует Государственному образовательному стандарту 2000-го года. Основное внимание уделено физике распространения радиоволн на естественных трассах: вблизи поверхности Земли, в ее атмосфере, в космосе. Математические представления рассматриваемых явлений использованы в той лишь мере, в которой они необходимы для понимания и оценки физических процессов.

Для определения степени усвоения студентом изучаемого материала (самоконтроля) в конце каждого раздела приводятся контрольные вопросы. Умение правильно отвечать на поставленные вопросы в значительной степени гарантирует студенту приобретение базовых знаний в области распространения радиоволн и получение положительной оценки на экзамене.

При изучении данной дисциплины следует иметь в виду, что решение конкретных практических задач по распространению радиоволн в реальных условиях является исключительно сложной, многопараметрической задачей и ее строгое представление возможно лишь в очень ограниченном числе случаев. Поэтому основной целью настоящего пособия является изучение общих закономерностей распространения радиоволн, выработка у студента навыков построения моделей рассматриваемых явлений и выполнения оценочных расчетов.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время имеется большое количество учебных пособий и монографий по распространению радиоволн. В них с той либо иной степенью строгости даются подробные математические описания рассматриваемых физических процессов. Как правило, эти выкладки достаточно сложны и для неспециалистов их изучение представляет значительные трудности. Как показывает многолетний опыт работы, для общего знакомства с проблемами распространения радиоволн большой объем математических выводов существенно усложняет восприятие изучаемого материала. Поэтому в данном пособии предпринимается попытка дать общую физическую картину распространения радиоволн. Для более детального знакомства с математическими аспектами рассматриваемых процессов и явлений в тексте пособия делаются отсылки к специальной литературе.

## **1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

### **1.1 КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОВОЛН ПО ДИАПАЗОНАМ И СПОСОБУ РАСПРОСТРАНЕНИЯ**

Радиоволнами принято называть электромагнитные колебания (волны), лежащие в диапазоне частот  $10^{-3}$  -  $10^{15}$  Гц. В указанных пределах диапазон радиоволн начали рассматривать сравнительно недавно – во второй половине прошлого века, когда были созданы оптические квантовые генераторы и обнаружены магнитогидродинамические волны в ионосфере. В технических приложениях весь спектр радиоволн разбивается на ряд поддиапазонов. В основу этого разбиения положен десятичный принцип (см. табл. 1.1). В этой же таблице представлены использующиеся в настоящее время названия соответствующих поддиапазонов радиоволн и наиболее типичные способы их распространения на естественных трассах [ 1 ].

При этом следует иметь в виду, что земными, или поверхностными радиоволнами называют радиоволны, распространяющиеся вдоль поверхности Земли в непосредственной близости от нее (в масштабе длины волны). Ионосферными, или пространственными, называют радиоволны, распространяющиеся на большие расстояния, даже превышающие окружность земного шара за счет отражений от ионосферы либо ионизированных следов метеоров. Тропосферными радиоволнами называют волны, распространяющиеся на значительные расстояния (несколько сотен километров) за счет рассеяния в тропосфере и направляющего действия тропосферных волноводов; прямыми принято называть радиоволны, распространяющиеся в однородной (слабонеоднородной) среде по прямолинейным, либо близким к ним траекториям, непосредственно между корреспондентами.

Из таблицы можно видеть, что радиоволны различных диапазонов могут распространяться одним и тем же способом, поэтому зачастую представляет определенные трудности выбор адекватного рассматриваемой задаче механизма. В связи с этим можно привести некоторые общие правила:

- на малых расстояниях между корреспондентами радиоволны всех диапазонов распространяются как земные либо как прямые;
- тропосфера оказывает существенное влияние только на распространение волн, длина которых меньше десяти метров, поэтому они распространяются как тропосферные;
- волны, длина которых превышает десять метров, распространяются как ионосферные;
- как прямые могут распространяться радиоволны короче десяти метров.

Естественно, эти правила в некоторой степени условны, поэтому построение той или иной модели распространения в каждом конкретном случае является компромиссным и должно опираться на опыт, эмпирические данные, оценочные расчеты, интуицию исследователя.

*Т а б л и ц а 1.1*

**Классификация радиоволн по диапазонам и способу распространения**

Диапазон	Частота $f$ , Гц	Длина волны $\lambda$ , м	Преимущественный механизм (способ) распространения
Инфразвуковые и звуковые радиоволны	$3 \times 10^{-3} - 3 \times 10^3$	$10^{11} - 10^5$	Земные волны (поверхностные)
Сверхдлинные радиоволны (СДВ)	$3 \times 10^3 - 3 \times 10^4$	$10^5 - 10^4$	Земные волны (поверхностные)
Длинные радиоволны (ДВ)	$3 \times 10^4 - 3 \times 10^5$	$10^4 - 10^3$	Земные волны (поверхностные)
Средние радиоволны (СВ)	$3 \times 10^5 - 3 \times 10^6$	$10^3 - 10^2$	Земные волны (поверхностные), ионосферные волны (пространственные)

Диапазон	Частота $f$ , Гц	Длина волны $\lambda$ , м	Преимущественный механизм (способ) распространения
Короткие радиоволны (КВ)	$3 \times 10^6 - 3 \times 10^7$	$10^2 - 10$	Ионосферные волны (пространственные)
Ультракороткие радиоволны (УКВ):	$3 \times 10^7 - 3 \times 10^{11}$	$10 - 10^{-3}$	Тропосферные волны, прямые волны, пространственные (в мв диапазоне)
метровые радиоволны (МВ);	$3 \times 10^7 - 3 \times 10^8$	$10 - 1$	
дециметровые радиоволны (ДМВ);	$3 \times 10^8 - 3 \times 10^9$	$1 - 10^{-1}$	
сантиметровые радиоволны (СМВ);	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{10}$	$10^{-1} - 10^{-2}$	
миллиметровые радиоволны (ММВ);	$3 \times 10^{10} - 3 \times 10^{11}$	$10^{-2} - 10^{-3}$	
Оптические радиоволны: инфракрасные (ИК); видимый свет; ультрафиолетовые (УФ)	$3 \times 10^{11} - 3 \times 10^{15}$ $3 \times 10^{11} - 4 \times 10^{14}$ $4 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$ $7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{15}$	$10^{-3} - 10^{-7}$ $10^{-3} - 7.5 \times 10^{-7}$ $7.5 \times 10^{-7} - 4 \times 10^{-7}$ $4 \times 10^{-7} - 10^{-7}$	Прямые волны

Радиоволны перечисленных выше диапазонов используются практически во всех сферах человеческой деятельности. Сюда можно отнести радиовещание и телевидение, научные исследования, передачу информации, обнаружение различных объектов в пространстве, управление различными объектами на расстоянии, обеспечение мер охраны и противопожарной безопасности, решение задач навигации и многие другие применения...

Несмотря на многообразие конкретных построений технических систем и особенностей различных диапазонов, существуют общие закономерности распространения радиоволн. Они сводятся к тому, что в любой системе имеется в наличии так называемая линия радиосвязи или радиолиния. В каждой радиолинии можно выделить три обязательно присутствующих элемента: передатчик, приемник и среда, в которой происходит распространение радиоволн.

На практике в зависимости от того, каким образом полезная информация накладывается на распространяющиеся по линии радиосвязи электромагнитные колебания, принято рассматривать радиолинии двух типов: первичные и вторичные.

К первичным радиолиниям относят такие, в которых передаваемая информация «закладывается» на передающем конце линии – в передатчике. Примером таких радиолиний могут служить телевизионные и радиовещательные станции, системы радиоуправления, системы связи с

космическими объектами, системы телекоммуникаций и многие другие... Иными словами, на первичных радиоприемах сигнал передатчика несет определенную информацию и, распространяясь в среде, попадает в приемник либо непосредственно, либо путем ретрансляции с помощью естественных либо искусственных ретрансляторов.

К вторичным радиоприемам принято относить такие, в которых информация приобретается в процессе распространения радиоволн в среде и их взаимодействия с искусственными либо естественными объектами, находящимися в пространстве. Примером подобной радиоприема может служить радиолокационная система. Полезная информация в такой радиоприеме появляется только при рассеянии или отражении излученной передатчиком электромагнитной волны от облучаемого объекта.

Заканчивая данный раздел, следует обратить внимание на то, что, несмотря на большое разнообразие практических задач, связанных с распространением радиоволн на естественных трассах, все они могут быть сведены к двум обобщенным типам.

Первый тип задач может быть сформулирован следующим образом: по заданным значениям параметров передатчика (частота излучаемых электромагнитных волн, мощность излучения, вид модуляции, высота расположения антенны) и известным параметрам среды, в которой происходит распространение радиоволн, необходимо найти значение напряженности поля или плотности потока мощности на заданном расстоянии в месте приема.

Второй тип представляет собой обратную задачу: при известных параметрах среды на трассе распространения (расстояние, характер и электрические свойства подстилающей поверхности, радиофизические свойства атмосферы) определить параметры передатчика, обеспечивающие минимальные искажения передаваемой информации и необходимый уровень сигнала.

## 1.2 ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Под свободным пространством в курсе «Электродинамика и распространение радиоволн» принято понимать однородную, безграничную, непоглощающую среду, относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости которой равны единице. Строго говоря, подобных сред в природе не существует. Поэтому возникает вопрос о целесообразности рассмотрения особенностей распространения радиоволн в свободном пространстве. Однако, учитывая, что:

- в каждом конкретном случае, при определенных допущениях, реальные среды могут быть уподоблены свободному пространству;
- математические выражения, описывающие процессы распространения радиоволн в свободном пространстве, являются фундаментальными, наиболее простыми, прозрачными с физической точки зрения;

- влияние реальных условий распространения может быть учтено в этих выражениях введением соответствующих множителей;

- в свободном пространстве радиоволны всех диапазонов распространяются с постоянной скоростью, равной скорости света, по прямолинейным траекториям,

изучение особенностей распространения радиоволн в свободном пространстве является оправданным и необходимым.

Пусть в некоторой точке пространства расположен точечный источник, излучающий изотропно (во всех направлениях одинаково) электромагнитные волны. Излучаемая источником мощность равна  $P_{изл}$ . В любой точке пространства, находящейся на расстоянии  $r$  от источника, среднее значение плотности потока мощности (вектора Пойнтинга) в Вт/м<sup>2</sup> может быть представлено в виде:

$$P = \frac{P_{изл}}{4\pi r^2}. \quad (1.1)$$

С другой стороны, среднее значение вектора Пойнтинга в плоской волне (сферическую волну точечного источника на большом расстоянии от него в пределах небольшого участка волнового фронта можно считать квазиплоской) определяется выражением [ 2 ]

$$P = E_d \times H_d, \quad (1.2)$$

где  $E_d$  и  $H_d$  – действующие значения векторов напряженностей, соответственно электрического и магнитного полей излучаемой волны, связанные между собой соотношением:

$$H_d = E_d / 120 \pi. \quad (1.3)$$

Здесь знаменатель представляет собой волновое сопротивление свободного пространства.

Приравняв (1.1) и (1.2) с учетом (1.3) и выражая из полученного равенства  $E_d$ , можно записать:

$$E_d = \frac{\sqrt{30P_{изл}}}{r}. \quad (1.4)$$

Известно, что амплитудное и действующее значения напряженностей электрического поля связаны между собой, поэтому амплитуда вектора напряженности электрического поля в рассматриваемой точке в В/м равна

$$E_a = \frac{\sqrt{60P_{изл}}}{r}. \quad (1.5)$$

Фаза вектора напряженности электрического поля в точке наблюдения при этом будет равна  $\varphi = 2\pi r/\lambda$ , где  $\lambda$  - длина радиоволны. Реальные излучатели в диапазоне радиоволн (антенны) принципиально не могут создать изотропное излучение. Физически любой, даже элементарный, излучатель, обладает определенной направленностью излучения. На практике антенны специально строятся таким образом, чтобы за счет перераспределения в пространстве усиливать поток электромагнитного излучения в требуемом направлении (к примеру, в направлении корреспондента).

Это свойство антенн принято характеризовать коэффициентом направленного действия антенны –  $D$ . Коэффициент направленного действия показывает, во сколько раз напряженность поля или плотность потока мощности, излучаемой антенной в заданном направлении, больше, чем эти величины, создаваемые изотропной антенной в этом же направлении при условии, что обе антенны излучают одинаковую мощность.

Таким образом, для реальных антенн в выражении (1.1) числитель должен быть умножен на коэффициент направленного действия и выражения (1.4) и (1.5) могут быть переписаны в виде:

$$E_d = \frac{\sqrt{30P_{изл} D}}{r}, \quad (1.6)$$

$$E_a = \frac{\sqrt{60P_{изл} D}}{r}. \quad (1.7)$$

Необходимо отметить, что в формулы (1.6), (1.7) обычно подставляется максимальное значение коэффициента направленного действия, хотя в общем случае он является функцией угловых координат, в которых рассматривается поле, излучаемое антенной.

С практической точки зрения размерности величин, входящих в полученные выражения, являются не очень удобными, поэтому с использованием внесистемных единиц (1.6) и (1.7) преобразуются к виду:

$$E_d = \frac{173\sqrt{P_{изл}(\kappa Bm)D}}{r(\kappa M)}, \text{ мВ/м}; \quad (1.8)$$

$$E_a = \frac{245\sqrt{P_{изл}(\kappa Bm)D}}{r(\kappa M)}, \text{ мВ/м}. \quad (1.9)$$

Полученные уравнения можно назвать уравнениями идеальной радиосвязи, причем в виде (1.6), (1.7), (1.8), (1.9) они используются, как правило, в тех случаях, когда радиотехнические системы работают в диапазонах сверхдлинных, длинных, средних и коротких радиоволн, где применяются вибраторные антенны.

В диапазоне ультракоротких радиоволн, где используются антенны так называемого оптического типа (антенны с излучающим раскрывом) – рупорные, зеркальные, линзовые – удобнее определять не напряженность поля в точке приема, а мощность на входе приемной антенны. Для определения мощности на входе приемной антенны следует плотность потока мощности, созданную передающей антенной в месте приема, умножить на эффективную площадь раскрыва приемной антенны. Эффективная площадь раскрыва приемной антенны всегда меньше геометрической площади и выражается в  $m^2$  в виде:

$$S_{эфф} = D_{пр} \times \lambda^2 / 4\pi, \quad (1.10)$$

где  $D_{пр}$  – коэффициент направленного действия приемной антенны;  
 $\lambda$  – длина волны УКВ диапазона.

Таким образом принятая мощность в Вт равна

$$P_{\text{пр}} = \Pi_{\text{изл}} \times S_{\text{эфф}}, \quad (1.11)$$

где  $\Pi_{\text{изл}} = \frac{P_{\text{изл}} \times D_{\text{изл}}}{4\pi r^2}$  – плотность потока мощности, создаваемого реальной излучающей антенной у раскрытия приемной антенны.

Из (1.10) и (1.11) можно записать:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{изл}} \times D_{\text{изл}} \times D_{\text{пр}} \times \lambda^2}{(4\pi r)^2}. \quad (1.12)$$

### 1.3 ПОТЕРИ ПЕРЕДАЧИ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Анализ выражений (1.6) – (1.12) показывает, что, несмотря на идеальные условия распространения – свободное пространство (среда без потерь) – амплитуда вектора напряженности электрического поля убывает с расстоянием пропорционально первой степени расстояния, а плотность потока мощности – пропорционально квадрату расстояния. Это согласуется с законом сохранения энергии, отвечает принципу излучения и физически объясняется сферичностью волнового фронта распространяющихся в свободном пространстве электромагнитных волн.

В теории распространения радиоволн этот эффект принято называть потерями передачи в свободном пространстве –  $L$  и определять в виде:

$$L = \frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{изл}}}. \quad (1.13)$$

Подстановка в (1.13) выражения (1.12) позволяет записать:

$$L = \frac{D_{\text{изл}} \times D_{\text{пр}} \times \lambda^2}{(4\pi r)^2}. \quad (1.14)$$

Потери передачи удобнее выразить в логарифмическом масштабе (в децибелах) и, поскольку они определены через отношение мощностей, то

$$L_{(\text{дБ})} = 10 \lg L = D_{\text{изл}} (\text{дБ}) + D_{\text{пр}} (\text{дБ}) + 20 \lg \lambda - 20 \lg (4\pi r). \quad (1.15)$$

Необходимо заметить, что коэффициент направленного действия реальных антенн УКВ диапазона обычно также выражается в децибелах.

Оценим величину потерь передачи в свободном пространстве на расстоянии 100 км ( $10^5$  м), полагая, что в качестве антенн используются изотропные излучатели ( $D_{\text{изл}} = D_{\text{пр}} = 0$  (дБ)),  $\lambda = 1$  м. Из (1.15) следует, что потери составляют величину порядка 122 децибел. Даже если передающая и приемная антенны имеют коэффициенты направленного действия по 30 дБ каждая (это антенны с достаточно хорошим усилением), то и в этом случае потери передачи в свободном пространстве будут равны 62 дБ. В тех случаях, когда длина волны меньше одного метра, потери передачи окажутся еще большими.

#### 1.4 МНОЖИТЕЛЬ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛЯ СВОБОДНОГО ПРОСТРАНСТВА

Реальные условия распространения радиоволн обычно существенно отличаются от условий свободного пространства из-за наличия Земли и ее атмосферы и границы раздела между ними. При распространении радиоволн на реальных трассах уменьшение амплитуды вектора напряженности электрического поля, либо плотности потока мощности, происходит не только за счет сферической формы фронта волны, но и вследствие перераспределения потока электромагнитной энергии в пространстве, рассеяния и поглощения ее в атмосфере и земной коре. Фаза волны также будет определяться не только расстоянием до точки наблюдения, но и изменением скорости распространения волны в неоднородной атмосфере и вариациями фазы при отражении и рассеянии.

Для учета влияния реальной трассы на распространение радиоволн вводится понятие множителя ослабления поля свободного пространства –  $V$ . Величина множителя ослабления определяется отношением напряженности электрического поля при распространении радиоволн в реальных условиях к напряженности электрического поля на том же расстоянии, при тех же параметрах аппаратуры в свободном пространстве.

$$V = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{E}_0|} = |V| \times e^{i \text{arc} V}, \quad (1.16)$$

где  $\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля при распространении радиоволн в реальных условиях;

$\vec{E}_0$  – вектор напряженности электрического поля при распространении радиоволн в свободном пространстве;

$|V|$  – модуль множителя ослабления поля свободного пространства;

$\text{arc} V$  – фаза множителя ослабления поля свободного пространства.

Таким образом, множитель ослабления учитывает дополнительное ослабление амплитуды и изменение фазы радиоволны по отношению к свободному пространству.

После введения множителя ослабления поля свободного пространства величину напряженности электрического поля в точке приема на реальной трассе можно записать в виде произведения:

$$|\vec{E}| = |\vec{E}_0| \times V = |\vec{E}_0| \times |V| \times e^{i\varphi + i \text{arc} V}, \quad (1.17)$$

где  $|\vec{E}_0|$  – действующее (1.4), либо амплитудное (1.5) значение напряженности электрического поля при распространении в свободном пространстве;

$\varphi$  – фаза волны при распространении в свободном пространстве.

Аналогичным образом выражение для мощности сигнала на входе приемной антенны (1.12) принимает вид:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{усл}} D_{\text{усл}} D_{\text{пр}} \lambda^2}{(4\pi r)^2} \times |V|^2. \quad (1.18)$$

В большинстве случаев на реальных трассах значение модуля множителя ослабления меньше единицы, однако, на расстояниях прямой видимости при отражении радиоволн от хорошо проводящей подстилающей поверхности, за счет интерференции  $|V|$  может превышать единицу и даже принимать значение, теоретически равное двум.

Величина множителя ослабления может быть определена как теоретически – при известных свойствах трассы и параметрах аппаратуры, так и экспериментально – путем измерения мощности на входе приемной антенны. В этом случае:

$$|V| = \frac{4\pi r \sqrt{P_{np}}}{\lambda \sqrt{P_{изл} D_{изл} D_{np}}} . \quad (1.19)$$

### 1.5 ОБЛАСТЬ ПРОСТРАНСТВА, СУЩЕСТВЕННАЯ ДЛЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

Изучение особенностей распространения радиоволн в свободном пространстве (в однородном безграничном пространстве) предполагает необходимость определения той области, через которую происходит обмен (передача) энергией между передатчиком и приемником (между корреспондентами). Из физических представлений очевидно, что даже в идеализированном случае безграничного однородного пространства, в котором располагаются корреспонденты, все пространство в одинаковой степени не может участвовать в процессе передачи энергии. С другой стороны, когда речь идет о распространении радиоволн на реальных трассах при наличии границ раздела сред с различными радиофизическими параметрами, а также препятствий и неоднородностей, знание размеров и расположения этой области является необходимым для грамотного проектирования и построения радиолинии.

Решение задачи о форме и размерах области пространства, эффективно участвующей в передаче энергии, может быть получено с использованием принципа Гюйгенса и представлений о зонах Френеля [3]. В соответствии с принципом Гюйгенса, каждая точка сферического волнового фронта, созданного источником излучения на расстоянии « $r$ » от него, может рассматриваться как фиктивный вторичный источник сферической волны, амплитуда и фаза излучения которого определяется множителем сферической волны –  $e^{-ikr}/r$ . Здесь  $\kappa = 2\pi/\lambda$  – волновое число (фазовая постоянная или постоянная распространения).

С использованием принципа Гюйгенса процесс передачи электромагнитной энергии от передатчика к приемнику может быть представлен следующим образом: в пространстве между корреспондентами рассматривается участок волнового фронта, созданного передающей антенной, в качестве места расположения фиктивных вторичных (гюйгенсовских) источников, причем, чем больше расстояние « $r$ », тем меньше кривизна этого участка. Сечение волнового фронта плоскостью листа показано на (рис. 1.1).

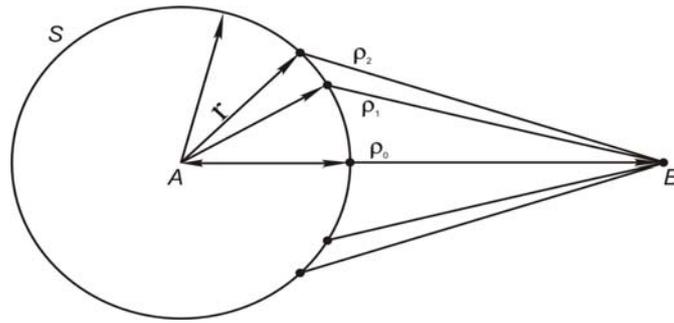


Рис. 1.1. Построение зон Френеля на поверхности волнового фронта

Поле в месте приема теперь можно рассматривать как суперпозицию полей излучения фиктивных источников с учетом их амплитуды и фазы, которые зависят от удаления « $\rho$ » каждого из них до точки наблюдения.

Для более наглядного представления процесса формирования поля в точке наблюдения оказывается удобным (в соответствии с идеями Френеля) рассматривать волновой фронт в виде ряда областей, границы которых характеризуются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
 (r + \rho_1) - (r + \rho_0) &= \frac{\lambda}{2}; \\
 (r + \rho_2) - (r + \rho_0) &= 2\frac{\lambda}{2}; \\
 \dots\dots\dots & \\
 (r + \rho_n) - (r + \rho_0) &= n\frac{\lambda}{2}.
 \end{aligned}
 \tag{1.20}$$

Подобное разбиение приводит к тому, что весь волновой фронт представляется состоящим из кольцевых (кроме первой, центральной) зон, носящих название зон Френеля.

Применительно к рассматриваемой задаче эти зоны характеризуются тем, что все фиктивные вторичные источники, расположенные в пределах каждой, создают в точке наблюдения колебания, отличающиеся по фазе не более чем на  $180^\circ$ . При этом следует иметь в виду, что фазы колебаний, созданных источниками, расположенными в соседних зонах, отличаются (в интегральном смысле) ровно на  $180^\circ$ , а амплитуды колебаний убывают с увеличением номера зоны.

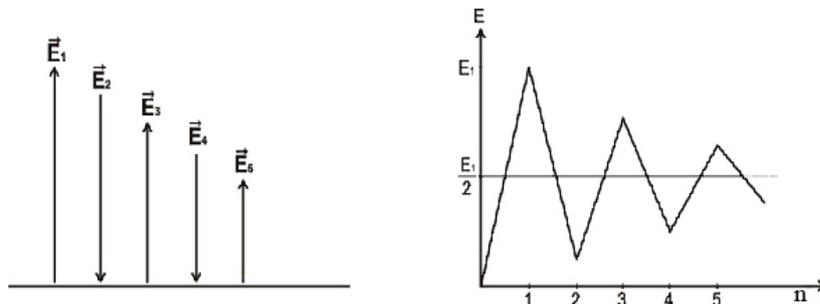


Рис. 1.2. Зависимость напряженности поля от числа зон Френеля

В графическом виде это положение представлено на векторной диаграмме (рис. 1.2). Вектор напряженности электрического поля, созданного источниками, расположенными в пределах первой зоны, соответствует вектору  $\vec{E}_1$ , второй зоны – вектору  $\vec{E}_2$ , третьей –  $\vec{E}_3$ , и т. д.

Изменение результирующего значения напряженности поля в точке наблюдения в зависимости от числа зон Френеля, принимающих участие в создании поля, изображено графиком на рисунке.

Как можно видеть из графика, максимальное значение напряженности поля имеет место в том случае, когда пространство ограничено размером только первой зоны Френеля. При увеличении размеров области (увеличении числа зон Френеля) наблюдаются осцилляции сигнала в точке приема, причем амплитуда осцилляций уменьшается из-за увеличения расстояния до точки наблюдения и изменения направленности излучения вторичных излучателей. В пределе амплитуда поля в точке наблюдения стремится к значению половины амплитуды поля первой зоны, что и имеет место в свободном пространстве, где число зон Френеля стремится к бесконечности.

Из графика рис. 1.2 можно видеть, что основная доля энергии источника передается приемнику через сравнительно небольшую область пространства, включающую в себя несколько первых зон Френеля. С практической точки зрения представляется важным определить форму, расположение и поперечные размеры этой области.

Возвращаясь к рис. 1.1, можно сделать вывод, что положение волнового фронта (произвольный выбор величин  $\rho$  и  $r$ ) не должно влиять на условия, определяемые выражением (1.20). Это требование удовлетворяется, когда границы зон Френеля перемещаются по образующей эллипса. В фокусах эллипса находятся излучатель и приемник. И поскольку для свободного пространства рассматриваемая задача обладает вращательной симметрией, то границы зон Френеля лежат на поверхностях соответствующих эллипсоидов. Таким образом, область пространства, оказывающая наибольшее влияние на распространение радиоволн между корреспондентами в свободном пространстве, представляет собой эллипсоид вращения, включающий в себя несколько первых зон Френеля. Поперечный размер эллипсоидов (радиус зон Френеля) в плоскости, перпендикулярной их большой оси, может быть определен исходя из простых геометрических представлений.

С учетом того, что в задачах распространения радиоволн практически всегда  $r \gg \lambda$  и  $\rho \gg \lambda$ , волновой фронт в пределах некоторой области пространства можно с большой степенью точности считать плоским, совпадающим с плоскостью, перпендикулярной большой оси эллипсоидов. Тогда с учетом (1.20) из получающихся прямоугольных треугольников можно записать:

$$\sqrt{R_n^2 + \rho_0^2} + \sqrt{R_n^2 + r^2} - (r + \rho_0) = n \frac{\lambda}{2}, \quad (1.21)$$

где  $R_n$  – радиус  $n$ -ой зоны Френеля.

Разложение радикалов в (1.21) в биномиальный ряд с удержанием двух первых членов позволяет получить выражение для определения радиуса зон Френеля:

$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda\rho_0 r}{\rho_0 + r}}. \quad (1.22)$$

Таким образом, первая зона Френеля представляет собой круг радиуса  $R_1$ , а последующие – кольцевые области соответствующих радиусов. Нужно заметить, что площади всех зон Френеля примерно одинаковы и равны:

$$\Delta S = \frac{\pi\lambda\rho_0 r}{\rho_0 + r}. \quad (1.23)$$

В теории распространения радиоволн принято использовать понятия существенной и минимальной областей пространства, достаточных для распространения радиоволн.

Размер существенной области пространства определяется требованиями к амплитуде осцилляций напряженности электрического поля в точке приема. Если амплитуда осцилляций не должна превышать 20 %, то существенная область пространства включает в себя порядка десяти первых зон Френеля. В случае более жестких требований к величине осцилляций число зон Френеля, образующих существенную область, должно быть увеличено.

Размер минимальной области пространства определяется из того условия, чтобы напряженность поля в точке приема, созданная вторичными источниками, расположенными в пределах этой области в центре первой зоны Френеля, была равна напряженности поля в свободном пространстве (при числе зон Френеля, стремящемся к бесконечности). Радиус минимальной области пространства может быть легко определен и составляет величину  $\frac{R_1}{\sqrt{3}}$ .

Таким образом, и существенная и минимальная области пространства представляют собой конфокальные эллипсоидальные области, в фокусах которых расположены точки излучения и приема радиоволн.

В заключение следует отметить, что в случае применения в качестве излучателя реальных антенн, обладающих определенной направленностью излучения, распределение поля в пределах существенной области пространства будет отличаться от такового при использовании точечного излучателя. Однако для реальных размеров антенн и расстояний между корреспондентами, угловые размеры существенной области пространства значительно меньше углов раствора диаграммы направленности антенн, поэтому влиянием направленности на распределение поля в существенной области можно пренебречь.

## 1.6 ФЛЮКТУАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН НА ЕСТЕСТВЕННЫХ ТРАССАХ

Условия распространения радиоволн на естественных трассах, за исключением глубокого космоса, существенным образом отличаются от идеализированных условий свободного пространства. Причины отличий состоят в том, что радиоволны распространяются в присутствии границы раздела двух сред с различными радиофизическими (диэлектрическая проницаемость, электрическая проводимость) параметрами – земной коры и атмосферы. Причем радиофизические параметры обеих сред, как правило, подвержены заметным изменениям в пространстве и во времени. Так, если параметры почвы подвержены сравнительно медленным суточным и сезонным изменениям, то параметры атмосферы в зависимости от синоптических, погодных условий могут изменяться весьма быстро (флюктуировать).

В этих условиях сигнал в месте приема представляет собой уже не постоянную, а случайным образом меняющуюся величину. Поскольку поле в точке приема может быть представлено в виде (1.17), то можно говорить о случайном характере изменения множителя ослабления. Поведение множителя ослабления в этом случае подчиняется определенному статистическому распределению и носит вероятностный характер. Знание законов распределения позволяет вычислить вероятность того, что величина множителя ослабления превысит заданное значение.

При решении практических задач распространения радиоволн следует иметь в виду, что прием случайным образом меняющихся сигналов осуществляется на фоне шумов, которые создаются атмосферными, космическими или техногенными помехами, а также шумов приемного устройства. Все эти шумовые сигналы также носят флюктуирующий, случайный характер.

В этой ситуации для надежной работы радиолинии необходимо соблюдение двух условий:

- средняя мощность принимаемого сигнала должна превышать мощность шумов (в определенное число раз, требуемое для надежной работы системы);
- искажения сигналов, возникающие в процессе распространения, не должны превышать установленных норм.

В настоящем пособии основное внимание будет уделено стационарным условиям распространения радиоволн на естественных трассах.

Вопросы для самопроверки:

1. Укажите частотный диапазон электромагнитных колебаний, относящихся к диапазону радиоволн.
2. Перечислите поддиапазоны радиоволн, используемые в технике.
3. Назовите возможные механизмы (способы) распространения радиоволн.
4. Сформулируйте понятие радиолинии и назовите существующие типы радиолиний.
5. Какую среду принято называть свободным пространством?
6. В чем заключаются особенности распространения радиоволн в свободном пространстве?

7. Запишите уравнения идеальной радиосвязи.
8. Как определяются потери передачи в свободном пространстве?
9. Какие процессы учитываются введением множителя ослабления поля свободного пространства?
10. Сформулируйте определение области пространства, существенной для распространения радиоволн.
11. Каковы условия определения минимальной области пространства?
12. Какие процессы приводят к флюктуациям сигнала при распространении радиоволн?

## 2. ВЛИЯНИЕ ЗЕМЛИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

В данном разделе рассматривается влияние Земли на распространение радиоволн в предположении, что она окружена однородной атмосферой, обладающей свойствами свободного пространства. При подобной постановке задачи влияние Земли заключается в следующем:

- кривизна земной поверхности (поскольку земной шар является геоидом – телом, близким по форме к сфере, радиус которой  $a = 6370$  км) приводит к появлению характерных областей пространства – освещенной и тени, в которых методы расчета напряженности поля (множителя ослабления) могут существенно различаться;

- поверхность земного шара, представляющая собой границу раздела сред с различными радиофизическими параметрами, отражает радиоволны, падающие на нее, что вызывает интерференцию волн в освещенной области и, следовательно, резкую зависимость напряженности поля (множителя ослабления) от расстояния между корреспондентами и высот антенн;

- наличие электропроводности земной коры вызывает поглощение энергии радиоволны в почве, что приводит к потерям и уменьшению энергетического потенциала радиолинии;

- неоднородность радиофизических параметров Земли вдоль трассы и в глубину приводит к изменениям фазовой скорости радиоволн, распространяющихся над землей и, как следствие, к скачкам напряженности поля по трассе и изменению направления распространения.

Учет влияния некоторых из перечисленных выше эффектов на величину множителя ослабления наиболее полно может быть осуществлен на основе решения задачи о дифракции радиоволн. Физика явления дифракции заключается в том, что электромагнитные волны, излученные передающей антенной, наводят в поверхности земли высокочастотные токи, растекающиеся в различных направлениях, в том числе и в область тени, и создающие вторичное излучение, которое приводит к перераспределению электромагнитной энергии в пространстве.

## 2.1 ДИФРАКЦИЯ РАДИОВОЛН НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Численное решение этой задачи было получено В.А. Фоком в середине сороковых годов прошлого века [4]. Для решения использовалась следующая модель: Земля рассматривалась как идеально гладкое, электрически однородное, сферическое тело, обладающее относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_3$  и проводимостью  $\gamma_3$ ; относительная магнитная проницаемость Земли полагается равной единице; Земля окружена однородной атмосферой со свойствами свободного пространства. Очевидно, что эта модель является в определенной степени идеализацией, но она позволяет получить наиболее общее решение задачи.

Решение выполняется в сферической системе координат (рис. 2.1). При этом предполагается, что передающая антенна расположена на высоте  $h_n$  в точке А и требуется найти напряженность поля (множитель ослабления) в точке В, расположенной на высоте  $h_{np}$  на расстоянии  $r = a\theta$ , которое отсчитывается по поверхности Земли. В качестве передающей антенны рассматривается либо вертикальный электрический диполь, в этом случае речь идет о дифракции вертикально поляризованной волны, либо вертикальный магнитный диполь – дифракция горизонтально поляризованной волны.

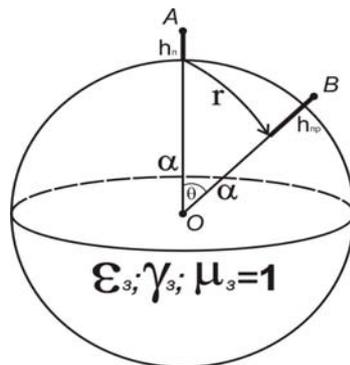


Рис. 2.1. К постановке задачи дифракции

В данном пособии не рассматривается ход решения этой задачи (с ним можно ознакомиться в литературе, [3], [4]). Здесь приводится лишь конечное выражение для множителя ослабления поля свободного пространства (так называемая дифракционная формула В.А. Фока) и анализируются различные частные случаи его применения.

$$V(x, y_n, y_{np}, q) = e^{\frac{i\pi}{4}} 2\sqrt{\pi x} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{e^{it_s x}}{t_s - q^2} \frac{w(t_s - y_n)}{w(t_s)} \frac{w(t_s - y_{np})}{w(t_s)}. \quad (2.1)$$

Здесь  $x = r/R^*$  – нормированное (численное) расстояние;  $R^* = \sqrt[3]{\frac{a^2 \lambda}{\pi}}$ ;

$y_n = h_n/h^*$ ;  $y_{np} = h_{np}/h^*$  – нормированные (численные) высоты передающей и

приемной антенн;  $h^* = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{a \lambda^2}{\pi^2}}$ ;

$a$  – радиус Земли ( $a = 6370$  км);

$q$  – параметр, учитывающий радиофизические свойства земной поверхности:

$$q = i \frac{m_0}{\sqrt{\varepsilon_3^*}} \text{ – при вертикальной поляризации;}$$

$$q = i m_0 \sqrt{\varepsilon_3^*} \text{ – при горизонтальной поляризации;}$$

$$m_0 = \sqrt[3]{\frac{\pi \alpha}{\lambda}} \text{ – большой параметр задачи;}$$

$\varepsilon_3^* = \varepsilon_3 + i60\lambda\gamma_3$  – комплексная диэлектрическая проницаемость Земли;

$t_s$  – корни характеристического уравнения

$$w'(t_s) - q w(t_s) = 0, \quad (2.2)$$

получающегося при удовлетворении граничным условиям на поверхности земли;

$w(t_s); w'(t_s)$  – функция и производная от функции Эйри соответственно;

$s$  – номер корня.

Выражение для множителя ослабления позволяет определить его значение при любых расстояниях между корреспондентами, высотах антенн и радиофизических параметрах земной поверхности. Однако расчеты по этой формуле достаточно трудоемки, поэтому целесообразно рассмотреть несколько частных случаев, при которых расчеты могут быть значительно упрощены. Классификация частных случаев производится по величине параметра  $q$ , учитывающего радиофизические свойства земной поверхности, и параметра  $x$ , учитывающего расстояние между корреспондентами.

Для горизонтально поляризованных радиоволн при любых значениях  $\varepsilon_3$  и  $\gamma_3$  величина  $|q| \gg 1$  во всем диапазоне радиочастот. При вертикальной поляризации в длинноволновой части радиодиапазона для больших значений диэлектрической проницаемости и проводимости величина  $|q|$  мала, а при  $\lambda$ , стремящейся к нулю,  $|q|$  стремится к бесконечности.

Расчеты, выполненные в [5], позволяют сделать вывод, что с достаточной степенью точности, при  $|q| > 30$  можно полагать  $|q| = \infty$ , а при  $|q| < 0.5$  можно считать  $|q| = 0$ . В обоих случаях упрощаются: характеристическое уравнение

$$w(t_s^\infty) = 0; \quad (2.3)$$

$$w'(t_s^0) = 0, \quad (2.4)$$

и выражение для множителя ослабления

$$V(x, y_n, y_{np}, \infty) = -2e^{i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\pi x} \sum_{s=1}^{\infty} \exp(it_s^\infty x) \frac{w(t_s^\infty - y_n)}{w'(t_s^\infty)} \frac{w(t_s^\infty - y_{np})}{w'(t_s^\infty)}; \quad (2.5)$$

$$V(x, y_n, y_{np}, 0) = 2e^{i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\pi x} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\exp(it_s^0 x)}{t_s^0} \frac{w(t_s^0 - y_n)}{w(t_s^0)} \frac{w(t_s^0 - y_{np})}{w(t_s^0)}. \quad (2.6)$$

При этом собственные значения (корни) характеристических уравнений имеют фазу  $\pi/3$ , а модули образуют дискретные последовательности:

$$t_1^\infty = 2.34; t_2^\infty = 4.09; t_3^\infty = 5.52 \dots; \quad (2.7)$$

$$t_1^0 = 1.02; t_2^0 = 3.25; t_3^0 = 4.82 \dots \quad (2.8)$$

Последующие значения корней с достаточной точностью могут быть вычислены по приближенным формулам

$$t_s^\infty = \left[ \frac{3}{2} \left( s - \frac{1}{4} \right) \pi \right]^{\frac{2}{3}} \exp(i\pi/3); \quad (2.9)$$

$$t_s^0 = \left[ \frac{3}{2} \left( s - \frac{3}{4} \right) \pi \right]^{\frac{2}{3}} \exp(i\pi/3). \quad (2.10)$$

В диапазоне значений  $30 > |q| > 0.5$  вычисление множителя ослабления следует проводить по формуле (2.1) с отысканием значений  $t_s$  с помощью уравнения (2.2). Следует однако заметить, что значения  $|q|$  в указанном интервале соответствуют только вертикальной поляризации и достаточно узкому диапазону длин волн ( $\lambda = 0.4-80$  м для морской воды с  $\epsilon_3 = 80$ ).

Из выражений (2.1), (2.5), (2.6) можно видеть, что расчеты множителя ослабления зависят от нормированного расстояния. При малых значениях  $x$  произведение мнимой части корня на численное расстояние  $\text{Im}t_s x$ , определяющее амплитуду дифракционной волны, будет мало меняться с увеличением номера корня. Поэтому для получения необходимой точности требуется вычислять большое число членов ряда. С другой стороны, при достаточно больших значениях численного расстояния, может оказаться достаточным удержание одного, первого члена ряда. В связи с этим представляет интерес классификация частных случаев по величине  $x$ .

Критерием для этой классификации является расстояние прямой видимости  $R_B$  [1] (рис. 2.2).

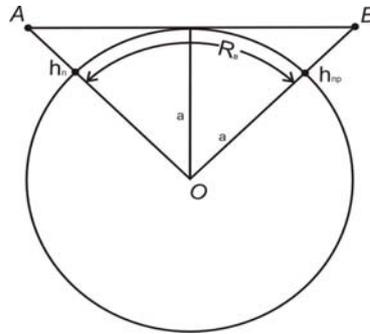


Рис. 2.2. К определению расстояния прямой видимости

С учетом того, что  $h_n \ll a$  и  $h_{np} \ll a$ , расстояние прямой видимости, отсчитываемое по поверхности Земли, практически равно длине прямой, касательной к поверхности Земли, соединяющей точки передачи и приема. Исходя из очевидных геометрических представлений и пренебрегая высотами антенн по сравнению с радиусом Земли, можно приближенно получить

$$R_B = \sqrt{2a} \left( \sqrt{h_n} + \sqrt{h_{np}} \right). \quad (2.11)$$

В выражении (2.11) обычно используются внесистемные единицы: радиус Земли подставляется в километрах ( $a = 6370$  км), а высоты антенн – в метрах, тогда

$$R_B = 3.57(\sqrt{h_n} + \sqrt{h_{np}}), \text{ км.} \quad (2.12)$$

В зависимости от расстояния до точки наблюдения принято рассматривать три зоны:

$r < R_B$  – зона прямой видимости (освещенная зона);

$r \approx R_B$  – зона полутени;

$r > R_B$  – зона тени.

В каждой из этих зон множитель ослабления может быть рассчитан с использованием строгой дифракционной формулы, однако в освещенной зоне и зоне тени расчеты могут быть существенно упрощены.

Причем при расчете множителя ослабления в освещенной зоне оказывается более удобным рассматривать иной подход, основанный на интерференции в точке наблюдения прямой и отраженной от поверхности Земли волн.

## 2.2 РАСЧЕТ МНОЖИТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ В ОСВЕЩЕННОЙ ЗОНЕ

Задача формулируется следующим образом: передающая антенна, обладающая коэффициентом направленного действия  $D_{изл}$  и излучающая мощность  $P_{изл}$ , расположена в точке А на высоте  $h_n > \lambda$  над поверхностью

Земли (что соответствует УКВ-диапазону), максимум излучения направлен на точку приема В. Расстояние между корреспондентами  $r \gg \lambda$ , но много меньше расстояния прямой видимости, так что землю можно считать плоской (рис. 2.3). Требуется определить напряженность поля или множитель ослабления в точке В на высоте  $h_{np} > \lambda$ .

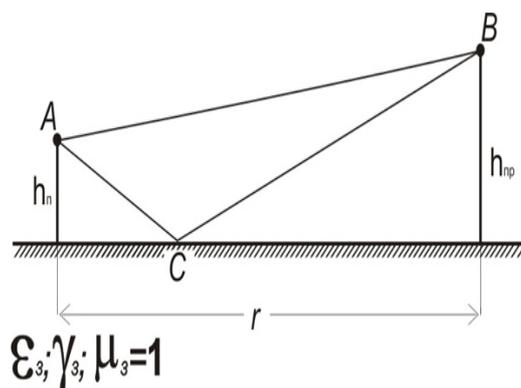


Рис. 2.3. К определению множителя ослабления в освещенной зоне

В точку приема, в соответствии с методом геометрической оптики, приходят две волны: прямая, распространяющаяся по направлению АВ, и отраженная от поверхности Земли в точке С. Поскольку обычно расстояние между корреспондентами значительно превышает высоты антенн, то с достаточной степенью точности можно считать, что при определении амплитуд прямой и отраженной волн в точке приема расстояния, которые проходят волны, равны  $r$  – расстоянию, отсчитываемому по поверхности

Земли. Кроме того, при указанном условии, влиянием направленности излучения антенны на амплитуду отраженной волны также можно пренебречь и считать ее равной амплитуде прямой волны. В фазовом же множителе разностью хода прямой и отраженной волн пренебрегать нельзя.

С учетом сформулированных выше условий выражения для действующих значений вектора напряженности прямой и отраженной волн в точке приема могут быть записаны в виде:

$$E_{np} = \frac{\sqrt{30P_{изл} D_{изл}}}{r} e^{ikr_1}, \quad (2.13)$$

где  $k = 2\pi / \lambda$  – волновое число (постоянная фазы);  
 $r_1$  – расстояние АВ;

$$E_{omp} = \frac{\sqrt{30P_{изл} D_{изл}}}{r} |K_{omp}| e^{i(kr_2 + \varphi_{omp})}, \quad (2.14)$$

где  $|K_{отр}|$  – модуль коэффициента отражения;  
 $\varphi_{отр}$  – фаза коэффициента отражения;  
 $r_2$  – расстояние АС + СВ.

Результирующее значение напряженности поля в точке В принимает вид:

$$E = \frac{\sqrt{30P_{изл} D_{изл}}}{r} e^{ikr_1} (1 + |K_{omp}| e^{i(k\Delta r + \varphi_{omp})}). \quad (2.15)$$

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

Учитывая, что сомножитель, стоящий перед скобками, представляет собой выражение для напряженности поля в свободном пространстве (1.6), сомножитель в скобках является множителем ослабления поля свободного пространства.

$$V = 1 + |K_{omp}| e^{i(k\Delta r + \varphi_{omp})}. \quad (2.16)$$

Из (2.16) можно получить выражения для модуля и фазы множителя ослабления:

$$|V| = \sqrt{1 + |K_{omp}|^2 + 2|K_{omp}| \cos(k\Delta r + \varphi_{omp})}; \quad (2.17)$$

$$\text{arc}V = \text{arctg} \frac{|K_{omp}| \sin(k\Delta r + \varphi_{omp})}{1 + |K_{omp}| \cos(k\Delta r + \varphi_{omp})}. \quad (2.18)$$

Формулы (2.17), (2.18) носят название интерференционных формул для множителя ослабления поля свободного пространства. Таким образом, для вычисления модуля и фазы множителя ослабления в освещенной области необходимо иметь информацию о модуле и фазе коэффициента отражения от земной поверхности и разности хода отраженной и прямой волн.

Коэффициент отражения от плоской земной поверхности определяется формулами Френеля (см. [2]). Для различных значений диэлектрической

проницаемости и проводимости земной поверхности поведение его модуля и фазы в зависимости от угла падения представлено в литературе (см. например [7]). В соответствии с формулами Френеля, при стремлении угла падения волны на границу раздела к  $90^\circ$  (скользящее падение), что обычно имеет место на линиях связи, поскольку  $r \gg h_n$  и  $h_{np}$ , модуль коэффициента отражения стремится к единице, а фаза приближается к  $180^\circ$  для вертикальной и горизонтальной поляризации. При данном приближении интерференционные формулы (2.17) и (2.18) существенно упрощаются.

Разность хода прямой и отраженной волн  $\Delta r$  может быть вычислена на основе подобия треугольников ADC и BCF (рис 2.2), при разложении полученных радикалов в биномиальные ряды с удержанием двух первых членов:

$$\Delta r \approx \frac{2h_n h_{np}}{r}. \quad (2.19)$$

Таким образом, при изменении высот антенн и расстояния между ними разность хода изменяется и модуль множителя ослабления, согласно (2.17), будет осциллировать. Причем при  $k\Delta r + \varphi_{отр} = 2m\pi$ ,  $m = 1, 2, 3 \dots$  имеют место интерференционные максимумы, а при  $k\Delta r + \varphi_{отр} = (2n + 1)\pi$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$  интерференционные минимумы.

Предельные значения модуля множителя ослабления запишутся в виде

$$|V| = 1 \pm |K_{отр}|. \quad (2.20)$$

Поскольку модуль коэффициента отражения стремится к единице, то модуль множителя ослабления в максимуме стремится к двум, а в минимуме – к нулю.

При  $|K_{отр}| = 1$  и  $\varphi_{отр} = \pi$  выражение (2.17) для приближенных расчетов множителя ослабления может быть преобразовано к виду

$$|V| = 2|\sin(\pi\Delta r/\lambda)| = 2|\sin(2\pi h_n h_{np}/\lambda r)|. \quad (2.21)$$

Из (2.21) легко получить соотношения для вычисления расстояния до максимумов и минимумов множителя ослабления:

$$\text{при } 2\pi h_n h_{np} / \lambda r = (2m + 1)\frac{\pi}{2}, \quad m = 0, 1, 2 \text{ и т.д.} \quad r_{\max} = \frac{4h_n h_{np}}{\lambda(2m + 1)}; \quad (2.22)$$

$$\text{при } 2\pi h_n h_{np} / \lambda r = (n + 1)\pi, \quad n = 0, 1, 2 \text{ и т.д.} \quad r_{\min} = \frac{2h_n h_{np}}{\lambda(n + 1)}. \quad (2.23)$$

Причем первый максимум расположен на наибольшем расстоянии от точки передачи.

Если соотношение высот антенн, длины волны и расстояния между корреспондентами таково, что

$$4h_n h_{np} / \lambda r \ll 1, \quad (2.24)$$

то аргумент синуса в (2.21) много меньше  $\pi/2$  и синус можно заменить аргументом.

Тогда:

$$|V| = 4\pi h_n h_{np} / \lambda r. \quad (2.25)$$

Таким образом, на достаточно большом расстоянии от передающей антенны осцилляции прекращаются и множитель ослабления монотонно, по гиперболическому закону, убывает с увеличением расстояния.

Подстановка (2.25) в (1.17) с учетом (1.6) позволяет записать выражение для напряженности поля в месте приема в виде

$$|E| = 4\pi \frac{\sqrt{30P_{изл} D_{изл}}}{r^2 \lambda} h_n h_{np}. \quad (2.26)$$

Эта формула носит название квадратичной формулы Б.А. Введенского.

С практической точки зрения представляет интерес определить границы применимости интерференционных формул и формулы Введенского.

При этом нужно иметь в виду, что использованная для вывода интерференционных формул концепция существования в месте приема прямого и отраженного лучей справедлива лишь в том случае, когда высоты передающей и приемной антенн значительно превышают длину волны. Если же хотя бы одна из высот антенн оказывается меньше половины длины волны, то даже при  $r$ , стремящемся к нулю, разность хода будет меньше длины волны и разность фаз не будет превышать  $2\pi$ . Поэтому интерференционная структура поля, уже не наблюдается. С другой стороны, при  $r$ , стремящемся к  $R_B$ , разность хода также стремится к нулю, и разделить прямую и отраженную волны невозможно. В этих случаях для расчета множителя ослабления нужно использовать более строгие дифракционные формулы.

Можно показать, что собственно интерференционные формулы с учетом рассмотренных выше условий «работают» на сравнительно малых расстояниях от передающей антенны, ограниченных по дальности величиной

$$r \approx \frac{18h_n h_{np}}{\lambda}. \quad (2.27)$$

При таком значении  $r$  в (2.21) аргумент синуса не превышает  $20^\circ$ , синус может быть заменен аргументом и интерференционные формулы переходят в формулу Введенского. По отношению к дальности прямой видимости, это расстояние составляет  $\approx 0.25 R_B$ . Со стороны больших дальностей применимость формулы Введенского ограничивается расстоянием  $\approx 0.8 R_B$ .

На расстояниях, превышающих указанное расстояние ( $0.8 R_B$ ), для вычисления множителя ослабления необходимо использовать более строгие дифракционные методы.

### 2.3 УЧЕТ ВЛИЯНИЯ КРИВИЗНЫ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В предыдущем параграфе были рассмотрены особенности определения множителя ослабления в освещенной области пространства в предположении, что поверхность земли является плоской. Это предположение с достаточной точностью можно считать справедливым в зоне интерференции, на малых расстояниях между корреспондентами. Однако в зоне применимости формулы Б.А. Введенского кривизну земной поверхности уже необходимо учитывать, поскольку в противном случае ошибки определения множителя ослабления

приобретают заметную величину. Физически это объясняется двумя причинами: во-первых кривизна земной поверхности приводит к уменьшению эффективной высоты антенн и, как следствие, к изменению разности хода отраженного и прямого лучей и во-вторых – к уменьшению модуля коэффициента отражения за счет большей расходимости волнового пучка при отражении от сферы.

В инженерных расчетах множителя ослабления изменение величины модуля коэффициента отражения обычно не учитывается. Уменьшение действующей высоты антенн происходит из-за затенения некоторой части реальных высот антенн выпуклостью земной поверхности (рис. 2.4).

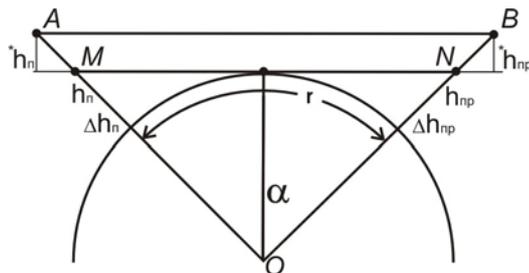


Рис. 2.4. К определению приведенных высот антенн

На данном рисунке прямая MN (пересечение плоскости, касательной к поверхности земли в точке отражения, с плоскостью рисунка) параллельна линии визирования АВ. Если высоты антенн отсчитывать от этой плоскости, то задача сводится к рассмотренной выше, и разность хода лучей будет определяться так же, как и при отражении от плоской земли. Следовательно, выражения, полученные для расчета множителя ослабления при отражении от плоской земли, могут быть использованы для сферической земной поверхности при замене истинных высот антенн «приведенными» высотами.

Для этого необходимо определить «приведенные» высоты антенн по известным значениям истинных высот и расстояния между ними. Не проводя подробных математических выводов, запишем окончательные выражения для приведенных высот антенн  $h^*$ :

$$h_n^* = h_n \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_g} \right)^2 \right]; \quad (2.28)$$

$$h_{np}^* = h_{np} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_g} \right)^2 \right]. \quad (2.29)$$

Учитывая (2.28) и (2.29), выражения (2.25) и (2.26) сохраняют свой вид с заменой истинных высот антенн приведенными высотами. Поскольку приведенные высоты антенн всегда меньше истинных, то величина множителя ослабления (напряженности поля) за счет кривизны земной поверхности будет уменьшаться. При стремлении расстояния между корреспондентами  $r$  к расстоянию прямой видимости  $R_g$  приведенные высоты антенн стремятся к нулю, и формула Введенского теряет смысл.

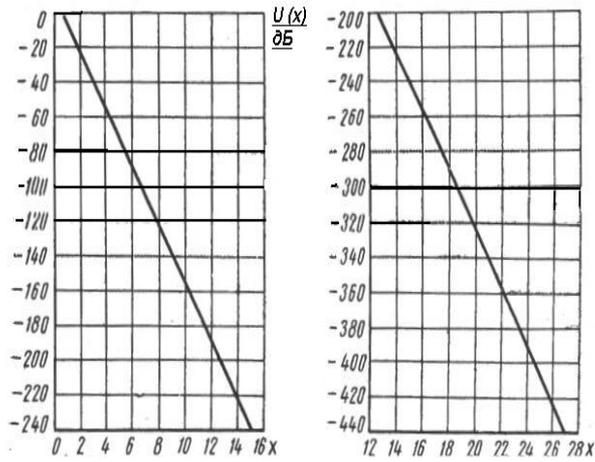


Рис. 2.5. Зависимость  $U(x)$  от относительного расстояния.

#### 2.4 РАСЧЕТ МНОЖИТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ ТЕНИ И ПОЛУТЕНИ

Анализ выражений (2.1), (2.7), (2.8) показывает, что по мере углубления в область тени (большие значения приведенного расстояния  $x$ ), вклад членов ряда в амплитуду множителя ослабления быстро уменьшается с увеличением номера корня. Поэтому для инженерных расчетов, начиная с расстояния  $r > 1.2 R_B$ , с достаточной степенью точности, можно в выражении (2.1) оставить один первый член ряда.

Тогда (2.1), а также (2.5) и (2.6) приобретают вид:

$$V(x, y_n, y_{np}, q) = 2e^{\frac{i\pi}{4}} \sqrt{\pi x} \frac{e^{it_1 x}}{t_1 - q^2} \frac{w(t_1 - y_n)}{w(t_1)} \frac{w(t_1 - y_{np})}{w(t_1)}; \quad (2.30)$$

$$V(x, y_n, y_{np}, \infty) = -2e^{\frac{i\pi}{4}} \sqrt{\pi x} \exp(it_1^\infty x) \frac{w(t_1^\infty - y_n)}{w(t_1^\infty)} \frac{w(t_1^\infty - y_{np})}{w(t_1^\infty)}; \quad (2.31)$$

$$V(x, y_n, y_{np}, 0) = 2e^{\frac{i\pi}{4}} \sqrt{\pi x} \frac{\exp(it_1^0 x)}{t_1^0} \frac{w(t_1^0 - y_n)}{w(t_1^0)} \frac{w(t_1^0 - y_{np})}{w(t_1^0)}. \quad (2.32)$$

Выражения (2.30), (2.31), (2.32) носят название одночленной дифракционной формулы В.А. Фока.

Применение каждого определяется длиной волны, видом поляризации и радиофизическими параметрами земли (см. раздел 2.1). Так, для волн всего радиодиапазона при горизонтальной поляризации и для сантиметрового поддиапазона в случае вертикальной поляризации при любых значениях радиофизических параметров земной поверхности величина  $q \rightarrow \infty$ , и для расчета множителя ослабления следует использовать выражение (2.31) после подстановки значения первого корня (2.7). При этом следует иметь в виду, что мнимая часть корня приводит к экспоненциальному затуханию множителя

ослабления с расстоянием, а его вещественная часть – к изменению фазы множителя ослабления. В высотных множителях увеличение приведенных высот антенн ведет к росту множителя ослабления.

Каждое из них может быть представлено в виде трех сомножителей, один из которых зависит только от расстояния, а два других – от высот передающей и приемной антенн:

$$|V| = U(x) F(y_n) F(y_{np}). \quad (2.33)$$

Указанные зависимости, в логарифмическом масштабе представлены на графиках на рис. 2.5 и 2.6. В соответствии с (2.33) и обозначениями на данных графиках,

$$V_{дб} = U_{дб}(x) + F_{дб}(y_n) + F_{дб}(y_{np}). \quad (2.34)$$

Переход от  $V$ , выраженного в децибелах, к безразмерным величинам осуществляется с помощью соотношения:

$$V = 10^{\frac{V_{дб}}{20}}. \quad (2.35)$$

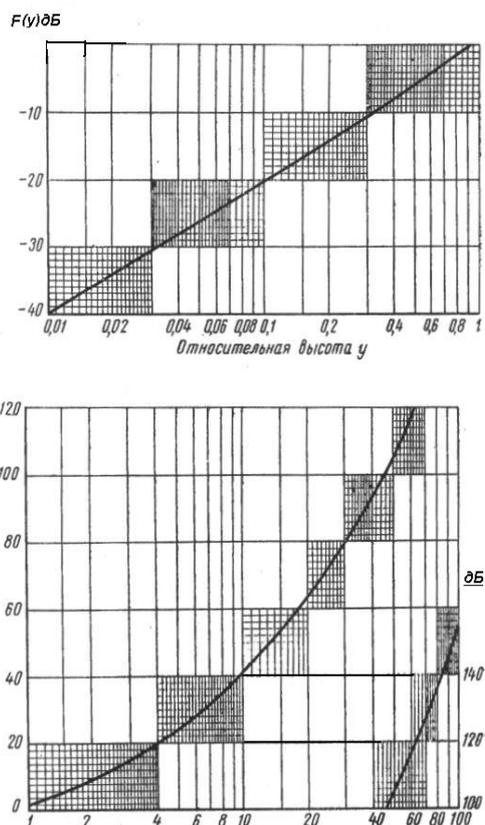


Рис. 2.6. Зависимость высотных множителей  $F(y_n)$  и  $F(y_{np})$  от относительных высот антенн.

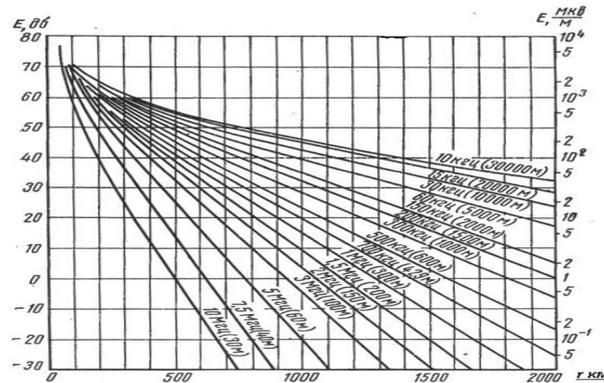
Если обе антенны находятся на уровне земли, что имеет место в диапазонах сверхдлинных, длинных, средних и коротких радиоволн, то высотные множители становятся равными единице и одночленная дифракционная формула принимает вид:

$$V(x, q) = 2e^{i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\pi x} \exp(it_1 x) / (t_1 x - q^2). \quad (2.36)$$

В соответствии с (2.36), (1.8) и (1.17) на графиках на рис. 2.7 и 2.8 представлены зависимости напряженности поля от длины волны и расстояния в двух частных случаях: при распространении над морем ( $\epsilon_3 = 80$  и  $\gamma_3 = 4$  сим/м) и сушей ( $\epsilon_3 = 4$  и  $\gamma_3 = 0.01$  сим/м) соответственно.

Эти графики построены для мощности 1 кВт, излученной вертикальной антенной с коэффициентом направленного действия  $D = 1.5$ . Для определения действующего значения напряженности поля в точке наблюдения с использованием данных графиков можно воспользоваться соотношением:

$$E_{\partial} = E_{\partial 1} \sqrt{P_{\text{кВт}}}.$$



(2.37)

Рис. 2.7. Зависимость напряженности поля земной волны от расстояния при распространении над морем

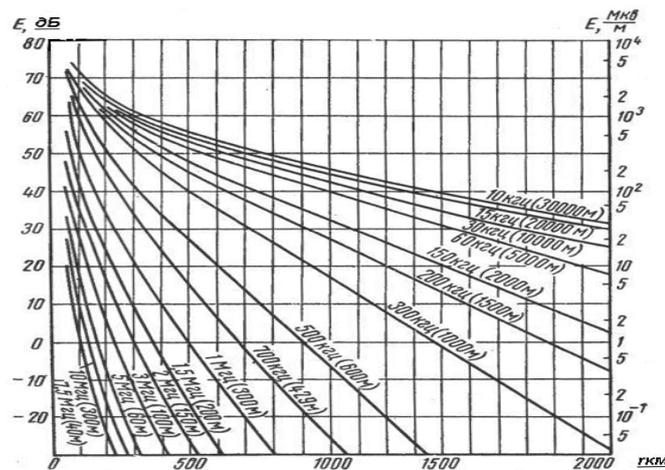


Рис. 2.8. Зависимость напряженности поля земной волны от расстояния при распространении над сушей

Расчет множителя ослабления в области полутени ( $0.8 R_B < r < 1.2 R_B$ ) должен производиться по строгим дифракционным формулам с удержанием нескольких членов ряда. Однако, в связи с тем, что в области полутени никаких особенностей в распространении радиоволн не обнаруживается, для приближенной оценки величины множителя ослабления можно воспользоваться методом интерполяции. Сущность этого метода состоит в том, что производится вычисление множителя ослабления в нескольких точках по дальности в освещенной области с использованием формулы Введенского и в нескольких точках в области тени с использованием одночленной формулы Фока. Затем осуществляется графическая интерполяция в области полутени.

В заключение данного раздела приведем обобщенный график зависимости множителя ослабления от расстояния до точки наблюдения (рис. 2.9)

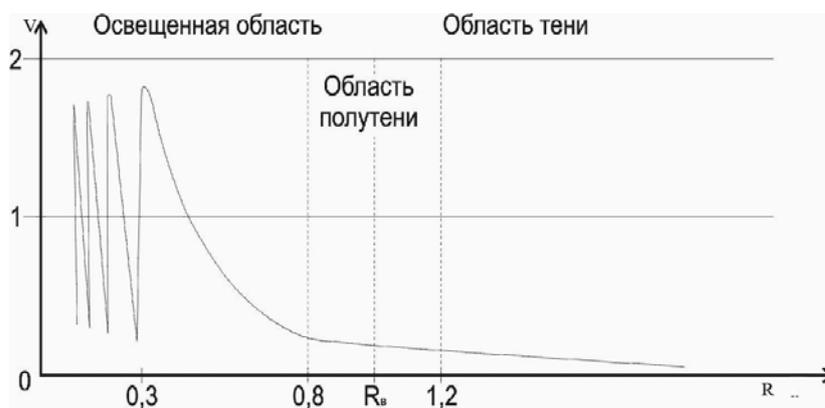


Рис. 2.9. Зависимость множителя ослабления от расстояния при распространении УКВ вдоль земной поверхности

## 2.5 ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Радиофизические свойства земной поверхности на реальных трассах могут изменяться как в глубину (в вертикальном направлении), так и вдоль трассы (в горизонтальном направлении). Эти изменения обусловлены свойствами различных видов земной поверхности, неоднородностями структуры грунта, погодными условиями. Представление о порядке величин радиофизических параметров дает таблица 2.1, в которой приведены зависимости диэлектрической проницаемости и удельной проводимости от вида поверхности и длины волны [ 1 ].

## Электрические параметры земной поверхности

Вид поверхности	Длина волны $\lambda$ , м	Относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_3$	Удельная электропроводность $\gamma_3$ , Сим/м
Морская вода	>1	75	1-6
	0.1	70	1-6
	0.03	65	10-20
	0.003	10	10-20
Пресная вода	>1	80	$10^{-2} - 3 \times 10^{-2}$
	0.1	75	1-2
	0.03	65	10-20
	0.003	10	-
Влажная почва	>1	20-30	$2 \times 10^{-2} - 3 \times 10^{-1}$
	0.1	20-30	$5 \times 10^{-1} - 1$
	0.03	10-20	1-3
Сухая почва	>1	3-6	$10^{-5} - 2 \times 10^{-3}$
	0.1	3-6	$10^{-2} - 7 \times 10^{-2}$
	0.03	3-6	$10^{-1} - 2 \times 10^{-1}$
Лед (-10°C)	>1	4-5	$10^{-2} - 10^{-1}$
	0.1	3-5	$10^{-4} - 10^{-3}$
	0.03	3-2	$10^{-4} - 10^{-3}$
Снег (-10°C)	>1	1.2	$10^{-6}$
	0.1	1.2	$10^{-5}$
	0.03	1.2	$10^{-5}$
Лес	>1	1.004	$10^{-6} - 10^{-5}$
	0.1	1.04-1.4	$10^{-5} - 10^{-3}$

Физика процессов, происходящих при изменении радиofизических параметров по глубине, заключается в том, что отражение радиоволн может происходить не только от поверхностных, но и от глубинных слоев почвы. Это приводит к изменению модуля и фазы коэффициента отражения, что вызывает скачки напряженности поля вдоль трассы.

При этом если коэффициент поглощения в земле велик, так что волна, распространяющаяся вглубь, достаточно быстро затухает, то отражениями от имеющихся неоднородностей практически можно пренебречь.

С другой стороны, когда коэффициент поглощения в земле мал, ослабление волн, проникающих в глубинные слои, будет незначительным и возможно появление отраженных от неоднородностей волн,двигающихся к поверхности земли. Однако, если диэлектрическая проницаемость и проводимость изменяются по глубине сравнительно медленно, то влияние таких неоднородностей также можно не учитывать. В большинстве случаев это условие выполняется, за исключением достаточно длинных волн и слабо проводящего поверхностного слоя, когда могут сказываться глубоко расположенные слои с высокой проводимостью.

На практике для учета влияния на распространение радиоволн указанных неоднородностей вводят эквивалентные радиofизические параметры земной

поверхности, базируясь на экспериментальных измерениях амплитуд векторов напряженности электрического и магнитного полей над различными участками земли с последующим сравнением с результатами, полученными расчетным путем.

Следует заметить, что аналогичный подход используется и в тех случаях, когда распространение радиоволн происходит над участками суши, покрытыми кустарником, лесом, над населенными пунктами.

Довольно часто встречаются ситуации, когда распространение радиоволн происходит над участками поверхности с резко отличающимися значениями радиофизических параметров вдоль трассы, например над сушей и морем (рис. 2.10).

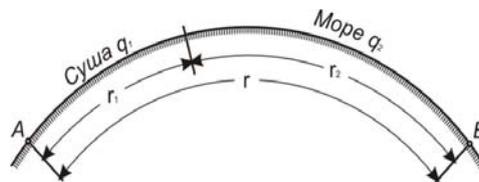


Рис. 2.10. Геометрия неоднородной трассы

Решение этой задачи осуществляется с использованием видоизмененной дифракционной формулы В.А. Фока для каждого из участков трассы, характеризующихся своей протяженностью и значениями диэлектрической проницаемости и проводимости. На рис. 2.11 в качестве примера представлены результаты вычисления напряженности поля в зависимости от расстояния для длины волны  $\lambda = 96$  метров при мощности передатчика  $P_{изл} = 10$  киловатт. Проводимость моря полагалась бесконечной, проводимость суши –  $10^{-2}$  Сим/м. На этом же рисунке точками показаны результаты экспериментальных исследований [ 3 ].

Обращает на себя внимание тот факт, что при переходе через береговую черту с суши на море происходит возрастание напряженности поля тем большее, чем больше разнятся проводимости участков.

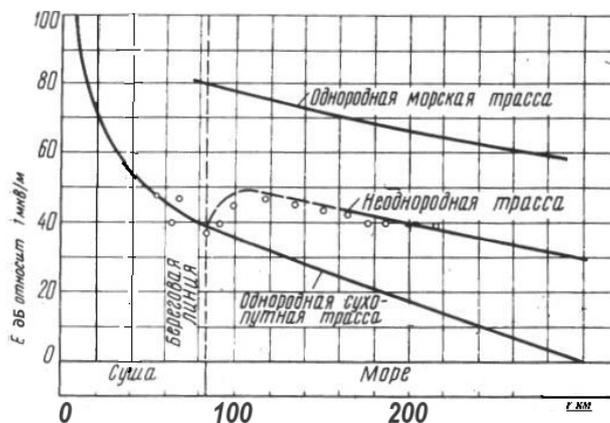


Рис. 2.11. Зависимость напряженности поля от расстояния на трассе из двух участков

Аналогично может быть решена задача в случае, когда трасса состоит из большего числа разнородных участков. На рис. 2.12 приведены зависимости модуля множителя ослабления от расстояния для трассы, состоящей из трех участков в двух различных комбинациях: море суша море и суша море суша.

Множитель ослабления оказывается большим, когда концевые участки трассы обладают большей проводимостью.

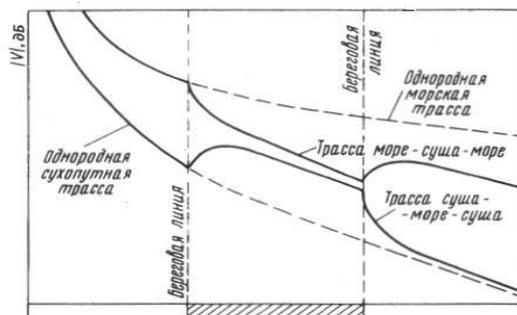


Рис. 2.12. Зависимость напряженности поля от расстояния на трассе из трех участков

При распространении радиоволн над разнородными участками подстилающей поверхности изменяется не только модуль множителя ослабления, но и его фаза. Это может привести к изменению ориентации фазового фронта волны и, как следствие, к изменению направления распространения волны — береговой рефракции. На рис. 2.13 показана геометрия задачи, поясняющая появление эффекта береговой рефракции.

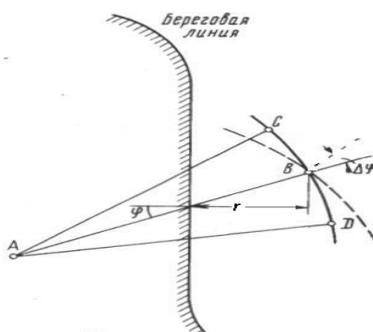


Рис. 2.13. К определению береговой рефракции

Как можно видеть из рисунка, длина сухопутных и морских участков трассы по направлениям AC, AB и AD будет различной, следовательно будет различным и набег фазы. В этом случае положение волнового фронта, показанное пунктирной кривой, будет отличаться от положения волнового фронта (сплошная кривая), которое имело бы место при распространении над однородной трассой. Угол  $\Delta\varphi$  носит название угла рефракции и считается положительным, когда нормаль к волновому фронту смещается по часовой стрелке, и отрицательным при смещении в противоположную сторону.

Величина угла рефракции зависит от величины угла  $\varphi$  падения волны на береговую линию. Чем он больше, тем больше разность расстояний, которые проходит волна над разнородными участками трассы, и тем больше угол рефракции. При падении волны по нормали (угол  $\varphi = 0$ ) угол рефракции также равен нулю. Обычно  $\Delta\varphi$  не превосходит нескольких градусов.

## 2.6 ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ НА ВЕЛИЧИНУ МНОЖИТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ

При решении задачи дифракции радиоволн на поверхности земли предполагалось, что поверхность является идеально гладкой. В действительности это предположение является во многом условным, поскольку практически всегда на трассе распространения радиоволн имеются неровности как естественного – возвышенности, растительность на суше, волнение на море,- так и искусственного – строения, инженерные сооружения,- происхождения. В силу того, что на каждой конкретной трассе может иметь место большое разнообразие неровностей подстилающей поверхности, возможен лишь приближенный учет их влияния на величину множителя ослабления. Степень этого влияния определяется многими факторами: высотой, взаимным расположением и формой неровностей, протяженностью трассы, высотой антенн, длиной электромагнитной волны.

Физически наличие неровностей проявляется в том, что процессы отражения, поглощения и рассеяния радиоволн отличаются от таковых при идеально гладкой поверхности.

В частности, в области интерференции наибольшее влияние на величину множителя ослабления будет оказывать изменение модуля и фазы коэффициента отражения по сравнению с зеркальным отражением. В связи с этим представляется важным оценить максимально допустимую высоту неровностей, при которой отражение радиоволн еще можно считать зеркальным. Подобная оценка может быть осуществлена на основе применения критерия Релея. Сущность этого критерия состоит в том, что искажения фазового фронта волны, отраженной от шероховатой поверхности, не должны превышать величину  $\pi/2$ , при которой изменение модуля коэффициента отражения можно считать допустимым ( $\approx 20\%$ ). В случае применения более жестких требований к величине модуля коэффициента отражения, фазовые искажения не должны превышать, скажем, величину  $\pi/4$ . Для определения допустимой высоты неровностей воспользуемся рис. 2.14.

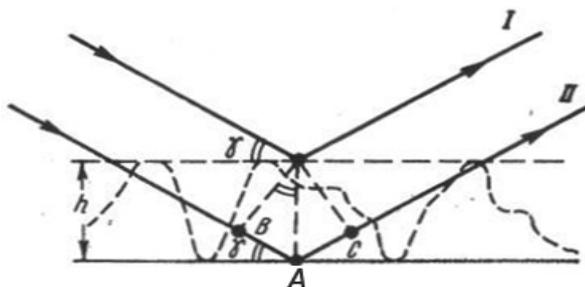


Рис.2.14. Определение допустимой высоты неровностей

В соответствии с рис. 2.14 сдвиг фазы луча 1, отраженного от вершины неровности, и луча 11, отраженного от ее подошвы, составляет величину

$$\Delta\psi = 2\pi/\lambda \times 2h \sin\gamma \quad (2.38)$$

Если потребовать, чтобы  $\Delta\psi < \pi/2$  (для удовлетворения критерию Релея), то после подстановки в (2.38)

$$h < \lambda / 8 \sin \gamma. \quad (2.39)$$

Таким образом, если высота неровностей не превышает значение  $h$  из (2.39), такую поверхность можно считать идеально гладкой. Зависимость высоты неровностей от угла скольжения  $\gamma$  позволяет сделать вывод, что с уменьшением этого угла высота неровностей, при которых возникает рассеянное отражение, возрастает. Очевидно, что в зависимости от длины волны одни и те же неровности могут проявлять себя различным образом. Так, в диапазоне сверхдлинных волн даже горные хребты можно рассматривать как идеально гладкую поверхность, в то время как в диапазоне миллиметровых волн идеальный английский газон является шероховатым.

Неровности земной поверхности в большинстве случаев различаются по высоте и форме и неравномерно распределены по площади. Поэтому представляется важным определить область подстилающей поверхности, которая играет решающую роль в создании отраженной волны.

Эта задача может быть решена на основе подходов, изложенных в разделе 1.5. На рис. 2.15 представлена геометрия рассматриваемой задачи.

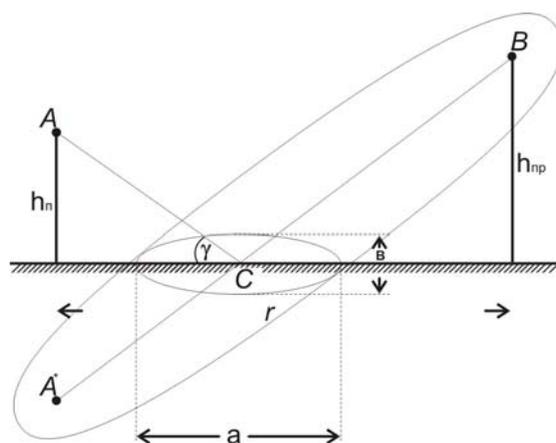


Рис. 2.15. К определению существенной зоны при отражении

Как следует из материалов раздела 1.5, область пространства, существенная для распространения радиоволн в свободном пространстве, представляет собой эллипсоид вращения, в фокусах которого расположены передающая и приемная антенны. Рассматриваемая задача может быть сведена к задаче из раздела 1.5, если на основе метода зеркальных отображений

реальную антенну заменить ее зеркальным отображением в подстилающей поверхности и подстилающую поверхность исключить из рассмотрения. В этом случае существенная область пространства представляет собой эллипсоид вращения, в фокусах которого расположены зеркальное отображение передающей антенны и приемная антенна (рис. 2.15). Однако подстилающая поверхность существует, и ее пересечение с полученным эллипсоидом (под углом  $\gamma$  к большой оси) образует на плоскости, в отличие от свободного пространства, семейство эллипсов, образованное несколькими первыми зонами Френеля. Таким образом, зона, существенная при отражении радиоволн, представляет собой участок поверхности эллиптической формы, вытянутый в направлении приемной антенны. Центр этого участка совпадает с серединой трассы только в случае равенства высот антенн. Для разновысоких антенн центр отражающей площадки смещен в сторону антенны, имеющей меньшую высоту. Поскольку обычно высоты антенн много меньше расстояния между ними, существенный участок отражающей поверхности оказывается очень сильно вытянутым, т. е. большая ось эллипсов « $a$ » много больше малой оси « $b$ ».

По аналогии со свободным пространством, на подстилающей поверхности принято выделять также минимальную зону, достаточную для отражения радиоволн, которая обеспечивает тот же уровень поля, что и вся отражающая поверхность (когда количество зон Френеля стремится к бесконечности). Естественно, что минимальная зона является также эллипсом, еще более вытянутым.

Если отражающая поверхность в пределах минимальной, а тем более в пределах существенной области удовлетворяет критерию Релея, то значение коэффициента отражения можно полагать равным его значению при зеркальном отражении радиоволн.

С практической точки зрения, знание размеров и положения существенной зоны на отражающей поверхности дает возможность спроектировать радиолинию таким образом, чтобы избежать негативного влияния на ее работу неровностей подстилающей поверхности (волнения на поверхности воды, раскачивания крон деревьев и пр.).

Следует отметить, что хаотические неровности на поверхности Земли оказывают влияние не только на распространение радиоволн в освещенной области, где работает механизм интерференции, но и в области тени, где должны применяться дифракционные формулы, которые были получены в предположении идеально гладкой поверхности земли. Наличие неровностей приводит к рассеянию радиоволн, вызывающему дополнительные (по отношению к дифракционным) потери электромагнитной энергии распространяющейся волны. Этот эффект можно интерпретировать как появление некоторых эквивалентных параметров земной поверхности, которые зависят от высоты, взаимного расположения, размеров неровностей, длины волны. Определение этих параметров возможно при сравнении результатов эксперимента с расчетными результатами.

При учете влияния рельефа местности на распространение радиоволн возможны два подхода: статистический, при котором высота, форма и взаимное расположение неровностей являются случайными величинами, и детерминированный, при котором необходимо учитывать конкретные неровности рельефа. Применение того или иного подхода зависит от типа решаемой задачи. Так, при определении зоны уверенного приема передач телевизионного центра следует использовать статистический метод, поскольку в этом случае необходимо обеспечить требуемый уровень сигнала в заданном проценте пунктов приема, расположенных в любом радиальном направлении от передающей антенны. Естественно, что в некотором числе населенных пунктов внутри данной зоны уровень сигнала может оказаться недостаточным, но с этим фактом приходится мириться, ибо получение стопроцентного «охвата» может быть технически недостижимым либо экономически невыгодным. Некоторые особенности реализации статистического подхода к решению задачи были рассмотрены выше.

На ряде реальных трасс (в частности трасс радиосвязи) могут встречаться условия, когда критерий Релея не выполняется и требуется детерминированный подход к решению задачи. Подобные ситуации обычно имеют место в горных местностях, где отдельные хребты имеют большую высоту и крутые склоны. Определение множителя ослабления на таких трассах основывается на аппроксимации реальных препятствий геометрическими телами различной формы – клиновидными, выпуклыми, одиночными либо групповыми.

В качестве примера рассмотрим решение задачи при аппроксимации реального препятствия клиновидным.

Геометрия задачи представлена на рис. 2.16.

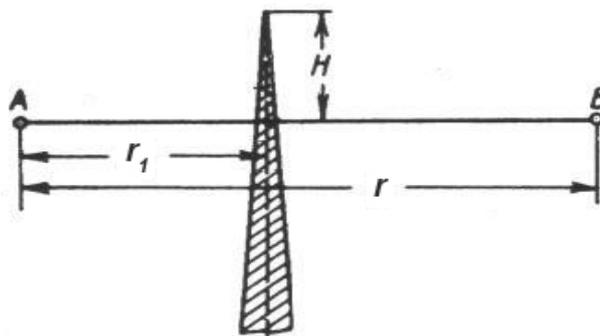


Рис. 2.16. Геометрия задачи дифракция на клиновидном препятствии

Препятствие полагается непрозрачным, бесконечно протяженным в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка.

Высоту препятствия  $H$  принято считать отрицательной, когда она (как показано на рисунке) выше линии визирования  $AB$ , и положительной, когда она ниже линии визирования.

Физически влияние экрана заключается в том, что он перекрывает различные участки кольцевых зон Френеля, которые могли бы быть построены в свободном пространстве в месте расположения препятствия. В

зависимости от соотношения расстояний и высоты, экран будет перекрывать различные по площади участки четных и нечетных зон Френеля, что и приводит к изменениям величины принятого сигнала.

Для вычисления множителя ослабления в этом случае используют методы теории оптической дифракции Френеля, на основании которой можно построить график зависимости  $|V|$  от параметра  $u$  (рис. 2.17). Значение этого параметра определяется выражением

$$u = \frac{\sqrt{2H}}{\sqrt{\lambda r_1 \left(1 - \frac{r_1}{r}\right)}}. \quad (2.40)$$

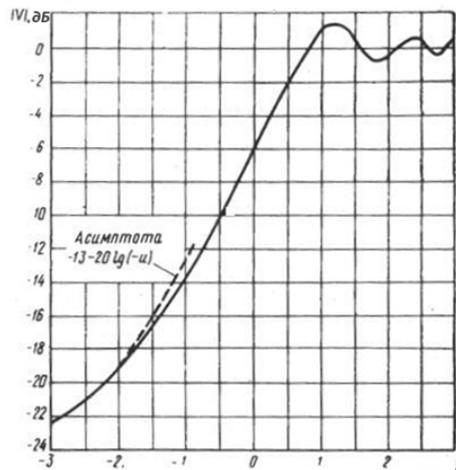


Рис. 2.17. Дифракция радиоволн на клиновидном препятствии

Как можно видеть из графика, при положительных значениях параметра множитель ослабления осциллирует относительно  $|V|_{дБ} = 0$ , причем по мере увеличения  $u$  амплитуда осцилляций убывает. Это объясняется (в связи с увеличением  $H$ ) тем, что препятствием перекрываются участки зон Френеля с большими номерами, влияние которых с увеличением номера зоны уменьшается. При  $u < 1$  величина множителя ослабления монотонно убывает, потому что препятствием экранируется центральная зона Френеля (перекрывается линия визирования).

Рассмотрение более сложных трасс, содержащих несколько препятствий различной формы, базируется на аналогичном физическом подходе, однако вычислительные трудности при этом значительно возрастают. Их изучение не является целью настоящего пособия.

Вопросы для самопроверки:

1. К каким эффектам при распространении радиоволн приводит наличие Земли?
2. Сформулируйте постановку задачи дифракции радиоволн вокруг Земли.
3. Поясните структуру формулы В.А. Фока для множителя ослабления поля свободного пространства.
4. Каким образом осуществляется учет радиофизических свойств земной поверхности в формуле В.А. Фока?
5. Для чего вводится понятие расстояния прямой видимости при использовании формулы В.А. Фока?
6. Поясните физику получения интерференционных формул для множителя ослабления.
7. Проанализируйте особенности поведения множителя ослабления в области интерференции.
8. Поясните физику перехода интерференционных формул в формулу Б.А. Введенского.
9. Сформулируйте условия получения одночленной формулы В.А. Фока для множителя ослабления.
10. Расскажите об инженерных методах расчета множителя ослабления в зонах тени и полутени.
11. Приведите примеры, характеризующие порядок величин радиофизических параметров различных видов земной поверхности.
12. На каких физических принципах базируются методы учета неоднородности радиофизических свойств земной поверхности?
13. Поясните принцип расчета напряженности поля на трассе, состоящей из различных участков подстилающей поверхности.
14. Поясните физику явления береговой рефракции.
15. В чем проявляется влияние рельефа местности на распространение радиоволн?
16. Для чего вводится понятие критерия Релея при распространении радиоволн над шероховатой земной поверхностью?
17. Дайте определение существенного и минимального участков поверхности при отражении радиоволн.
18. Как влияет одиночное препятствие на поведение множителя ослабления?

### **3. ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

#### **3.1 СОСТАВ И СТРОЕНИЕ АТМОСФЕРЫ**

Атмосфера представляет собой газообразную оболочку Земли, простирающуюся до высот порядка 20 000 км. и вращающуюся вместе с ней как единое целое [1], [3]. В состав атмосферы по объему входят: азот – примерно 78 %, молекулярный кислород – 21 %, аргон – 0.93 %, углекислый газ – 0.03 %, водород, метан и некоторые другие газы, содержащиеся в еще меньших количествах. Плотность атмосферы  $N_a$  на данной высоте над уровнем моря, характеризующаяся числом молекул газов, содержащихся в  $\text{см}^3$  воздуха, связана с атмосферным давлением  $p$  соотношением:

$$N_a = p/kT, \quad (3.1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  
 $T$  – абсолютная температура.

В однородной по составу атмосфере давление с высотой изменяется по барометрической формуле

$$p = p_0 \exp(-Mgh / RT). \quad (3.2)$$

Здесь  $p_0$  – давление у поверхности Земли;

$M$  – молекулярный вес газа;

$g$  – ускорение силы тяжести у поверхности Земли;

$h$  – высота над поверхностью Земли;

$R$  – универсальная газовая постоянная.

Плотность атмосферы при постоянной температуре изменяется так же, как и давление, однако в действительности состав воздуха и температура меняются с высотой, что приводит к отклонению распределения давления и плотности атмосферы от значений, даваемых барометрической формулой.

Зависимость плотности атмосферы и ее температуры от высоты над уровнем моря представлена на рис. 3.1.

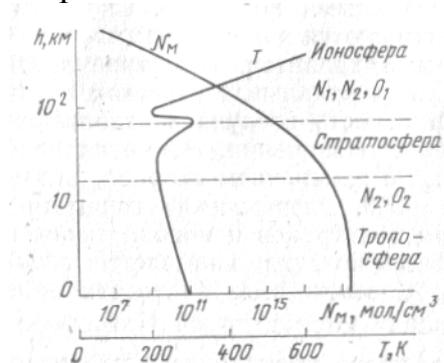


Рис. 3.1. Состав, строение, плотность и температура атмосферы

При исследовании влияния атмосферы Земли на распространение радиоволн принято рассматривать три различающиеся по высоте области: тропосферу, стратосферу и ионосферу. Границы между этими областями выражены не резко и зависят от географической широты места точки наблюдения, сезона и времени суток. Так, тропосфера простирается до высот порядка 15 км в районе экватора, 10 – 12 км в средних широтах и 8 км в приполярных районах. Стратосфера расположена выше тропосферы и достигает высоты 50 – 60 км. Выше стратосферы, вплоть до верхней границы атмосферы, располагается ионосфера.

**Тропосфера.** Состав газа в тропосфере такой же, как и у поверхности Земли. Здесь имеет место постоянное перемешивание газов за счет интенсивных воздушных течений. В тропосфере содержится значительное количество (до 4 % по объему) водяного пара, процентное содержание которого зависит от метеорологических условий и убывает с высотой. Кроме того, в тропосфере постоянно присутствуют различного рода гидрометеоры (туман, дождь, снег, град) а также большое количество частиц пыли, поднятых воздушными течениями с поверхности Земли.

**Стратосфера.** Стратосфера характеризуется теми же параметрами, что и тропосфера. Однако ввиду существенно меньшей плотности газов и практически полному отсутствию влаги, ее влияние на распространение

радиоволн оказывается значительно меньшим и не рассматривается в данном пособии.

**Ионосфера.** В ионосфере под действием ультрафиолетового излучения солнца, происходит диссоциация молекул кислорода и азота, появляются атомарные составляющие этих газов, которые в отсутствии перемешивания располагаются слоями в соответствии с их молекулярным весом. Кроме того, на высоте порядка 60 км начинает проявляться механизм ионизации атомов и молекул газов, в результате чего в области ионосферы появляется большое количество свободных заряженных частиц – электронов и ионов. Процесс ионизации заключается в отрыве одного или нескольких электронов от электронной оболочки атома, что требует определенных затрат энергии для преодоления работы выхода. Среди многих видов ионизации наибольший интерес представляют два – фотоионизация и ударная ионизация.

Фотоионизация имеет место тогда, когда энергия фотонов превышает величину работы выхода электронов. Уравнение баланса в этом случае можно записать в виде:

$$hf = W + \frac{mv^2}{2}, \quad (3.3)$$

где  $h$  – постоянная Планка;

$f$  – частота электромагнитного излучения;

$W$  – работа выхода электрона;

$m$  – масса электрона;

$v$  – скорость движения электрона.

Для ионизации атмосферных газов достаточной энергией обладают электромагнитные колебания, лежащие в ультрафиолетовом и еще более коротковолновых участках спектра солнечного излучения.

При ударной ионизации основным источником энергии является корпускулярное излучение Солнца, проникающее в атмосферу Земли. Уравнение баланса в этом случае выглядит следующим образом:

$$\frac{m^* v^{*2}}{2} = W + \frac{mv^2}{2}, \quad (3.4)$$

где  $m^*, v^*$  – масса и скорость корпускулы соответственно.

Кроме рассмотренных выше, в процессе ионизации атмосферных газов участвует целый ряд других источников, таких как космическая пыль, вторгающаяся в атмосферу, мягкое рентгеновское излучение солнца и других планет. Однако на их долю приходится не более 1 % ионизированных газов. Для аналитического описания процесса ионизации вводят понятие эффективного коэффициента ионизации –  $J_{\text{и}}(h)$ , который определяет количество ионизированных частиц, появившихся в единице объема за единицу времени.

Электронная плотность ионосферы  $N_e$  (количество электронов в  $\text{см}^3$  воздуха) зависит не только от процессов ионизации, приводящих к образованию электронов и ионов, но и от обратного процесса их исчезновения, который называется рекомбинацией. Рекомбинация своим

существованием обязана тепловому движению, при котором частицы, имеющие заряды разных знаков, оказываются так близко друг к другу, что за счет сил электростатического притяжения соединяются, превращаясь в нейтральные молекулы и атомы. В процессе рекомбинации свободные электроны могут соединяться с положительными ионами, либо положительные ионы с отрицательными. Это простейшая рекомбинация, которая имеет место в верхних слоях ионосферы. В более плотных слоях ионосферы существуют и более сложные, ступенчатые, механизмы рекомбинации, при которых, например, электрон притягивается нейтральной молекулой, превращая ее в отрицательный ион, который в свою очередь соединяется с положительным ионом, образуя две нейтральные молекулы. В подобной ситуации для описания процесса рекомбинации вводят понятие эффективного значения коэффициента рекомбинации –  $J_p(h)$ , который определяет количество воссоединившихся частиц в единице объема за единицу времени.

Уравнение баланса ионизации может быть записано тогда в виде:

$$\frac{dN_e(h)}{dt} = J_u(h) - J_p(h)N_e^2(h). \quad (3.5)$$

Оно характеризует изменение во времени электронной плотности на высоте  $h$ .

Если предположить, что атмосфера однородна по газовому составу, ее плотность изменяется в соответствии с барометрической формулой, температура постоянна по высоте, ионизация обусловлена только ультрафиолетовым излучением солнца, то распределение электронной плотности  $N_e$ , в соответствии с уравнением баланса, должно иметь один максимум на конечной высоте. Это легко объяснимо и с физической точки зрения, поскольку интенсивность ионизирующего излучения при уменьшении высоты падает, а плотность атмосферы – растет, поэтому максимум электронной плотности появляется на той высоте, где ионизирующее излучение еще не слишком ослаблено, а плотность нейтральных частиц не очень мала. В реальной ионосфере такая закономерность в среднем и имеет место; этот слой носит название простого слоя (слоя Крючкова – Чепмена) и максимум его расположен на высоте порядка 400 км.

Однако физико-химические и метеорологические особенности строения атмосферы значительно усложняют распределение электронной плотности по высоте. В настоящее время на базе большого количества косвенных измерений, осуществляемых с помощью станций ионосферного зондирования, успешно работающих во всем мире уже более 70 лет, достаточно хорошо изучена так называемая внутренняя ионосфера на высотах от 60 до 400 км. Более высокие области ионосферы изучены значительно хуже, поскольку станции ионосферного зондирования для этих высот применены быть не могут, а прямые измерения электронной плотности с помощью спутников и геодезических ракет не обеспечивают необходимый объем информации.

Во внутренней ионосфере принято выделять ряд областей D, E, F, характеризующихся относительными максимумами электронной плотности, и распределенными по высоте следующим образом: 60 – 90 км – область D; 90 – 160 км – область E; 160 – 400 км – область F. Эти области носят название ионосферных слоев. В зависимости от времени суток количество ионосферных слоев и электронная концентрация в них изменяются (это связано с наличием или отсутствием ионизирующего излучения - освещенностью данной области атмосферы Солнцем). Слои не имеют четко выраженных границ, поэтому для определения толщины слоя используют аналитическую аппроксимацию распределения электронной плотности по высоте. Наиболее часто в пределах регулярных слоев E и F используется параболическая аппроксимация. При этом определяется полутолщина слоя как расстояние от его нижней границы до максимума электронной плотности в нем.

В дневные часы рассматривают четыре ионосферных слоя: D – от 60 до 90 км, E – от 95 до 120 км, F<sub>1</sub> (присутствует в основном в летние месяцы) – от 130 до 220 км, F<sub>2</sub> – от 230 до 400 км. В ночные часы за счет рекомбинации слои D и F<sub>1</sub> исчезают и остаются только E и F (F<sub>2</sub>), электронная концентрация в них существенно уменьшается. Представление о количестве ионосферных слоев и электронной концентрации в них в зависимости от времени суток дает рис. 3.2.

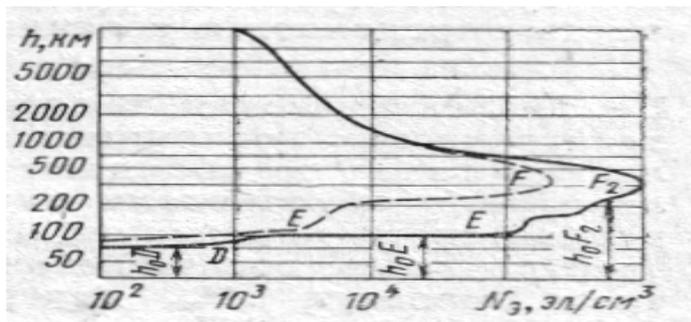


Рис.3.2. Распределение электронной плотности в ионосфере  
Здесь  $h_0$  – расстояние до нижней границы слоя.

Кроме регулярных слоев, в ионосфере на высоте расположения слоя E периодически образуются неоднородности, представляющие собой скопления достаточно большой площади (порядка 100 км<sup>2</sup>) ионизированного газа с повышенной электронной концентрацией, перемещающиеся под действием существующего в ионосфере ветра. Эти образования получили название спорадических слоев E<sub>c</sub>.

В ионосфере также часто наблюдаются ионосферные возмущения, во время которых заметно нарушается структура регулярных образований и электронная концентрация в них. Если эти отклонения продолжаются в течение часа и более, то их называют ионосферными бурями. Различают два типа ионосферных бурь по интенсивности: при первом типе возмущения затрагивают главным образом область F<sub>2</sub> ионосферы; при втором типе – достигают нижних слоев ионосферы, в частности слоя D. Природа

возникновения ионосферных возмущений связана с проникновением в атмосферу Земли корпускулярных потоков, излученных областями возмущений на поверхности Солнца, а также мощного рентгеновского излучения хромосферных вспышек на Солнце.

Ионосферные возмущения тесно связаны с вариациями магнитного поля Земли, которые в свою очередь подразделяются на регулярные и нерегулярные и имеют величину порядка 1 % от постоянной составляющей ( $\approx 40$  А/м) магнитного поля. Регулярные изменения магнитного поля связаны с токами, протекающими в слое Е ионосферы, и имеют периодичность солнечных и лунных суток. Нерегулярные магнитные вариации, носящие название магнитных бурь, появляются при попадании в магнитное поле Земли корпускулярных потоков, «выброшенных» Солнцем. Продолжительность магнитных бурь – от одного до нескольких дней. Если регулярные магнитные вариации имеют наибольшую интенсивность в области магнитного экватора Земли, то нерегулярные – в приполярных широтах.

Сочетание ионосферных возмущений с вариациями магнитного поля носит название ионосферно-магнитных бурь и имеет ярко выраженный широтный характер.

В заключение данного раздела можно сделать вывод о том, что атмосферу Земли следует рассматривать как неоднородную среду, свойства которой регулярно меняются в пространстве и времени. Причем на сравнительно медленные изменения, вызванные метеорологическими, и астрофизическими процессами, накладываются флюктуационные процессы, вызванные образованием, перемещением и исчезновением локальных неоднородностей в атмосфере.

## 3.2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АТМОСФЕРЫ

Особенности распространения радиоволн в атмосфере Земли определяются величиной и характером распределения и поведения в пространстве и во времени электрических параметров этой среды. В число таких параметров входят: относительная диэлектрическая  $\epsilon$  и магнитная  $\mu$  проницаемости и удельная электропроводность  $\gamma$ . Гораздо чаще при изучении распространения радиоволн в атмосфере Земли используют один радиофизический параметр – коэффициент преломления  $n$ .

Значения всех этих параметров зависят от взаимодействия векторов электрического и магнитного полей радиоволны со средой (атмосферой), при котором в последней возникают токи той или иной природы.

### 3.2.1 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТРОПОСФЕРЫ И СТРАТОСФЕРЫ

Прямые измерения и расчеты показывают, что относительная диэлектрическая проницаемость тропосферы близка к единице, относительная магнитная проницаемость принимается равной единице, удельная

электропроводность равна нулю, а полная плотность тока имеет две составляющие: смещения и поляризации.

Рассматривая тропосферу как изотропную среду, состоящую из смеси сухого воздуха и паров воды, можно выразить ее относительную диэлектрическую проницаемость в виде:

$$\varepsilon = 1 + \kappa_3, \quad (3.6)$$

где  $\kappa_3$  – диэлектрическая восприимчивость среды, состоящая из двух слагаемых – диэлектрической восприимчивости сухого воздуха и диэлектрической восприимчивости паров воды. Первое слагаемое характеризует токи смещения, а второе – токи поляризации.

Поскольку механизмы поляризации молекул газа, не имеющих дипольного момента, и паров воды, имеющих дипольный момент под воздействием вектора напряженности электрического поля радиоволны, различны, то, основываясь на экспериментальных измерениях указанных диэлектрических восприимчивостей, выражение для относительной диэлектрической проницаемости тропосферы записывается в виде [1]:

$$\varepsilon = 1 + \frac{1.552 \times 10^{-6}}{T} \left( p + \frac{4810e}{T} \right), \quad (3.7)$$

где  $p$  – атмосферное давление в Па;

$e$  – давление водяных паров в Па;

$T$  – абсолютная температура.

Учитывая то обстоятельство, что коэффициент преломления среды при отсутствии потерь и относительной магнитной проницаемости, равной единице, выражается в виде  $n = \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{(\varepsilon - 1) + 1} = 1 + (\varepsilon - 1)/2$ , выражение для  $n$  приобретает вид:

$$n = 1 + \frac{0.776 \times 10^{-6}}{T} \left( p + \frac{4810e}{T} \right). \quad (3.8)$$

Как можно видеть из (3.8), коэффициент преломления очень мало отличается от единицы, поэтому для удобства вычислений вводят понятие приведенного коэффициента преломления или так называемый индекс рефракции  $N$ .

$$N = (n - 1) \times 10^6. \quad (3.9)$$

Индекс рефракции, измеряемый в  $N$ -единицах, так же как температура, давление и влажность изменяется с высотой. Для описания характера изменения индекса рефракции используют различные модели. Основным параметром этих моделей является зависимость среднего профиля индекса рефракции от высоты. Дополнительно принято рассматривать наличие отклонений от среднего, вызванных слоистыми неоднородностями и турбулентными флюктуациями среды. Поскольку метеорологические параметры весьма изменчивы, то при изучении распространения радиоволн в тропосфере принята модель, которая носит название нормальной тропосферы и соответствует ее среднему состоянию. В этой модели давление, равное 0.01 МПа у поверхности Земли, убывает с высотой на 12 кПа/км; температура у поверхности Земли  $T = 288$  К убывает с высотой на 5.5 град/км;

относительная влажность равна 60 % и не меняется с высотой. Верхняя граница тропосферы при этом равна 11 км.

Для нормальной тропосферы средний профиль индекса рефракции аппроксимируют экспоненциальной зависимостью:

$$N(h) = N_0 \exp(-ah), \quad (3.10)$$

где  $N_0$  – индекс рефракции у поверхности Земли (в зависимости от метеорологических условий может лежать в пределах 250 – 380 N-ед);

$a$  – показатель экспоненты, лежащий в интервале 0.1 – 0.14 км<sup>-1</sup>.

Гораздо чаще при изучении распространения радиоволн у поверхности Земли до высот 2-3 км используют более простую, линейную аппроксимацию зависимости индекса рефракции от высоты:

$$N(h) = N_0 + gh, \quad (3.11)$$

где  $g = dN/dh$  – градиент индекса рефракции, равный для нормальной тропосферы – 0.04 N-ед/м.

Слоистые неоднородности, как отмечалось выше, представляют собой отклонения от среднего профиля  $N$ . Наиболее характерным примером таких неоднородностей могут служить облака. Эти отклонения могут иметь толщину от нескольких метров до нескольких километров и протяженность от десятков до сотен километров. Интенсивность слоя (величина отклонения  $N$  от среднего значения на данной высоте) может изменяться в пределах 20 – 2 N-ед на высотах до 1-го и 4-5 километров соответственно. Слоистые неоднородности могут перемещаться в пространстве со скоростями от 2 до 30 м/с.

Флюктуации индекса рефракции, вызванные турбулентным движением воздуха, определяются средним квадратичным отклонением от среднего профиля – интенсивностью  $\overline{\Delta N^2}$  (или  $\overline{\nabla \varepsilon^2}$ ) и масштабом турбулентности  $L$ . Эти характеристики описываются статистически. Их величины лежат в диапазоне значений:  $\overline{\Delta N^2} = 10^{-3} - 10^{-4}$ ,  $L = 0.01 - 500$  м. Физика возникновения флюктуаций состоит в том, что в результате турбулентного движения воздуха в тропосфере постоянно образуются вихри различных размеров, которые последовательно разбиваются на более мелкие. Этот процесс продолжается до тех пор, пока в самых маленьких вихрях кинетическая энергия вращения не превратится в тепло за счет преодоления сил вязкости, и происходит во всей толще тропосферы непрерывно, что приводит к локальным отклонениям (флюктуациям) диэлектрической проницаемости (коэффициента преломления) от ее среднего значения. Таким образом, в каждый момент времени в тропосфере существуют области, показатель преломления в которых отличается от показателя преломления в соседних областях. Эти области носят название неоднородностей, и на них происходит рассеяние энергии радиоволн в различных направлениях.

Описанные особенности поведения индекса рефракции при изменении высоты над поверхностью Земли представлены на рис. 3.3.

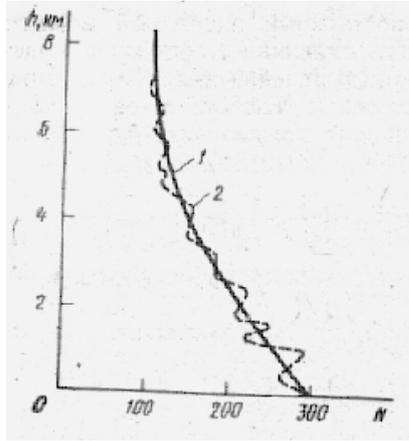


Рис.3.3. Изменение индекса рефракции с высотой  
1 – средний профиль, 2 – изменения за счет неоднородностей.

Электрические параметры стратосферы повторяют параметры тропосферы, однако величина их и изменения в пространстве и во времени выражены гораздо меньше. Их влияние на распространение радиоволн незначительно.

### 3.2.2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИОНОСФЕРЫ

Электрические параметры ионосферы в значительной мере зависят от наличия в ней свободных электронов и ионов, обязанных своим существованием процессу ионизации газов атмосферы. В соответствии с этим, электрические свойства ионосферы, в отличие от тропосферы, определяются не только диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , но и удельной электропроводностью  $\gamma$ . Относительная магнитная проницаемость ионосферы, как и тропосферы, полагается равной единице.

Число свободных электронов, содержащихся в одном  $\text{см}^3$  воздуха, определяет электронную плотность ионосферы  $N_e$ . Количество положительных  $N_u^+$  и отрицательных  $N_u^-$  ионов в единице объема определяют ионную плотность. Без наличия каких-либо внешних воздействий ионосфера является электрически нейтральной средой.

В ионосфере полная плотность тока состоит из плотностей тока смещения и так называемого конвекционного тока. Плотностью тока поляризации обычно пренебрегают ввиду малой концентрации нейтральных частиц.

Выражение для электрических параметров ионосферы можно получить, составив уравнение движения электрона как материальной частицы с учетом его соударений с нейтральными частицами и ионами под действием силы Кулона, вызванной вектором напряженности электрического поля радиоволны.

Опуская промежуточные выводы (их можно найти в [6]) запишем выражение для комплексной относительной диэлектрической проницаемости ионизированного газа:

$$\varepsilon = 1 - \frac{N_e e^2}{\varepsilon_0 m_e (\omega^2 + \nu^2)} - i \frac{N_e e^2 \nu}{\varepsilon_0 \omega m_e (\omega^2 + \nu^2)}, \quad (3.12)$$

где  $m_e = 9.106 \times 10^{-31}$  кг – масса электрона;

$e$  – заряд электрона;

$\nu$  – количество соударений электрона с молекулами и ионами за одну секунду;

$\omega$  – частота радиоволны;

$\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость свободного пространства.

Из (3.12) можно видеть, что относительная диэлектрическая проницаемость ионосферы равна

$$\varepsilon_{и} = 1 - \frac{N_e e^2}{\varepsilon_0 m_e (\omega^2 + \nu^2)}, \quad (3.13)$$

а удельная электропроводность –

$$\gamma_{и} = \frac{N_e e^2 \nu}{m_e (\omega^2 + \nu^2)}. \quad (3.14)$$

После подстановки в (3.13) и (3.14) численных значений массы и заряда электрона, а также абсолютной диэлектрической проницаемости свободного пространства можно записать:

$$\varepsilon_{и} = 1 - 3190 \frac{N_e}{\omega^2 + \nu^2}; \quad (3.15)$$

$$\gamma_{и} = 2.82 \times 10^{-8} \frac{N_e \nu}{\omega^2 + \nu^2}. \quad (3.16)$$

В тех случаях, когда  $\omega^2 \gg \nu^2$ , а также учитывая  $\omega = 2\pi f$ , получаем

$$\varepsilon_{и} \approx 1 - 80.8 \frac{N_e}{f^2}, \quad (3.17)$$

$$\gamma_{и} \approx 7.17 \times 10^{-10} \frac{N_e \nu}{f^2}. \quad (3.18)$$

В этих выражениях  $f$  – частота (выражена в Гц), а  $N_e$  – в  $1/\text{м}^3$ .

На низких частотах  $\omega^2 \ll \nu^2$  диэлектрическая проницаемость и проводимость ионосферы не зависят от частоты радиоволны.

Таким образом:

- относительная диэлектрическая проницаемость ионосферы меньше единицы, т. е. диэлектрическая проницаемость ионосферы меньше диэлектрической проницаемости свободного пространства;

- диэлектрическая проницаемость зависит от электронной плотности и, следовательно, ионосфера является электрически неоднородной средой, и подвержена тем же вариациям, что и вариации электронной плотности;

- $\varepsilon_{и}$  зависит от частоты радиоволны, т. е. ионосфера является дисперсионной средой; с повышением частоты проявляются инерционные свойства электронов, второе слагаемое в (3.15), (3.17) уменьшается и диэлектрическая проницаемость ионосферы стремится к диэлектрической проницаемости свободного пространства;

- в области внутренней ионосферы, где электронная плотность увеличивается с высотой, диэлектрическая проницаемость с высотой убывает;
- на некоторой частоте, которая носит название собственной, или частоты Ленгмюра, диэлектрическая проницаемость ионосферы обращается в ноль; эта частота равна

$$\omega_0^2 = e^2 N_e / \epsilon_0 m_e; \quad (3.19)$$

с учетом (3.17) можно записать выражение для частоты Ленгмюра в виде:  
 $f_0 = \sqrt{80.8 N_e}$  ;

при  $\omega < \omega_0$  диэлектрическая проницаемость ионосферы становится меньше нуля, и распространение радиоволн в ней прекращается; амплитуда радиоволны затухает по экспоненциальному закону;

- проводимость ионосферы зависит от электронной концентрации и числа соударений электронов с нейтральными частицами и ионами и различна на различных высотах; наибольшая проводимость имеет место в слое D и нижней части слоя E ионосферы;

- проводимость ионосферы, а следовательно и поглощение в ней энергии радиоволн, тем меньше, чем выше частота при  $\omega^2 \gg \nu^2$ , что объясняется уменьшением кинетической энергии, которая теряется при соударениях из-за инерции электронов.

Строго говоря, на величину диэлектрической проницаемости и проводимости ионосферы должны оказывать влияние положительные и отрицательные ионы. Учет этого влияния осуществляется таким же образом, как и учет влияния электронов. Однако ввиду того, что масса любого иона в ионосфере значительно превышает массу электрона (масса атома водорода в 1840 раз, а масса атома азота в 258000 раз больше массы электрона), влиянием ионов можно пренебречь. Лишь в тех случаях, когда ионов в газе значительно больше, чем электронов (при больших плотностях газа), влияние ионов необходимо учитывать. В ионосфере Земли подобная ситуация встречается крайне редко.

Рассмотренные выше электрические параметры ионосферы имеют место в идеализированных условиях изотропной ионосферы без учета влияния магнитного поля Земли. Наличие постоянного магнитного поля Земли существенно усложняет картину распределения и поведения электрических параметров ионосферы, придавая ей свойства анизотропной среды, т. е. среды, свойства которой при различных направлениях распространения в ней радиоволны различны.

Физически это объясняется тем, что в присутствии магнитного поля траектория движения электронов искривляется, поскольку на электрон кроме силы Кулона, направленной по направлению вектора напряженности электрического поля радиоволны, начинает действовать сила Лоренца, ориентированная перпендикулярно вектору скорости движения электрона и направлению силовых линий магнитного поля:

$$\vec{F}_L = e\mu_0[\vec{v} \times \vec{H}_z]. \quad (3.20)$$

Здесь  $\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость среды;

$\vec{v}$  – вектор скорости электрона;

$\vec{H}_3$  – вектор напряженности магнитного поля Земли.

Результатом действия этих сил является то, что электроны стремятся перемещаться по круговым (винтовым) траекториям вокруг силовых линий магнитного поля. Если считать, что скорость электрона перпендикулярна силовым линиям магнитного поля, то уравнение его движения по окружности можно записать в виде:

$$m\omega_c = e\mu_0 H_3,$$

откуда следует

$$\omega_c = \frac{e\mu_0 H_3}{m}, \quad (3.21)$$

где  $\omega_c$  – частота вращения электрона.

Эта частота носит название гиромагнитной (циклотронной, ларморовской) частоты.

Из (3.21) можно записать:

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \frac{e\mu_0 H_3}{m}. \quad (3.22)$$

Гиромагнитная частота зависит от массы заряженной частицы и напряженности магнитного поля, поэтому для ионосферы существует две частоты: электронная и ионная. Электронная частота (при  $H_3 \approx 40$  А/м) равна 1.4 МГц (длина волны  $\lambda = 214$  м), а ионная – при этих же условиях – 54 Гц ( $\lambda = 6000$  км). Если частота радиоволны близка к этим частотам, то говорят о существовании гиромагнитного резонанса, при котором происходит интенсивное поглощение энергии радиоволны.

Из (3.20) следует, что величина силы Лоренца зависит от угла между векторами скорости электрона и силовых линий магнитного поля. В общем случае величина этого угла может изменяться от 0 до 90° в зависимости от направления распространения радиоволны относительно силовых линий магнитного поля Земли. В этой связи целесообразно рассмотреть два предельных случая:

- радиоволна распространяется (вектор Пойнтинга направлен) по направлению силовых линий магнитного поля Земли (продольное распространение); в этом случае вектор напряженности электрического поля при любой поляризации радиоволны оказывается перпендикулярным силовым линиям магнитного поля Земли;

- радиоволна распространяется (вектор Пойнтинга направлен) перпендикулярно направлению силовых линий магнитного поля Земли (поперечное распространение); в этом случае вектор напряженности электрического поля, в зависимости от поляризации, может иметь как продольные, так и поперечные относительно силовых линий магнитного поля Земли составляющие.

В первом случае вектор скорости электрона направлен перпендикулярно силовым линиям магнитного поля Земли и влияние последнего всегда имеет

место. Во втором случае имеются две составляющие скорости электрона: параллельная, при которой влияние магнитного поля отсутствует, и перпендикулярная, при которой это влияние имеет место.

Рассмотренные ситуации принято описывать с помощью двух радиофизических параметров ионосферы: коэффициента преломления и коэффициента поглощения.

Коэффициент преломления при продольном распространении радиоволны приобретает два значения:

$$n_o = \sqrt{1 - \frac{\omega_o^2}{\omega(\omega + \omega_c)}}, \quad (3.23)$$

$$n_n = \sqrt{1 - \frac{\omega_o^2}{\omega(\omega - \omega_c)}}. \quad (3.24)$$

В соответствии с этим радиоволна расщепляется на две составляющие, имеющие различные фазовые скорости, – обыкновенную и необыкновенную.

Коэффициент поглощения при продольном распространении выражается в виде:

$$\alpha^{o,n} \approx \frac{\nu}{2c} \frac{\omega_o^2}{(\omega \pm \omega_c)^2}. \quad (3.25)$$

Здесь  $c$  – скорость света, а знаки “+” и “–” относятся к обыкновенной и необыкновенной волнам соответственно.

При поперечном распространении коэффициент преломления также имеет два значения:

$$n_o = \sqrt{1 - \frac{\omega_o^2}{\omega^2}}, \quad (3.26)$$

не отличающийся от коэффициента преломления изотропной ионосферы, и

$$n_n = \sqrt{1 - \frac{\omega_o^2}{\omega^2} \frac{\omega^2 - \omega_o^2}{\omega^2 - \omega_o^2 - \omega_c^2}}. \quad (3.27)$$

Коэффициент поглощения при поперечном распространении выражается в виде:

$$\alpha^o \approx \frac{\nu}{2c} \frac{\omega_o^2}{\omega^2} \quad (3.28)$$

для обыкновенной волны и

$$\alpha^n \approx \frac{\nu}{2c} \frac{\omega_o^2}{\omega^2} \frac{1 + (\frac{\omega_c}{\omega})^2}{[1 - (\frac{\omega_c}{\omega})^2]^2} \quad (3.29)$$

для необыкновенной волны.

В заключение данного раздела отметим, что в анизотропной ионосфере коэффициенты преломления и поглощения зависят от величины  $\omega \pm \omega_c$ . Если  $\omega \gg \omega_c$  значения коэффициентов преломления и поглощения обыкновенной и необыкновенной волн совпадают с соответствующими значениями для изотропной ионосферы, т. е. влиянием магнитного поля Земли можно пренебречь. Практически это приближение используется на частотах выше 100 МГц.

### 3.3 ВЛИЯНИЕ ТРОПОСФЕРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Следует иметь в виду, что при изучении влияния тропосферы на распространение радиоволн основное внимание уделяется волнам УКВ диапазона, поскольку влиянием тропосферы на распространение более длинных радиоволн обычно пренебрегают.

Как было показано выше, тропосфера является неоднородной средой, электрические параметры которой изменяются в пространстве и во времени. При рассмотрении особенностей распространения радиоволн в подобных средах основное внимание уделяется двум наиболее важным ситуациям: распространению в плавно неоднородных средах и распространению в неоднородных средах, где величина отклонения диэлектрической проницаемости (коэффициента преломления, индекса рефракции) мала по сравнению со средним значением соответствующей величины.

В первом случае влияние среды заключается в плавном изменении направления распространения волны – рефракции. Наиболее адекватным методом изучения процессов распространения радиоволн при этом является метод геометрической оптики.

Во втором случае влияние среды приводит к рассеянию радиоволн. Наиболее адекватными методами здесь являются методы теории возмущения.

#### 3.3.1 РЕФРАКЦИЯ РАДИОВОЛН В ТРОПОСФЕРЕ

Рассмотрим механизм возникновения рефракции и определим радиус траектории радиоволны, полагая, что изменение электрических параметров тропосферы соответствует нормальной тропосфере (индекс рефракции уменьшается с высотой). Для этого разобьем условно всю толщу тропосферы по высоте на бесконечно большое число сферических, концентрических земной поверхности слоев (см. рис. 3.4), таких, чтобы в пределах каждого диэлектрическая проницаемость могла рассматриваться как постоянная величина. Тогда в каждом слое траектория волны будет прямолинейной, а при переходе от слоя к слою происходит ее преломление. Причем поскольку волна (при распространении от поверхности Земли) переходит из оптически более плотной в оптически менее плотную среду (т. к. диэлектрическая проницаемость убывает с высотой), то отклонение траектории происходит в направлении границы раздела слоев. Если число слоев разбиения устремить к бесконечности, то траектория волны превращается в плавную кривую.

Уравнение траектории волны в сферически неоднородной среде в приближении геометрической оптики имеет вид:

$$(a + h)n(h) \sin \phi(h) = (a + h_0)n(0) \sin \phi_0, \quad (3.30)$$

где  $n(h) = \sqrt{\varepsilon(h)}$  – коэффициент преломления на высоте  $h$ ; остальные обозначения показаны на рис. 3.4.

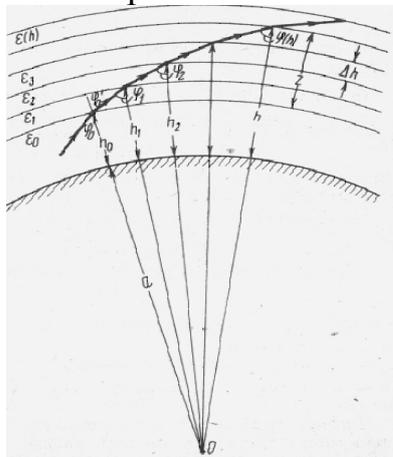


Рис. 3.4. Рефракция в сферически слоистой среде

Если считать, что профиль индекса рефракции для приземного слоя тропосферы, как отмечалось выше, описывается линейной зависимостью, то траектория волны является примерно дугой окружности, радиус которой  $\rho$  определяется вертикальным градиентом индекса рефракции (диэлектрической проницаемости, коэффициента преломления):

$$\rho = \frac{10^6}{-\frac{\partial N}{\partial h}}. \quad (3.31)$$

В частном случае нормальной тропосферы радиус кривизны является величиной положительной, так как градиент индекса рефракции отрицателен и траектория распространения волны направлена выпуклостью вверх. Поскольку градиент  $N$  в нормальной тропосфере равен  $-0.04$  Нед/м, то  $\rho = 25 \times 10^6$  м (25000 км).

Для учета влияния атмосферной рефракции на величину напряженности поля при распространении радиоволн вблизи поверхности Земли оказывается удобным ввести понятие эквивалентного радиуса Земли. Он вводится исходя из предположения, что распространение радиоволн происходит в однородной тропосфере по прямолинейным траекториям с постоянной скоростью, но над сферической поверхностью большего радиуса, так, чтобы относительная высота траектории над поверхностью оставалась неизменной. Графически подобный подход представлен на рис. 3.5.

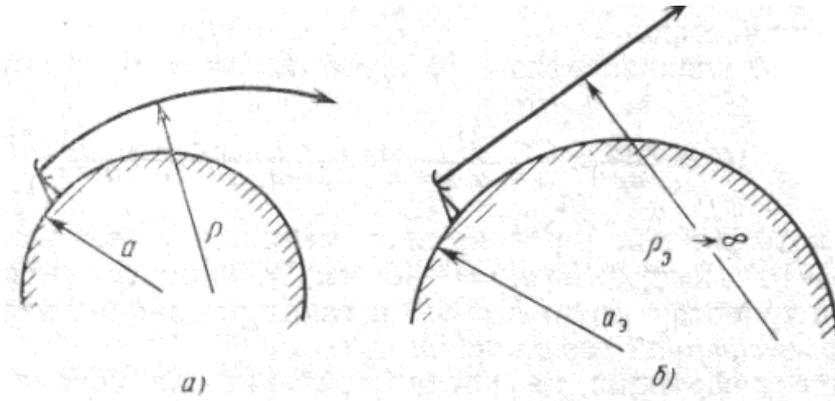


Рис.3.5. Введение эквивалентного радиуса Земли  
 а - истинная траектория, б – спрямленная траектория

Выражение для эквивалентного радиуса Земли, полученное с использованием рассмотренного подхода, имеет вид:

$$a_э = \frac{a}{1 + a \frac{\partial N}{\partial h} \times 10^{-6}}, \quad (3.32)$$

где  $a_э$  – эквивалентный радиус Земли;

$a = 6370$  км – истинный радиус Земли.

Замена истинного радиуса Земли на эквивалентный позволяет использовать в реальных условиях все соотношения для расчета напряженности поля либо множителя ослабления, полученные ранее в предположении однородной тропосферы. В частности, выражение для определения расстояния прямой видимости (2.11), которое является базовым для многих расчетных формул, принимает вид:

$$Rв = \sqrt{2a_э} (\sqrt{h_n} + \sqrt{h_{np}}). \quad (3.33)$$

При использовании внесистемных единиц для условий нормальной тропосферной рефракции, при которой эквивалентный радиус Земли равен 8500 км,

$$Rв(км) = 4.12(\sqrt{h_n(м)} + \sqrt{h_{np}(м)}). \quad (3.34)$$

Если сравнить выражения (2.12) и (3.34), то окажется, что нормальная тропосферная рефракция увеличивает дальность прямой видимости на 15 %.

Под влиянием различных метеорологических условий в реальной тропосфере профиль индекса рефракции может значительно отличаться от стандартного профиля. В связи с этим принято рассматривать несколько типичных видов тропосферной рефракции, которые классифицируются по величине и знаку градиента индекса рефракции (диэлектрической проницаемости, коэффициента преломления):

- при  $\frac{\partial N}{\partial h} > 0$  рефракция называется отрицательной, или субрефракцией,

радиус кривизны траектории волны  $\rho$  отрицателен, траектория направлена выпуклостью вниз, эквивалентный радиус Земли меньше истинного радиуса;

- при  $\frac{\partial N}{\partial h} = 0$  рефракция отсутствует,  $\rho$  стремится к бесконечности,

траектория волны – прямолинейна, эквивалентный радиус равен истинному радиусу;

- при  $\frac{\partial N}{\partial h} < 0$  рефракция называется положительной, радиус кривизны

траектории волны  $\rho$  положителен, траектория направлена выпуклостью вверх.

Положительная рефракция, в свою очередь, подразделяется на:

- пониженную, когда  $- 0.04 N \text{ ед/м} < \frac{\partial N}{\partial h} < 0$ , эквивалентный радиус

больше истинного, но меньше 8500 км;

- нормальную, когда  $\frac{\partial N}{\partial h} = - 0.04 N \text{ ед/м}$ , эквивалентный радиус Земли

$a_s \approx 8500$  км;

- повышенную, когда  $- 0.157 N \text{ ед/м} < \frac{\partial N}{\partial h} < - 0.04 N \text{ ед/м}$ , эквивалентный

радиус больше 8500 км;

- критическую, когда  $\frac{\partial N}{\partial h} = - 0.157 N \text{ ед/м}$ , при этом радиус траектории

волны равен истинному радиусу Земли, эквивалентный радиус равен бесконечности;

- сверхрефракцию, когда  $\frac{\partial N}{\partial h} < - 0.157 N \text{ ед/м}$ , при этом радиус

траектории волны меньше радиуса Земли, эквивалентный радиус отрицателен.

При отрицательной рефракции (субрефракции) радиоволна удаляется от поверхности Земли, при этом дальность действия наземных радиотехнических систем уменьшается. Возникновение отрицательной рефракции чаще всего связано с появлением туманов на трассе распространения радиоволн.

При положительной (пониженной, нормальной и повышенной) рефракции траектория волны приближается к поверхности Земли, дальность действия радиотехнических систем увеличивается. Подобные виды рефракции чаще всего присутствуют в тропосфере.

Критическая рефракция характеризуется тем, что радиоволны распространяются параллельно поверхности Земли на сколь угодно большие расстояния (если не рассматривать влияние других факторов). Условия возникновения критической рефракции и тем более их существование на всей трассе встречаются крайне редко, и данный вид рефракции практического значения не имеет.

Сверхрефракция характеризуется тем, что практически вся энергия электромагнитной волны сосредоточивается в слое тропосферы, концентричном относительно земной поверхности, поэтому распространение

радиоволн при сверхрефракции принято называть волноводным распространением. Волноводное распространение радиоволн возникает чаще всего над обширными акваториями морей и океанов из-за резкого изменения влажности по мере увеличения высоты либо из-за переноса теплых воздушных масс с суши на море, а также над сушей при температурных инверсиях, которые появляются после захода солнца за счет резкого охлаждения земной поверхности. Физика этого явления заключается в том, что при быстром падении индекса рефракции на некоторой высоте над земной поверхностью создаются условия, при которых происходит полное внутреннее отражение электромагнитной энергии и радиоволна возвращается обратно к поверхности с последующим отражением от нее. Многократное повторение этих процессов приводит к сверхдальному распространению радиоволн, что может иметь как положительное (увеличение дальности действия радиотехнических систем), так и отрицательное (взаимные помехи в радиосистемах, работающих на одинаковых или близких радиочастотах) значение. При определенном характере изменения индекса рефракции с высотой (наличие двух областей, где градиент меньше  $-0.157 N$  ед/м) в тропосфере могут образовываться также приподнятые волноводы. В отличие от металлического волновода, стенки тропосферного являются полупрозрачными и электромагнитное поле проникает за пределы волновода. Однако, по аналогии с металлическим волноводом, для тропосферного волновода можно ввести понятие критической длины волны, связанной с его высотой соотношением [7]

$$\lambda_{кр} \approx 8 \times 10^{-4} h_0^{3/2}. \quad (3.35)$$

Поскольку высота тропосферных волноводов лежит в пределах нескольких десятков метров, то волноводное распространение возможно только в сверхвысокочастотном (миллиметровые, сантиметровые, дециметровые волны) диапазоне волн. Рисунок 3.6 иллюстрирует процесс распространения радиоволн в тропосферном волноводе. Слева на этом же рисунке показан соответствующий профиль коэффициента преломления.

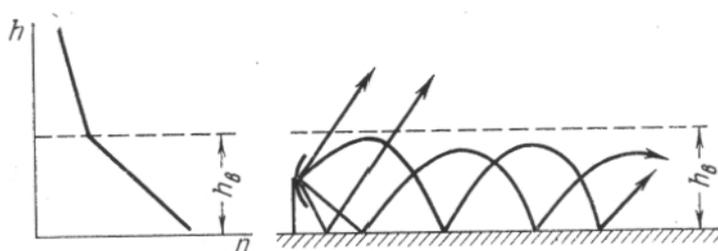


Рис. 3.6. Волноводное распространение радиоволн

### 3.3.2 ДАЛЬНЕЕ ТРОПОСФЕРНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ (ДТР)

Многочисленные экспериментальные данные показывают, что уровень поля в диапазоне УКВ за горизонтом значительно превышает уровни, предсказанные дифракционной теорией, даже с учетом нормальной атмосферной рефракции. Отличительной особенностью таких полей является наличие замираний сигнала. Это свидетельствует о том, что поле за горизонтом создается не волнами, распространяющимися вдоль поверхности Земли, а волнами, на распространение которых оказывает влияние турбулентность тропосферы.

Механизм дальнего тропосферного распространения состоит в том, что электромагнитная волна вызывает появление токов поляризации в элементарных объемах турбулентных неоднородностей, каждый из которых можно рассматривать в качестве элементарного диполя, излучающего электромагнитную энергию. Результирующее поле в заданном направлении представляет собой суперпозицию полей элементарных диполей. Теория механизма ДТР достаточно хорошо развита в работах Буккера и Гордона [3], получивших в приближении Борна выражение для коэффициента рассеяния  $\alpha_p$ , с помощью которого можно найти величину плотности потока энергии  $S_p$ , рассеянной некоторым объемом тропосферы  $V$

$$\alpha_p = \frac{\overline{\nabla \varepsilon^2} \left( \frac{2\pi L}{\lambda} \right)^2 \sin^2 \gamma}{\lambda \left[ 1 + \left( \frac{4\pi L}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \right)^2 \right]^2}; \quad (3.36)$$

$$S_p = \int_V \frac{\alpha_p S_{перв} dV}{r^2}. \quad (3.37)$$

В этих выражениях  $\overline{\nabla \varepsilon^2}$  – средний квадрат разности случайной функции, описывающей поведение диэлектрической проницаемости тропосферы в двух различных точках пространства – структурная функция;

$L$  – внешний масштаб турбулентности;

$\lambda$  – длина радиоволны;

$\gamma, \theta, r$  – углы и расстояние, смысл которых понятен из рис. 3.7;

$S_{перв}$  – плотность потока энергии волны, падающей на каждый элемент рассеивающего объема  $\Delta V$ .

Обычно плотность потока энергии рассеяния тропосферы относят к плотности потока энергии в свободном пространстве, созданного в той же точке при тех же параметрах радиосистемы:

$$\frac{S_p}{S_0} = S^2 \int_V \frac{\alpha_p}{r_0^2 r^2} dV. \quad (3.38)$$

Здесь  $S$  – расстояние между корреспондентами в свободном пространстве вдоль поверхности Земли.

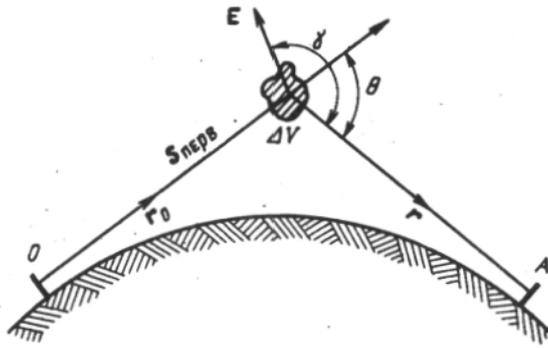


Рис. 3.7. К определению рассеивающего объема

При проведении расчетов уровня поля ДТР в практических случаях необходимо учитывать некоторые характерные особенности распространения и приема рассеянного излучения. К этим особенностям относятся:

- зависимость механизма рассеяния энергии радиоволн от ширины диаграммы направленности антенных систем;
- зависимость поля рассеяния от расстояния между корреспондентами;
- потери усиления антенных систем;
- зависимость принимаемой мощности от длины волны;
- наличие многолучевого распространения.

Зависимость поля рассеяния ДТР от ширины диаграммы направленности антенн связана с определением размеров области интегрирования  $V$  в (3.38). В предположении, что антенны расположены вблизи поверхности Земли и их диаграммы направленности касаются поверхности, эффективно рассеивающий объем тропосферы находится на середине трассы. Если размеры этого объема малы по сравнению с расстоянием между корреспондентами, то можно положить  $r = r_0 = S/2$  и тогда (3.38) преобразуется к виду:

$$\frac{S_p}{S_0} \approx \frac{16}{S^2} \int_V a_p \partial V. \quad (3.39)$$

При узких диаграммах направленности антенн размер области интегрирования (рассеивающего объема) определяется общим объемом пространства, который образуется при пересечении главных лепестков диаграмм (см. рис. 3.8, б). При этом коэффициент рассеяния  $a_p$  полагается неизменным в пределах всего объема.

В случае широких диаграмм направленности (см. рис. 3.8, а) размер области интегрирования определяется таким образом, чтобы на ее границах значение коэффициента рассеяния равнялось половине его максимального значения.

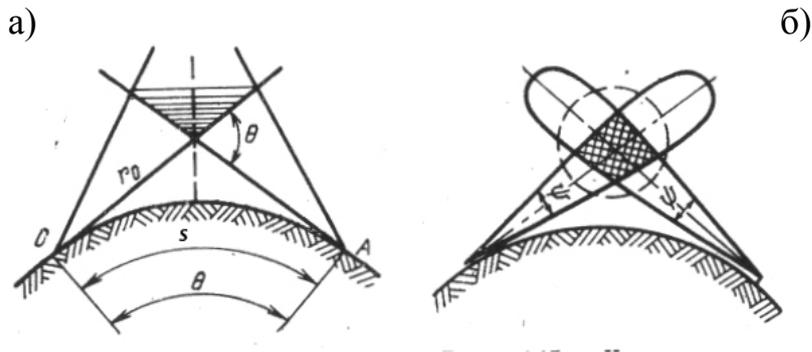


Рис. 3.8. Определение рассеивающего объема в зависимости от ширины диаграммы направленности антенн  
 а - широкие диаграммы, б – узкие диаграммы

Зависимость поля рассеяния от расстояния связана с изменением угла рассеяния  $\theta$ , который определяется выражением (см. рис. 3.8):

$$\theta = S/a. \quad (3.40)$$

Здесь, как и раньше,  $a$  – радиус Земли.

Коэффициент рассеяния пропорционален  $\theta^{-11/3} = (a/S)^{11/3}$ , и тогда при широких диаграммах направленности

$$S_p = S_0 \times \frac{a^{5/3}}{S^{11/3}}, \quad (3.41)$$

при узких диаграммах

$$S_p = S_0 \times \frac{a^{11/3}}{S^{20/3}}. \quad (3.42)$$

Из приведенных выражений следует, что поле рассеяния убывает с увеличением расстояния по некоторому степенному закону, зависящему от ширины диаграммы направленности антенн.

Потери усиления антенн связаны с тем обстоятельством, что, в отличие от свободного пространства, при ДТР диаграмма направленности формируется в случайно неоднородной среде, которая вызывает флуктуации амплитуд и фаз электромагнитных колебаний. Причем на характеристики антенн, работающих в режиме передачи (облучающих рассеивающий объем), эти флуктуации оказывают меньшее влияние, поскольку угол рассеяния  $\theta$  в этом направлении мал. Потери усиления и изменения диаграммы направленности при этом незначительны.

В случае приемных антенн ситуация иная, так как на раскрыт приемной антенны, расположенной за горизонтом, приходит излучение, рассеянное под большими углами  $\theta$ , и флуктуации амплитуд и фаз поля могут быть заметными. Поэтому потери усиления приемных антенн и расширение диаграммы направленности оказываются большими. На практике обычно учитывают только потери усиления приемных антенн.

При дальнем тропосферном распространении радиоволн отношение мощности принятого рассеянного излучения к мощности в свободном пространстве, при прочих равных условиях связано с длиной волны. Это

объясняется тем, что при одинаковой зависимости коэффициента рассеяния от длины волны –  $a_p \approx \lambda^{-1/3}$  отношение мощностей определяется объемом рассеяния. Поскольку при широких диаграммах направленности антенн рассеивающий объем не зависит от длины волны, то

$$\frac{P_p}{P_0} \approx \lambda^{-1/3}. \quad (3.43)$$

В случае узких диаграмм, когда рассеивающий объем пропорционален  $\lambda^3$ ,

$$\frac{P_p}{P_0} \approx \lambda^{8/3}. \quad (3.44)$$

Таким образом, в диапазоне метровых и дециметровых волн, где диаграммы направленности достаточно широки, рассмотренное отношение убывает с увеличением длины волны, а в диапазоне сантиметровых и более коротких волн при узких диаграммах направленности это отношение убывает с уменьшением длины волны.

При дальнем тропосферном распространении проявляется эффект многолучевости, обусловленный тем, что длины лучей, проходящих через различные участки рассеивающего объема, различны. Это приводит к искажениям формы передаваемых сигналов, и рассеивающий объем может рассматриваться как четырехполосник, обладающий ограниченной полосой пропускания. На практике ширина полосы пропускания систем дальнего тропосферного распространения составляет несколько мегагерц.

В заключение данного раздела отметим, что эффекты дальнего тропосферного распространения радиоволн за счет переизлучения электромагнитной энергии слоистыми неоднородностями тропосферы носят случайный характер и использование их в практических целях достаточно проблематично. При этом количественные оценки уровня рассеянного поля зависят от формы и размеров неоднородности, ее расположения относительно корреспондентов, длины волны, распределения диэлектрической проницаемости. В реальных условиях в атмосфере присутствует одновременно большое количество подобных неоднородностей, что еще более усложняет процессы рассеяния.

### 3.3.3. ОСЛАБЛЕНИЕ РАДИОВОЛН В ТРОПОСФЕРЕ

Наличие в тропосфере Земли молекул воздуха, паров воды, гидрометеоров (туман, дождь, град, снег), а также частиц пыли, поднятой с поверхности, вызывает ослабление уровня сигнала в процессе распространения радиоволн. Принято рассматривать два механизма ослабления – поглощение и рассеяние. При поглощении энергия электромагнитной волны преобразуется в тепловую энергию, при рассеянии – перераспределяется в пространстве в направлениях, отличных от заданного. Ослабление в тропосфере имеет заметную величину лишь в диапазонах сантиметровых, миллиметровых и оптических радиоволн.

Наибольшее затухание радиоволны испытывают в дождях и туманах. Это связано с тем, что поле радиоволны вызывает в каждой капле появление тока поляризации, который, во-первых, приводит к тепловым потерям энергии и, во-вторых, является источником вторичного рассеянного излучения. Затухание зависит от длины волны электромагнитного излучения и интенсивности осадков. Так, укорочение длины волны и увеличение интенсивности дождя приводит к увеличению затухания.

В диапазонах миллиметровых и оптических радиоволн появляется дополнительное поглощение, связанное с механизмом резонансного взаимодействия радиоволн с молекулами воды и кислорода на частотах, близких к частотам их собственных колебаний. При данном механизме поглощения энергия волны вызывает изменение энергетического состояния молекул и атомов. Этот эффект носит селективный (избирательный) характер. Строго говоря, поглощение в газах может носить и нерезонансный характер, связанный с преодолением сил «трения» молекул, обладающих электрическим и магнитным моментами и совершающих вынужденные колебательные движения под действием поля волны.

Величину множителя ослабления радиоволн в тропосфере можно представить в виде:

$$|V| = \frac{|E|}{|E_0|} = e^{-\int_0^r a(r) \partial r}, \quad (3.45)$$

где  $E$  – напряженность поля в реальных условиях;

$E_0$  – напряженность поля в свободном пространстве;

$a(r)$  – множитель ослабления на единицу длины в каждой точке траектории волны;

$r$  – путь, пройденный волной в тропосфере.

Множитель ослабления  $a(r)$  представляет собой суперпозицию двух величин: множителя ослабления в газах –  $a_g(r)$  и множителя ослабления в гидрометеорах –  $a_{zm}(r)$

$$a(r) = a_g(r) + a_{zm}(r). \quad (3.46)$$

Выражение (3.45) с учетом (3.46) может быть представлено в децибелах:

$$|V|_{[дБ]} = -8.68 \int_0^r a_g(r) \partial r - 8.68 \int_0^r a_{zm}(r) \partial r. \quad (3.47)$$

Таким образом, суммарное ослабление, выраженное в децибелах, равно сумме парциальных ослаблений.

При проведении количественных оценок величины ослабления обычно используют понятия погонного ослабления, имеющего размерность дБ/км. Так, для паров воды и кислорода множитель ослабления может быть представлен в виде:

$$|V|_{[дБ]} = \gamma_g \times r_g + \gamma_k \times r_k, \quad (3.48)$$

где  $\gamma_g, \gamma_k$  – погонное ослабление в парах воды и кислороде соответственно;

$r_g, r_k$  – эффективные длины пути радиоволны в парах воды и кислороде соответственно.

Множитель ослабления в гидрометеорах –

$$|V_{эм}|_{[дБ]} = \gamma_{\partial} \times r_{\partial}. \quad (3.49)$$

Здесь  $\gamma_{\partial}$  – погонное ослабление в дожде;

$r_{\partial}$  – эффективный путь радиоволны в дожде.

Очевидно, что эффективные длины путей зависят от истинных длин и угла наклона траектории радиоволны по отношению к плоскости горизонта.

Расчетные значения погонного ослабления в зависимости от длины волны (частоты) для паров воды, кислорода и дождя различной интенсивности представлены на графиках рис. 3.9 и 3.10.

Графики соответствуют стандартному атмосферному давлению 760 мм. ртутного столба, температуре 20° С и влагосодержанию 10 г/м<sup>3</sup>. Из рисунка видно, что водяной пар имеет максимум поглощения на длине волны 1.35 см (частоте 22,23 ГГц), а кислород – на длинах волн 0.5 и 0.25 см. (частотах 60 ГГц и 120 ГГц).

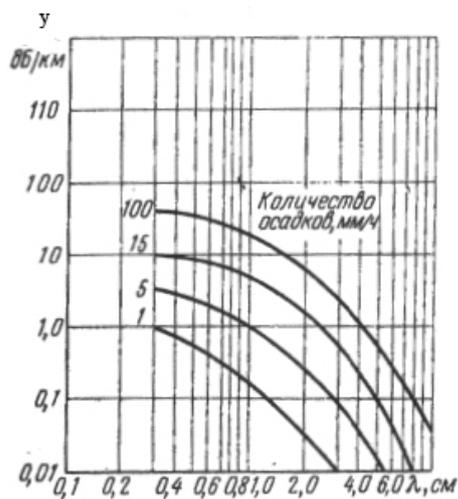


Рис. 3.9. Погонное ослабление в дожде

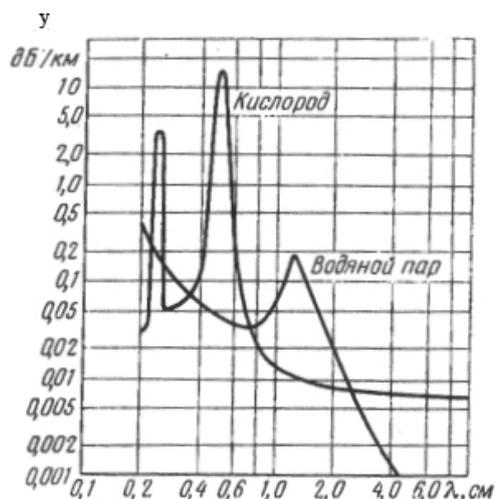


Рис. 3.10. Погонное ослабление в парах воды и кислороде

### 3.4 ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Как было показано в предыдущем разделе, внутренняя ионосфера является неоднородной средой. Изменение ее диэлектрической проницаемости (коэффициента преломления) с высотой, а также в пространстве на расстоянии длины волны носит такой же характер как и в тропосфере, поэтому подход к определению траектории радиоволн в ней так же может базироваться на лучевой трактовке распространения, и уравнение траектории волны имеет вид (рис. 3.11):

$$nr \cos \theta = n_0 a \cos \theta_0, \quad (3.50)$$

где  $n, n_0$  – показатель преломления в рассматриваемой точке ионосферы и у нижней границы ионосферы (у поверхности Земли) соответственно;

$\theta, \theta_0$  – угол скольжения (либо возвышения) луча относительно слоя ионосферы и нижней границы ионосферы (поверхности Земли) соответственно;

$a$  – радиус Земли;

$r$  – расстояние до точки наблюдения.

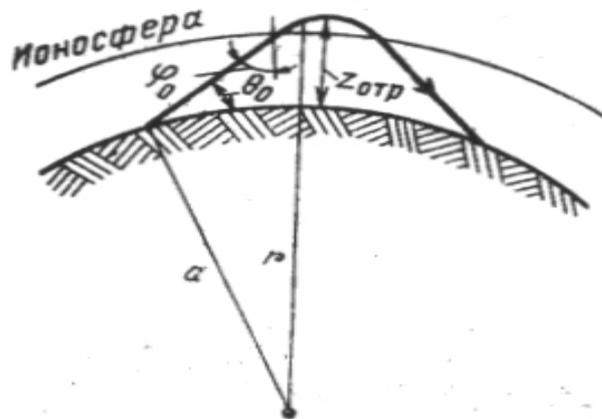


Рис. 3.11. Траектория волны в ионосфере

Так же как и в тропосфере, в ионосфере траектория волны искривляется, причем выпуклость траектории ориентирована в сторону от поверхности Земли. Поэтому по мере проникновения волны в ионосферу угол  $\theta$  уменьшается и на некоторой высоте  $Z$  может принять значение, равное нулю. При этом выражение (3.50) преобразуется к виду:

$$nr = n_0 a \cos \theta_0 \quad (3.51)$$

Уравнение (3.51) выражает условие полного внутреннего отражения (поворота) луча. С практической точки зрения, для обеспечения работы наземных радиотехнических систем выполнение этого условия является необходимым.

Поскольку коэффициент преломления ионосферы зависит от частоты, то частота радиоволны, испытывающей полное внутреннее отражение на высоте  $Z$  при значении угла возвышения  $\theta_0$ , может быть определена из выражения:

$$f = \frac{\sqrt{80.8 N_e}}{\sin \theta_0} = f_0 \sec \varphi_0. \quad (3.52)$$

В этом выражении  $N_e$  – электронная концентрация в точке поворота;

$f_0$  – собственная частота ионосферы (частота Ленгмюра);

$\varphi_0 = \pi/2 - \theta_0$  – угол падения луча на ионосферу.

При выводе выражения (3.52) учтено, что  $r = a + z$ ,  $n_0 \approx 1$  и  $z/a \ll 1$ .

Выражение (3.52) носит название закона секанса, и его смысл состоит в том, что луч на частоте  $f$ , падающий на ионосферу под углом падения  $\varphi_0$ , отражается на той же высоте  $Z$ , что и луч на частоте  $f_0$ , направленный на ионосферу вертикально.

Частота радиоволны, при которой нормально падающий луч отражается от ионосферы (коэффициент отражения равен единице), носит название критической частоты. Строго говоря, существует некоторая частотная зависимость величины коэффициента отражения, т. е. в некотором диапазоне частот волна просачивается сквозь ионосферу, но практически считается, что при  $f < f_{кр}$  имеет место полное отражение, а при  $f > f_{кр}$  – прохождение. Поскольку критическая частота определяется электронной концентрацией, то можно говорить о критических частотах слоев D, E, F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>. Естественно, что максимальное значение критическая частота будет иметь при отражении радиоволны от слоя F<sub>2</sub> – слоя с максимальной электронной концентрацией. В соответствии с (3.52), максимальная частота радиоволны  $f_m$ , наклонно падающей на ионосферу, будет в  $\sec\varphi_0$  раз превышать критическую частоту. С учетом сферичности Земли и ионосферы, которая ограничивает угол падения волны на ионосферу, максимальное значение  $\sec\varphi_0 \approx 4.1$ . Вычисления и практика эксплуатации радиотехнических систем показали, что даже при максимальной электронной концентрации в слое F<sub>2</sub> частота  $f_m$ , наклонно падающих на ионосферу волн, не превышает 30 - 40 МГц. Это означает, что от ионосферы отражаются волны длиннее 8-10 метров – короткие, средние, длинные.

С другой стороны, увеличение угла падения  $\varphi_0$  при распространении волны частотой  $f > f_0$  приводит к появлению предельного угла падения  $\varphi_{кр}$ , который носит название критического угла, при котором траектория волны является наиболее крутой. При значениях угла падения, меньших критического угла, волна, испытывая преломление, проходит сквозь ионосферу. При значениях угла падения, больших критического угла, отражение происходит при меньших значениях электронной концентрации на меньшей высоте.

Проанализированные особенности отражения радиоволн от ионосферы представлены в графическом виде на рисунках 3.12 и 3.13.

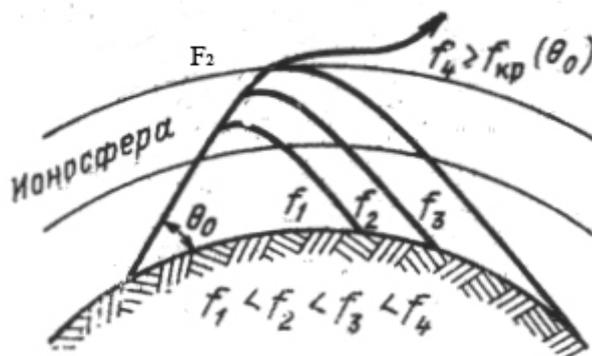


Рис. 3.12. Отражение радиоволн различных частот при постоянном угле падения

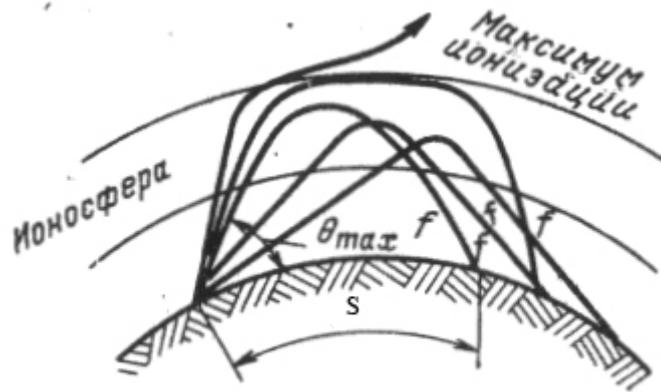


Рис. 3.13. Отражение радиоволны частоты  $f$  при различных углах падения

На практике при расчете радиолиний обычно предполагают, что волны распространяются по дуге большого круга, испытывая многократные отражения от поверхности Земли и ионосферы, причем траектория волны полагается симметричной. В подобной постановке задачи важно определить дальность распространения вдоль земной поверхности. Эта задача решается при использовании параболической аппроксимации распределения электронной плотности в слое ионосферы с учетом малости величины отношения расстояния от поверхности Земли до слоя ионосферы к радиусу земного шара. В результате решения задачи обнаруживаются следующие закономерности изменения дальности для одного отражения от ионосферы:

- для радиоволны частоты  $f$  имеется некоторый угол падения  $\varphi_{m3}$ , при котором дальность распространения вдоль поверхности Земли  $R_{m3}$  является минимальной; эта дальность носит название мертвой зоны (прием излучения в пределах этой зоны невозможен);
- при фиксированном угле падения и заданном значении критической частоты увеличение рабочей частоты приводит к росту дальности распространения, поскольку возрастают: глубина проникновения в толщу ионосферы, высота отражения и радиус кривизны траектории;
- при изменении угла падения возможны различные ситуации (рис.3.14):

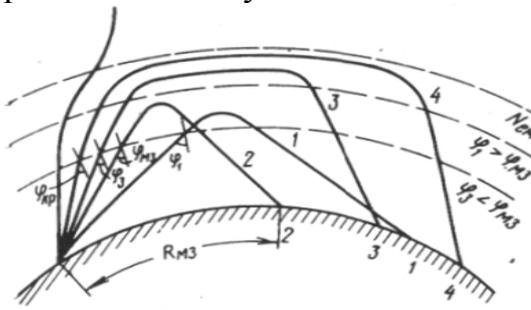


Рис. 3.14. Зависимость дальности распространения от угла падения

при  $\varphi_0 > \varphi_{m3}$  более крутым траекториям соответствует меньшая дальность;

при  $\varphi_0 < \varphi_{мз}$  с увеличением крутизны траектории дальность увеличивается;

- заданное расстояние вдоль поверхности Земли  $R_0$  могут перекрывать два луча с различными углами падения (рис. 3.15) – пологий луч с малым радиусом кривизны (луч 1) и крутой луч с большим радиусом кривизны (луч 2), который называют лучом Педерсена;

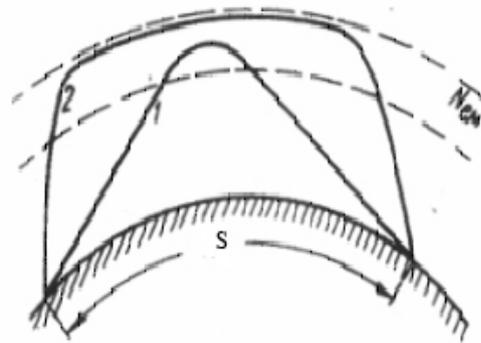


Рис. 3.15. Двухлучевое распространение

- максимальная дальность одного «скачка» соответствует касательным к поверхности Земли лучам, отражающимся в области максимальной электронной концентрации слоя ионосферы; так для слоя  $F_2$  эта дальность составляет 3000 – 4000 км, а для слоя E – 2000 км.

Кроме рассмотренных так называемых простых траекторий распространения существуют более сложные траектории, когда волна может отразиться при движении в сторону Земли от спорадического слоя  $E_s$ , затем вновь от слоя  $F_2$  и т. д. Возможны и другие схемы распространения по сложным траекториям. Некоторые из подобных траекторий представлены на рис. 3.16.

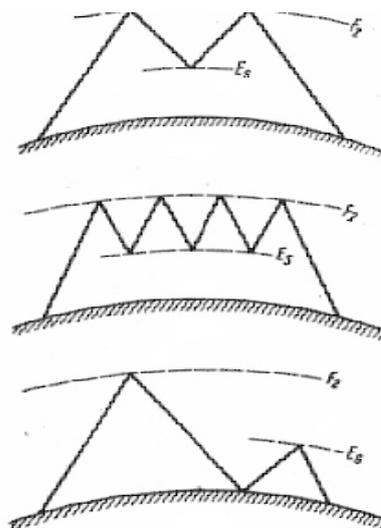


Рис. 3.16. Сложные траектории распространения волн в ионосфере

Следует иметь в виду, что расчет сложных траекторий может быть осуществлен в редких случаях, поскольку точное представление о состоянии ионосферы вдоль всей трассы, как правило, отсутствует. Инженерные расчеты обычно осуществляются для простых траекторий, однако следует обратить внимание на то обстоятельство, что при распространении на большие расстояния без промежуточных отражений от поверхности Земли потери энергии уменьшаются, так как уменьшается путь волны в основном поглощающем слое D.

Как было отмечено ранее (см. раздел 3.2), в присутствии магнитного поля Земли ионосфера становится анизотропной средой. Коэффициенты преломления и поглощения зависят от направления распространения волны относительно силовых линий магнитного поля и при различной поляризации имеют различные значения (см. (3.23) – (3.29)). В связи с этим траектории волн, распространяющихся в ионосфере, приобретают определенную специфику. Так, вертикально направленная на ионосферу волна определенной частоты должна отразиться от слоя, в котором коэффициент преломления (диэлектрическая проницаемость) обращается в ноль. Поскольку коэффициент преломления может иметь два значения, то отражение волны произойдет на разных высотах – отраженная волна расщепится на два луча – обыкновенный и необыкновенный. Этот эффект носит название эффекта двойного лучепреломления. В силу того, что для отражения необыкновенной волны требуется меньшая электронная плотность, нежели для отражения обыкновенной волны, критическая частота необыкновенной волны оказывается выше критической частоты обыкновенной волны. Разница критических частот может быть определена из выражения:

$$f_{кр.н} \approx f_{кр.о} + f_z/2. \quad (3.53)$$

Подстановка  $f_z = 1.4$  МГц дает  $f_{кр.н} = f_{кр.о} + 0.7$  МГц.

При наклонном падении на ионосферу волны, отразившиеся на разных высотах, возвращаются в разные точки земной поверхности, причем с некоторой разницей во времени. Это может явиться причиной появления двух магниторасщепленных импульсов при передаче импульсных сигналов, либо к возникновению интерференционных замираний, когда в точку приема приходят несколько лучей.

Еще одним эффектом, который проявляется при распространении радиоволн в ионосфере в присутствии магнитного поля Земли, является эффект изменения поляризации волны. Поляризация определяется фигурой, которую описывает конец вектора напряженности электрического поля на волновом фронте за период высокочастотного колебания и зависит от направления распространения волны относительно силовых линий магнитного поля Земли, электронной плотности и частоты. На практике принято рассматривать поляризацию в толще ионосферы и на выходе волны из ионосферы. В первом случае вид поляризации сказывается на величине

поглощения энергии волны, а во втором – на согласовании поляризации приемной антенны с поляризацией принимаемой волны. Анализ изменения поляризации радиоволн, распространяющихся в ионосфере в произвольном направлении относительно силовых линий магнитного поля Земли [3], позволяет сделать следующие выводы:

- в общем случае внутри ионосферы обыкновенная и необыкновенная волны поляризованы эллиптически, причем направление вращения векторов напряженности электрического поля этих волн противоположно;

- большие оси эллипсов поляризации имеют наклон в направлении распространения волн и являются ортогональными друг другу;

- в случае продольного распространения обе волны поляризованы по кругу, и векторы напряженности электрического поля лежат в плоскости фронта волны;

- в случае поперечного распространения обыкновенная волна поляризована линейно в направлении силовых линий магнитного поля, а необыкновенная волна в плоскости фронта поляризована также линейно, но перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, а в плоскости распространения – эллиптически.

В точке приема после выхода из ионосферы волны имеют ту поляризацию, которую они приобрели непосредственно при выходе, и эта поляризация не соответствует поляризации волны на входе в ионосферу, т. е. происходит поворот плоскости поляризации. Этот эффект носит название эффекта Фарадея, который наблюдал его в оптическом диапазоне при распространении света в анизотропных средах. Эффект Фарадея проявляется в значительной степени при распространении через ионосферу ультракоротких радиоволн. На более низких частотах он маскируется существованием в точке приема волн, обусловленных многократными отражениями от ионосферы.

Для наземных радиолиний, работающих за счет отражения радиоволн от ионосферы, характерен так называемый многолучевой прием, при котором в точку приема приходят волны, распространяющиеся по различным траекториям. В этом случае поляризация отдельных волн эллиптическая, и суммарное поле также имеет эллиптическую поляризацию. Поляризация в пространстве суммарного эллипса изменяется по случайному закону, прием такого излучения может осуществляться на антенну с любой поляризацией, однако принятый сигнал будет флюктуировать.

При распространении радиоволн в ионосфере имеют место потери энергии, которые приводят к уменьшению напряженности электромагнитного поля в месте приема. Причинами потерь энергии являются:

- тепловые потери;

- перераспределение энергии между обыкновенной и необыкновенной волной;

- наличие многолучевой структуры поля в месте приема;

- наличие потерь при отражении от поверхности Земли.

Если волна проходит через толщу ионосферы, то ее влияние на среднее поле сводится в основном к тепловым потерям. При этом напряженность поля волны может быть определена по известному закону

$$E = E_0 e^{-\Gamma_u}, \quad (3.54)$$

где  $E_0$  – напряженность поля при входе в ионосферу;

$\Gamma_u = \int_s \alpha_u(S) dS$  – интегральный коэффициент поглощения на пути распространения волны.

Обычно в расчетах интегральный коэффициент поглощения определяют в виде суммы частных коэффициентов поглощения в слоях ионосферы, через которые проходит волна. При условии отражения от слоя  $F_2$  выражение для интегрального коэффициента поглощения принимает вид:

$$\Gamma_u(S) = 2(\int \alpha_D dS + \int \alpha_E dS + \int \alpha_{F_1} dS + \int \alpha_{F_2} dS). \quad (3.55)$$

Выражения для коэффициента поглощения  $a_u(S)$  на пути  $dS$  различаются для слоев ионосферы, которые волна проходит без отражения, и отражающих слоев. Так, для отражающих слоев, где коэффициент преломления  $n_u < 1$

$$a_u \approx \frac{v}{2c} \frac{1}{n_u} (1 - n_u^2), \quad (3.56)$$

а для неотражающих слоев, где  $n_u \approx 1$  –

$$a_u \approx \frac{v}{2c} (1 - n_u^2). \quad (3.57)$$

Величина поглощения зависит от длины трассы, поскольку при этом меняется путь, проходимый волной в поглощающей среде. В неотражающей области длина пути может быть вычислена по приближенной формуле

$$S \approx h \sec \varphi_0, \quad (3.58)$$

где  $h$  – толщина слоя ионосферы;

$\varphi_0$  – угол падения волны на слой.

### 3.5 ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРЫ НА ЗАМИРАНИЯ СИГНАЛОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН ВДОЛЬ ЗЕМЛИ

Замираниями принято называть случайные изменения амплитуды сигнала на входе приемника, вызванные случайными изменениями радиофизических параметров атмосферы. Основными причинами замираний являются:

- интерференция в точке приема, которая может быть вызвана приходом двух или большего числа волн за счет переизлучения неоднородностями тропосферы либо ионосферы, либо за счет различного числа отражений от

ионосферы и т. п. При этом наиболее быстрые и значительные изменения уровня сигнала вызываются вариациями фаз интерферирующих волн. Изменения амплитуд сопровождаются медленными и сравнительно небольшими изменениями уровня сигнала;

- ослабление уровня сигнала при распространении через атмосферу за счет изменения условий рефракции в тропосфере либо рассеяния электромагнитной энергии гидрометеорами, поглощением в тропосфере и ионосфере;

- изменением поляризации волны из-за случайных изменений состояния ионосферы.

Естественно, что, как и любой случайный процесс, замирания могут быть описаны статистически. Радиофизические измерения показывают, что замирания, строго говоря, представляют собой нестационарный случайный процесс. Однако для ограниченных периодов времени с достаточной для практики степенью точности замирания можно рассматривать как стационарный процесс с постоянными от периода к периоду функциями распределения, но различными числовыми характеристиками этих функций. Замирания в течение этих ограниченных периодов называют быстрыми, а распределение средних значений уровня сигнала нескольких периодов – медленными. Быстрые замирания имеют длительность от долей секунды до нескольких десятков секунд и вызываются в основном интерференцией волн. Медленные замирания связаны с ослаблением амплитуды волн за счет поглощения либо рассеяния электромагнитной энергии.

Глубина замираний описывается интегральными статистическими распределениями, характеризующими вероятность того, что она не превысит определенный (заданный) уровень. При интерференции нескольких волн со случайно быстро изменяющимися фазами в интервале  $360^\circ$  и медленно меняющимися амплитудами, амплитуда результирующей напряженности поля описывается законом Релея (либо обобщенным законом Релея, если амплитуда и фаза одной из интерферирующих волн постоянны).

Связь между замираниями в двух пространственно разнесенных точках описывается пространственной корреляционной функцией, которая убывает по мере увеличения разнosa. Принято считать, что замирания независимы, если корреляционная функция убывает до величины  $1/e \approx 0.37$ . Соответствующее значение расстояния носит название масштаба пространственной корреляции замираний. Вид функции корреляции и масштаб зависят не только от особенностей механизма распространения, но и от направления в пространстве. Масштаб пространственной корреляции при быстрых замираниях обычно имеет значительно меньшую величину, чем при медленных замираниях.

Кроме пространственной корреляции замирания можно характеризовать еще временной и частотной корреляцией, которые определяются соответственно временной и частотной корреляционными функциями. Аналогично пространственной корреляции, принято считать, что замирания

независимы во времени и по частоте, если величина соответствующей корреляционной функции убывает до значения 0.37. Временной и частотный интервалы при этом носят название масштаба временной и частотной корреляции. Наименьший радиус временной и частотной корреляции имеет место при быстрых (интерференционных) замираниях.

Пространственная некоррелированность замираний используется для повышения устойчивости работы радиолиний при использовании двух приемных антенн, разнесенных на расстояние, превышающее радиус корреляции. В этом случае вероятность того, что напряженность поля у каждой из антенн одновременно будет ниже определенной величины, снижается.

Подобным же образом существование временной некоррелированности замираний позволяет повысить достоверность передаваемой дискретной информации за счет повторения передачи со сдвигом во времени на величину масштаба временной корреляции.

Наличие частотной некоррелированности может быть также использовано для повышения устойчивости работы радиолиний за счет передачи информации на двух, разнесенных на величину, превышающую радиус частотной корреляции, частотах. Кроме того, частотная корреляция определяет полосу частот, которую можно передавать без искажений. Если спектр передаваемого сигнала меньше интервала частотной корреляции, то сигнал передается практически без искажений. В противном случае имеет место некоррелированность распространения отдельных спектральных составляющих и искажения сигнала оказываются значительными.

### **3.6 ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНОВ**

В предыдущих разделах были рассмотрены основные физические и математические вопросы влияния Земли и ее атмосферы на распространение радиоволн. В данном разделе представлены материалы, описывающие основные особенности распространения радиоволн различных диапазонов, основывающиеся на рассмотренных ранее физических и математических принципах.

#### **3.6.1 СВЕРХДЛИННЫЕ И ДЛИННЫЕ РАДИОВОЛНЫ (СДВ И ДВ)**

К радиоволнам этих диапазонов относят волны от  $10^3$  до  $10^5$  метров. Четкой границы между указанными диапазонами и диапазоном звуковых радиочастот (см. табл. 1.1) нет, поэтому механизмы и особенности их распространения во многом одинаковы.

Эти радиоволны распространяются на большие расстояния за счет последовательных отражений от поверхности Земли и нижней границы ионосферы, в качестве которой в дневные часы выступает слой D, а в ночные – слой E ионосферы. Если рассмотреть картину распространения радиоволн в пространстве, то можно говорить о волноводном распространении внутри

сферического атмосферного волновода, стенки которого образуются поверхностью Земли и нижней границей ионосферы, причем, как и в металлическом волноводе, размеры поперечного сечения этого волновода (его высота) соизмеримы с длиной волны. В отличие от металлического волновода, стенки атмосферного являются полупроводящими, что приводит к потерям электромагнитной энергии по мере распространения.

Для качественной оценки механизма распространения рассмотрим данную задачу в следующей постановке: в некоторой точке А на земной поверхности (см. рис. 3.17) расположена передающая антенна с коэффициентом направленного действия D, излучающая мощность P. Необходимо найти поле в точке В на расстоянии r от передающей антенны. Стенки волновода будем считать идеально проводящими, высоту ионосферы обозначим через h, расстоянию r вдоль поверхности соответствует геоцентрический угол  $\theta$ .

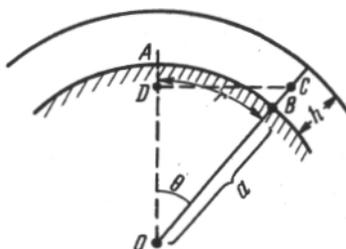


Рис. 3.17. К постановке задачи распространения длинных и сверхдлинных волн

Поскольку в диапазоне длинных и сверхдлинных волн антенны в горизонтальной плоскости являются ненаправленными, то на достаточном удалении вся мощность излучения передающей антенны равномерно распределяется по площади поперечного сечения (площади кольца, которая может быть определена исходя из геометрии рис. 3.17) сферического волновода. Исходя из этого нетрудно определить плотность потока мощности на заданном расстоянии. Приравнивая найденную таким образом плотность потока мощности к плотности потока мощности в свободном пространстве на этом же расстоянии, можно определить множитель ослабления поля свободного пространства, который оказывается равным:

$$V = \frac{2r}{\sqrt{2(a + \frac{h}{2})h \sin \theta}}. \quad (3.59)$$

Используя (3.59), выражение для напряженности поля на заданном расстоянии от передающей антенны можно представить в виде:

$$E_D = \frac{173\sqrt{P(\text{кВт})D}}{r(\text{км})} V = \frac{245\sqrt{P(\text{кВт})D}}{\sqrt{(a(\text{км}) + \frac{h(\text{км})}{2})h(\text{км}) \sin \theta}}, \text{ мВ/м.} \quad (3.60)$$

Анализ выражения (3.60) показывает, что напряженность поля в атмосферном волноводе убывает пропорционально  $\sqrt{\sin \theta}$ . По достижении

геоцентрическим углом значения  $\pi/2$ , что соответствует максимальной площади поперечного сечения, имеет место минимум. Дальнейшее увеличение геоцентрического угла приводит к тому, что напряженность поля возрастает, стремясь при  $\theta = \pi$  к бесконечности (рис 3.18 – пунктирная кривая). Это объясняется тем, что площадь поперечного сечения при этом стремится к нулю. Подобная зависимость является следствием идеализации условий распространения, так как стенки волновода полагались идеально проводящими, а высота волновода – постоянной. Практически же и в полупроводящей поверхности Земли, и в ионосфере имеют место потери энергии. Кроме того, волны, приходящие в точку наблюдения имеют различные фазы, так как на освещенной стороне Земли они отражаются от слоя D ионосферы, а на теневой стороне – от слоя E. Это приводит к тому, что характер зависимости напряженности поля от расстояния соответствует сплошной кривой на рис. 3.18.

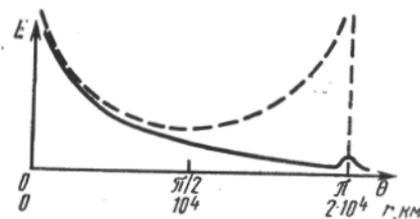


Рис. 3.18. Зависимость напряженности поля от расстояния

Точка на поверхности Земли, соответствующая углу  $\theta = \pi$ , носит название антипода.

Обращает на себя внимание тот факт, что в точке антипода все же имеет место некоторое увеличение (всплеск) напряженности поля.

Подобное рассмотрение является скорее качественным, чем количественным. Реально процесс распространения волн в сферическом волноводе является гораздо более сложным, и теория распространения радиоволн СДВ и ДВ в сферическом волноводе базируется на другой модели, так называемой модели многомодового распространения. Сущность этой теории состоит в том, что поле в месте приема определяется интерференцией множества лучей, отразившихся различное число раз от стенок волновода с учетом граничных условий в точках отражения. Эта теория позволяет учесть плавное изменение параметров ионосферы на трассе и изменение высоты волновода на освещенном и теневом участках трассы. Расчетные формулы дают возможность определить не только амплитуду поля в месте приема, но и фазу волны, что существенно для целей радионавигации.

Радиоволны рассматриваемых диапазонов характеризуются высокой стабильностью условий распространения, поскольку отражаются от достаточно стабильных по своим свойствам слоев ионосферы. Однако из-за имеющих место вариаций состояния ионосферы, связанных с

неоднородностью ионизирующего излучения и наличием воздушных течений, проявляются случайные колебания напряженности поля в пределах 10 – 30 % по амплитуде, причем эти изменения происходят достаточно медленно – они длятся десятки минут и даже часы.

Кроме случайных колебаний напряженности поля, в диапазонах СДВ и ДВ наблюдаются незначительные суточные и сезонные изменения, а также изменения, связанные с влиянием 11-летнего цикла солнечной активности.

К одной из характерных особенностей распространения радиоволн этих диапазонов относится существование явления «свистящего атмосферика», зачастую создающего помехи в работе радиотехнических систем (см. рис. 3.19). На слух «свистящий атмосферик» воспринимается как сигнал звуковой частоты в диапазоне от 400 до 8000 Гц. Источником этого сигнала являются грозовые разряды, создающие широкий спектр электромагнитных колебаний, в том числе и в рассматриваемых диапазонах волн, которые распространяются вдоль силовых линий магнитного поля Земли, пронизывая всю толщу ионосферы и достигая поверхности в районе геомагнитного полюса. Сигнал, отраженный от поверхности Земли, может быть принят в месте возникновения грозового разряда, пройдя обратный путь вдоль силовой линии магнитного поля. Время запаздывания этих сигналов составляет 2-3 секунды, что позволяет сделать вывод об удалении траектории волны на расстояние 10 – 15 тысяч километров от поверхности Земли.

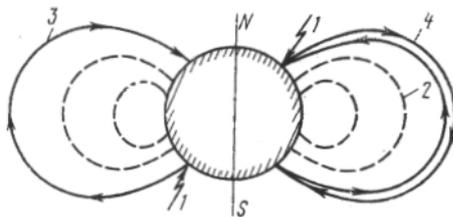


Рис. 3.19. Схема прохождения «свистящих атмосфериков»

В инженерной практике расчет напряженности поля производится обычно по эмпирическим формулам. Одной из наиболее часто применяемых формул является формула Остина, которая позволяет определить напряженность поля при распространении над морем в дневные часы, а также над сушей, начиная с расстояний 2 – 3 тысячи километров и до 16 – 18 тысяч. Формула Остина имеет следующий вид:

$$E_{\text{д}} = \frac{300\sqrt{P(\text{кВт})D}}{r(\text{км})} \sqrt{\frac{\theta}{\sin \theta}} e^{\frac{0.0014r(\text{км})}{r^{0.6}(\text{км})}}, \text{ мВ/м.} \quad (3.61)$$

В диапазонах СДВ и ДВ часто задается не мощность излучения, а действующая высота антенны и ток в ней. В этом случае формула Остина несколько видоизменяется:

$$E_D = \frac{120\pi h_D(M)I_D(a)}{\lambda(M)r(\text{км})} \sqrt{\frac{\theta}{\sin \theta}} e^{-\frac{0.0014r(\text{км})}{\lambda^{0.6}(\text{км})}}, \text{ мВ/м.} \quad (3.62)$$

Обращает на себя внимание тот факт, что напряженность поля, так же как и в (3.59), убывает пропорционально  $\sqrt{\sin \theta}$ .

### 3.6.2 СРЕДНИЕ ВОЛНЫ (СВ)

К данному диапазону относятся волны, имеющие длину волны от 100 до 1000 метров. В отличие от диапазонов СДВ и ДВ, средние волны отражаются от слоя ионосферы с большей электронной концентрацией, расположенного на большей высоте – слоя Е. Поэтому в дневное время, когда присутствует слой D ионосферы, отраженный в сторону поверхности Земли радиолуч дважды проходит сквозь этот слой, испытывая в нем значительное поглощение. В связи с этим в дневные часы средние волны распространяются в основном как земные (поверхностные) волны на сравнительно небольшие расстояния (500 – 700 км). В ночные же часы, когда слой D ионосферы исчезает, СВ распространяются и как поверхностные и как пространственные (ионосферные) волны. Причем дальность распространения пространственной волны составляет несколько (2 – 3) тысяч километров.

В диапазоне СВ проявляются некоторые характерные особенности распространения. Одна из них связана со случайными колебаниями напряженности поля (замираниями), которые носят интерференционный характер и вызваны тем, что в точку приема с наступлением темноты приходят две волны – поверхностная и пространственная. Из-за непостоянства ионизирующих излучений и наличия воздушных течений в области ионосферы фаза пространственной волны случайным образом изменяется, причем эти изменения проявляются тем больше, чем короче длина волны. В результате флюктуации принимаемого сигнала также носят случайный характер и называются замираниями. С укорочением длины волны глубина замираний увеличивается, а длительность укорачивается. При этом напряженность поля может изменяться в десятки раз, а длительность составляет десятки и даже единицы секунд.

В тех случаях, когда точка приема находится за пределами дальности распространения земных волн, замирания могут вызываться интерференцией пространственных волн, достигших этой точки различными путями.

Для борьбы с замираниями в диапазоне СВ используют как пассивные (схемы автоматической регулировки усиления в приемниках), так и активные меры (антенны с диаграммой направленности, прижатой к поверхности Земли и позволяющей выделить один из лучей, приходящих в точку наблюдения).

В диапазоне СВ резко выражены суточные колебания напряженности поля, что связано с существованием слоя D ионосферы, который ночью (на теневой стороне земного шара) исчезает. При этом в зависимости от расстояния между корреспондентами принято различать три возможных ситуации:

- на очень малых расстояниях напряженность поля не зависит от времени суток, поскольку напряженность поля земных волн значительно больше напряженности поля пространственных даже ночью;

- на больших расстояниях в пределах дальности распространения земных волн напряженность поля ночью возрастает за счет появления пространственных волн, и появляются замирения;

- на очень больших расстояниях в дневные часы напряженность поля в точке наблюдения практически равна нулю, а ночью за счет появления пространственных волн значительно возрастает.

Рассмотренные ситуации объясняют тот факт, что в диапазоне СВ днем прослушиваются только сигналы мощных местных радиостанций, а ночью удается принять сигналы большого числа радиостанций, расположенных на значительном (2 – 3 тысячи километров) удалении.

В северных широтах из-за меньшей электронной концентрации в слое D пространственные волны испытывают меньшее поглощение и могут даже днем распространяться на большие расстояния.

В диапазоне СВ проявляется слабая сезонная зависимость условий распространения. Так, в ночные часы прохождение волн, в связи с постоянством электронной концентрации в слое E ионосферы, практически не зависит от времени года. В дневные часы сезонный ход выражен значительно заметнее, поскольку электронная концентрация в слое E летом имеет ярко выраженный максимум.

Вообще говоря, когда речь идет об интенсивности принимаемого полезного сигнала, следует иметь в виду, что в летние месяцы в атмосфере Земли наиболее активна грозовая деятельность, которая приводит к возникновению значительных помех в диапазоне СВ. Поэтому уровень эффективного сигнала (на фоне помех) зимой практически всегда выше, нежели летом.

В диапазоне средних волн влияние 11-летнего периода солнечной активности, а также ионосферных возмущений на условия распространения незначительно и проявляется в небольшом увеличении поглощения в такие периоды.

Расчет напряженности поля в диапазоне СВ осуществляется различными методами в зависимости от протяженности радиолинии и механизма распространения. Так, напряженность поля земных волн определяется по дифракционной формуле либо по графикам на рис. 2.7, 2.8. Напряженность поля ионосферных (пространственных) волн рассчитывается по эмпирической формуле, принятой Союзом европейского радиовещания:

$$E_{\partial} = \frac{10233}{\sqrt{r_{км}}} \sqrt{P_{кВт} D \times e^{-8.94 \times 10^{-4} \times \lambda_{км}^{-0.26} \times r_{км}}} \text{, мВ/м. (3.63)}$$

Эта формула позволяет определить среднее за год медианное значение поля, когда середине трассы соответствует местная полночь и магнитное склонение в этой точке равно  $61^\circ$ . Кроме того, при выводе этой формулы предполагалось, что число пятен на Солнце равно нулю и работа ведется на вертикальную антенну с действующей высотой меньшей длины волны. Для того чтобы пользоваться этой формулой при других значениях перечисленных параметров, имеется большое количество графиков, позволяющих учесть существующие отклонения.

Для учета большого числа пространственных волн также используют графики, составленные МККР.

### 3.6.3 КОРОТКИЕ ВОЛНЫ (КВ)

К диапазону коротких волн относятся радиоволны, лежащие в интервале от 10 до 100 метров. В отличие от диапазонов СДВ, ДВ, СВ в этом диапазоне возможно создание направленных антенн. Так же как и в рассмотренных ранее диапазонах, короткие волны распространяются как поверхностные (земные) и пространственные. Из-за значительного поглощения в полупроводящей поверхности Земли земные волны распространяются на сравнительно небольшие (несколько десятков километров) расстояния. Расчет напряженности поля земных волн в этом диапазоне может осуществляться по дифракционной формуле.

Пространственные волны распространяются на громадные расстояния (тысячи километров) и даже при сравнительно небольшой мощности передатчика способны огибать земной шар. Они распространяются за счет последовательных отражений от слоя F ионосферы и поверхности Земли, проходя сквозь слои D и E и претерпевая в них заметное поглощение. Для осуществления приема сигнала в диапазоне КВ должны выполняться два условия:

$f < f_{\max}$  – условие отражения волны от ионосферы;

– поглощение в слоях D и E должно быть таким, чтобы уровень поля в месте приема был достаточным для выделения сигнала (при этом следует иметь в виду, что затухание в КВ – диапазоне растет с уменьшением частоты).

Эти два условия ограничивают рабочий диапазон системы. Из первого условия выбирается максимально применимая частота (МПЧ), являющаяся верхней границей частотного диапазона. Из второго – наименьшая применимая частота (НПЧ), причем она определяется при заданной мощности передатчика (с увеличением мощности передатчика НПЧ уменьшается). Поскольку эти частоты связаны с электронной плотностью ионосферы, которая меняется в течение суток, то и границы частотного диапазона смещаются. Днем, когда электронная концентрация максимальна, используются волны от 10 до 25 метров (так называемые дневные волны), ночью – от 35 до 100 метров (ночные волны). В часы полумосновенности – от 25 до 35 метров (промежуточные).

По сравнению с более длинноволновыми диапазонами, КВ имеют как серьезные преимущества (дальность распространения, малое затухание и т. д.), так и существенные недостатки (непостоянство условий распространения, влияние внешних возмущающих факторов, необходимость смещения частотного диапазона и пр.).

В связи с этим для правильного построения и эксплуатации КВ линий связи необходимо более подробно рассмотреть некоторые особенности распространения волн этого диапазона.

#### *Зоны молчания*

При работе КВ-передатчика в некоторой области вокруг него образуется зона, в которой прием сигналов отсутствует. Она носит название зоны молчания. Ее появление связано с тем, что ни поверхностные волны (ввиду большого затухания), ни пространственные волны (из-за большого расстояния до точки возврата волны на Землю после отражения от ионосферы) не попадают в эту зону. В случае ненаправленных антенн эта зона представляет собой кольцевую область. Размер зоны молчания (внешний радиус) увеличивается при укорочении длины волны и снижении электронной концентрации в ионосфере, так как для выполнения условия отражения необходимо уменьшать угол скольжения луча по отношению к поверхности Земли. Внутренний радиус зоны молчания определяется условиями распространения земных волн и с ростом частоты (затухание увеличивается) уменьшается. Таким образом, рост частоты приводит к увеличению размеров зоны молчания как «сверху», так и «снизу».

#### *Замирания сигналов*

В диапазоне КВ наблюдаются очень глубокие замирания с периодом от долей секунды до нескольких секунд. Один из механизмов замираний связан с интерференцией в точке приема нескольких лучей, отраженных от ионосферы, с фазами, изменяющимися случайным образом. При этом можно рассмотреть несколько различных ситуаций:

- в место приема приходят два луча, отразившиеся от ионосферы различное число раз;
- в место приема приходят два луча, образовавшиеся за счет двойного лучепреломления, которое имеет место при отражении под действием магнитного поля Земли;
- в место приема приходят несколько лучей, образовавшихся в результате рассеяния падающей волны на неоднородностях ионосферы; экспериментально установлено, что пучок рассеянных лучей может занимать угол, порядка  $5^\circ$ .

Поскольку параметры ионосферы подвержены постоянным вариациям, то и фазы отраженных лучей постоянно изменяются. При этом для изменения фазы на  $180^\circ$  достаточно разности в длинах пути всего на  $\lambda/2$ , что составляет величину от 5 до 50 метров.

Другой механизм замираний носит название поляризационных. Они наблюдаются реже интерференционных и связаны с вращением плоскости

поляризации принимаемой волны за счет эффекта Фарадея. Т. к. величина поворота плоскости поляризации зависит от флюктуаций электронной концентрации, то и сигнал, принятый приемной антенной, будет изменяться.

Методы борьбы с замираниями были рассмотрены выше (см. раздел 3.5). Основной из них заключается в использовании приема на разнесенные антенны, либо антенны со специальными диаграммами направленности, позволяющими выделить один из принимаемых лучей. При поляризационных замираниях улучшить качество приема можно, используя приемные антенны с ортогональными поляризационными характеристиками.

#### *Радиоэхо на КВ*

Сравнительно малые потери при распространении позволяют коротким волнам распространяться на очень большие расстояния и даже обогнуть земной шар. Это приводит к возникновению радиоэха. Различают прямое и обратное эхо. В первом случае в точку приема, кроме прямой волны, пришедшей по кратчайшему пути непосредственно от передатчика, может прийти волна, обогнувшая земной шар один или даже несколько раз. Время запаздывания однократно обогнувшей земной шар волны составляет величину, порядка 0.13 секунды. При многократном огибании земного шара запаздывание становится еще большим и уже может восприниматься на слух в виде акустической реверберации при телефонном режиме передачи и в виде ложных посылок при телеграфном режиме.

Обратное эхо появляется тогда, когда в место приема приходят две волны – прямая и обратная. Разница во времени их прихода оказывается меньше 0.13 секунды.

Для подавления обратного эха достаточно применить однонаправленные антенны. Гораздо труднее подавить прямое эхо. Эта цель достигается при переходе на более низкие частоты, при которых за счет большего поглощения энергии радиоволны удается уменьшить амплитуду эхо-сигнала на более длинной трассе.

#### *Влияние ионосферных возмущений*

На распространение коротких радиоволн значительное влияние оказывают различного рода ионосферные возмущения. Природа этих возмущений подробно рассмотрена ранее (см. раздел 3.1). Здесь лишь обратим внимание на эффекты, к которым приводят эти возмущения.

Так ионосферно-магнитные бури, разрушающие слой F ионосферы, приводят к нарушению связи, особенно в приполярных районах. Эти нарушения проявляются прежде всего на высоких частотах и длятся от нескольких часов до нескольких суток. Для борьбы с ними используется переход на более низкие частоты, а также ретрансляция передач по линиям связи, проходящим в районах более низких широт.

Внезапные вспышки на солнце (вспышки поглощения) приводят к нарушению связи на более низких частотах. Они длятся от нескольких минут до нескольких часов. Иногда ионосферные бури и вспышки поглощения

возникают одновременно, тогда выбор рабочей частоты становится весьма затруднительным.

#### *Влияние I1 – летнего периода солнечной активности*

В периоды солнечной активности увеличивается количество пятен на солнце, возрастает его ионизирующая способность и повышается электронная концентрация во всех слоях ионосферы. Это позволяет увеличивать рабочую частоту при одновременном снижении потерь в слоях D и E ионосферы. Таким образом, в периоды солнечной активности условия распространения КВ улучшаются.

### **3.6.4 ОСНОВЫ РАСЧЕТА КВ ЛИНИЙ СВЯЗИ**

Расчет коротковолновых линий связи включает в себя два этапа:

1. Определяются оптимально применимые для связи частоты и с учетом солнечной активности, времени года и времени суток составляется график смены рабочих частот;

2. Рассчитывается уровень поля в месте приема.

Для определения МПЧ существует несколько методов, основанных на использовании данных станций ионосферного зондирования о критических частотах и высотах ионосферных слоев. Одним из наиболее часто используемых является метод, предложенный А.Н. Казанцевым [3]. Суть этого метода состоит в том, что для заданного расстояния между корреспондентами при известной высоте отражения с использованием теоремы эквивалентности определяется угол падения волны на нижнюю границу слоя F<sub>2</sub> ионосферы. Тогда выражение для МПЧ записывается в виде:

$$f_{\max} = 0.9 f_{\text{кр}} \sec \varphi = A f_{\text{кр}}, \quad (3.64)$$

где:  $\varphi$  – угол падения волны на ионосферу;

$A$  – табличный коэффициент, рассчитанный в предположении параболического распределения электронной концентрации в слое F<sub>2</sub>, при известной высоте нижней границы слоя в зависимости от времени суток и года.

Значение критической частоты определяется или непосредственно по данным станций ионосферного зондирования, или по картам ионизации, которые строят ежемесячно, начиная с 1930 года [7].

Если трасса имеет протяженность порядка 4000 км, то связь осуществляется главным образом за счет одного отражения от ионосферы, и точка отражения лежит в середине трассы. На более протяженных трассах может иметь место несколько отражений. В этом случае определяют положение всех возможных точек отражения и из всех полученных значений максимальной частоты выбирают в качестве МПЧ наименьшее. Затем для каждого часа суток вычисляют МПЧ и строят суточный график. Пример такого графика представлен на рис. 3.20.



Рис.3.20. Суточный ход МПЧ и НПЧ

Для того чтобы из-за случайных изменений электронной плотности не произошло нарушение связи, используют оптимальные рабочие частоты (ОРЧ), которые ниже МПЧ на 10-20 %.

Для определения напряженности поля в месте приема (соответственно НПЧ) также целесообразно воспользоваться методом Казанцева, который позволяет получить наиболее точный результат. Вообще говоря, все методы определения напряженности поля в КВ-диапазоне являются полуэмпирическими, поскольку основываются на ряде данных, получаемых экспериментально.

Амплитудное значение напряженности поля в месте приема может быть представлено в виде (см 3.54):

$$E_m = E_m^0 e^{-\Gamma} , \quad (3.65)$$

где  $E_m^0 = \frac{245\sqrt{PD}}{r} \frac{1}{2}(1+|R|)|R|^{n-1}$ , мВ/м – амплитуда поля без учета поглощения в ионосфере;

$P$  – мощность излучения, кВт;

$D$  – коэффициент направленного действия антенны;

$r$  – расстояние по поверхности Земли, км;

$|R|$  – модуль коэффициента отражения от Земли;

$n$  – число отражений от ионосферы;

$\Gamma$  – коэффициент поглощения в ионосфере (см. 3.55 – 3.58).

Множитель  $(1+|R|)$  учитывает влияние земной поверхности вблизи антенны, а множитель  $|R|^{n-1}$  – потери энергии при отражении от Земли в промежуточных точках трассы. Двойка в знаменателе учитывает влияние магнитного поля Земли, при котором принимаемая мощность уменьшается примерно в четыре раза (напряженность поля – в два раза) из-за того, что во-первых, необыкновенный луч затухает в большей степени и не достигает места приема, что ведет к потере половины мощности, и во-вторых, отраженная волна имеет поляризацию, близкую к круговой, а прием ведется, как правило, на антенну с линейной поляризацией, при которой также принимается только половина мощности.

На рис. 3.21 в качестве примера представлены графики интегральных коэффициентов поглощения радиоволн в различных областях ионосферы в зависимости от рабочей частоты летом для трассы 1500 км, рассчитанные Казанцевым при определенной критической частоте слоя.

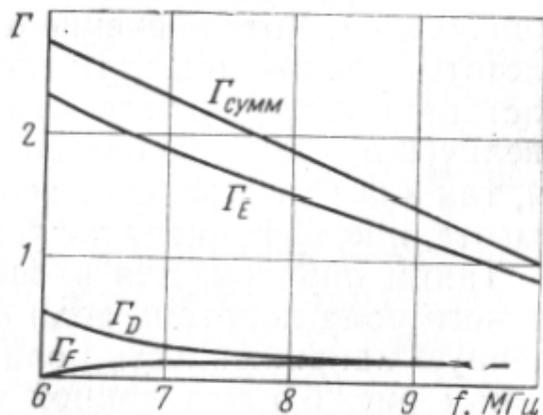


Рис. 3.21. Графики интегральных коэффициентов поглощения

Характер поглощения зависит от того, является ли слой отражающим, или волна проходит сквозь него. При прохождении волны поглощение уменьшается с ростом частоты. При отражении зависимость обратная, так как радиоволны более высоких частот отражаются на большей высоте и путь волны в ионосфере возрастает.

Кроме того, при увеличении угла падения волны на слой ионосферы потери уменьшаются, так как более пологие лучи отражаются на меньшей высоте и путь волны уменьшается.

Таким образом, для определения напряженности поля в месте приема необходимо вначале вычислить амплитуду вектора напряженности электрического поля без учета поглощения, а затем по графикам для заданной рабочей частоты определить интегральный коэффициент поглощения.

Для расчета НПЧ необходимо по известной минимальной напряженности электрического поля, достаточной для уверенного приема (чувствительности приемника), определить максимально допустимый коэффициент поглощения

$$\Gamma_{\text{дон}} = \ln \frac{E_m^0}{E_{\text{min}}}, \quad (3.66)$$

и по графикам рис. 3.21 найти требуемую частоту.

Увеличивая мощность передатчика, можно снизить уровень НПЧ.

Построенные на одном графике суточные изменения МПЧ и НПЧ позволяют получить частотный интервал, в котором можно работать в течение суток (см. рис. 3.20). Как можно видеть из рисунка, в течение суток необходимо постоянно менять рабочие частоты. На практике обычно кривую ОРЧ аппроксимируют ломаной линией так, чтобы количество перестроек частоты было минимальным при наименьшем отклонении от реальной кривой (рис. 3.22).

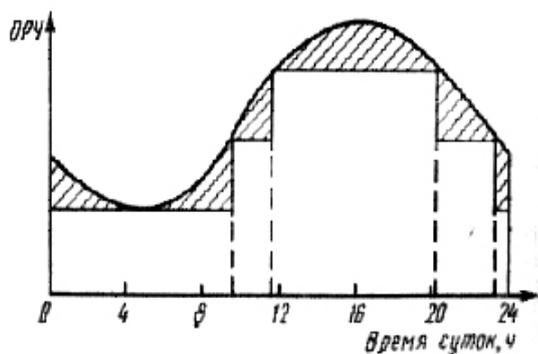


Рис. 3.22. Суточный график перестройки частоты передатчика

### 3.6.5 УЛЬТРАКОРОТКИЕ ВОЛНЫ (УКВ)

К диапазону УКВ относят радиоволны длиной от 10 м до 1 миллиметра (см. таблицу 1.1). Этот диапазон характеризуется возможностью создания антенн, обладающих хорошей направленностью, а также возможностью размещения их над земной поверхностью на высоте, превышающей длину волны электромагнитного излучения.

Рассматривая особенности распространения УКВ, следует отдельно рассматривать диапазоны метровых и более коротких волн.

Для метровых волн характерны несколько механизмов распространения. Они могут распространяться на сравнительно небольшие расстояния, проникая за горизонт, как земные волны. При этом напряженность поля может рассчитываться по интерференционным формулам, формуле Б.А. Введенского либо дифракционным формулам (см. разделы 2.2 – 2.4). На большие расстояния (далеко за горизонт) метровые волны могут распространяться как пространственные, испытывая отражения от регулярных областей ионосферы и спорадического слоя  $E_s$ , за счет рассеяния на неоднородностях электронной плотности и отражения от ионизированных следов метеоров.

Отражение метровых волн от регулярных образований в ионосфере и спорадического слоя наиболее ярко проявляется в периоды солнечной активности. В эти периоды отмечалось отражение радиоволн с частотой вплоть до 50 – 65 МГц, что соответствует длине волны 6 – 4.6 м соответственно. Расчет МПЧ и напряженности поля в месте приема при этом может выполняться теми же методами, что и в диапазоне КВ.

Дальнее распространение метровых волн за счет рассеяния в ионосфере по своему существу практически не отличается от дальнего распространения за счет рассеяния на неоднородностях тропосферы (см. раздел 3.3). Отличие состоит в том, что здесь рассеяние происходит в слоях D (днем) и E (ночью) ионосферы на локальных неоднородностях электронной плотности. Этот эффект используется для обеспечения связи на расстояниях до 2000 км, причем потери энергии в процессе распространения могут быть компенсированы за счет увеличения мощности передатчика и применения

передающей и приемной антенн с высокой направленностью. Мощность передатчиков может достигать до нескольких десятков кВт, а усиление антенн – до 30 – 40 дБ.

Дальнее распространение метровых волн за счет отражения от следов метеоров связано с процессами ионизации при сгорании в плотных слоях атмосферы на высотах 80 – 120 км, постоянно вторгающихся из космоса твердых частиц вещества. Характерной особенностью данного механизма распространения является то, что отражение имеет явно выраженный зеркальный характер и поэтому использование этого эффекта ввиду кратковременности существования благоприятных условий передачи требует создания специальной аппаратуры, позволяющей передавать информацию в ускоренном режиме в виде пакетов. Использование этого механизма распространения позволяет обеспечить связь в диапазоне 30 – 50 МГц на расстояниях до 2000 км при сравнительно небольших мощностях передатчиков (до 500 Вт) и более простых антеннах.

Радиоволны дециметрового и сантиметрового диапазона (СВЧ) распространяются на сравнительно большие расстояния как тропосферные волны, поскольку от ионосферы они не отражаются, а дифракция их на земной поверхности выражена очень слабо. Основными механизмами дальнего (до 1000 км) распространения являются механизмы сверхрефракции (образование тропосферных волноводов) и рассеяния на турбулентных неоднородностях тропосферы (ДТР) (см. раздел 3.3, а, б). Поскольку ДМВ и СВВ проходят сквозь ионосферу практически без потерь, то они используются в космической связи как прямые волны. Волны дециметрового диапазона при распространении в тропосфере не испытывают ни молекулярного поглощения, ни поглощения в гидрометеорах. Поглощение сантиметровых волн в гидрометеорах становится заметным при длине волны меньше 5 см, а в парах воды – только на волне 1.35 см (см. раздел 3.3, в). Из-за неоднородности радиофизических свойств тропосферы, при распространении дециметровых и сантиметровых волн наблюдаются все виды рефракции (искривление траектории движения волны) (см. раздел 3.3, а).

Радиоволны миллиметрового диапазона распространяются как прямые волны на сравнительно небольшие расстояния, испытывая значительное поглощение в гидрометеорах, парах воды и молекулах атмосферных газов. Применение миллиметровых волн в наземных линиях связи, как правило, осуществляется на длинах волн, соответствующих так называемым «окнам прозрачности», т. е. на длинах волн, при которых ослабление является относительно слабым (см. рис. 3.9). Вне тропосферы, в космических линиях связи миллиметровые волны находят широкое применение. При распространении миллиметровых волн в тропосфере Земли также имеет место рефракция.

Радиоволны оптического диапазона – от ультрафиолетовых до инфракрасных (см. табл. 1.1) – могут распространяться в тропосфере только как прямые волны на сравнительно небольшие расстояния – два-три десятка

километров. Построение линий связи также возможно на длинах волн, соответствующих «окнам» прозрачности, наиболее широкое из которых охватывает весь диапазон видимого света (0.4 – 0.75 мк). При космической связи, когда станции расположены за пределами тропосферы, применение радиоволн оптического диапазона является оправданным, поскольку и молекулярное поглощение, и поглощение в парах воды и гидрометеорах практически отсутствуют. В диапазоне оптических радиоволн характер рефракции несколько отличается от рефракции в диапазоне СВЧ. В частности, радиус кривизны траектории при нормальной атмосферной рефракции равен  $\approx 50000$  км, что связано с меньшим влиянием молекул водяного пара на величину градиента индекса рефракции. В заключение следует отметить, что сильный снегопад, дождь, град, туман практически полностью нарушают прохождение радиоволн оптического диапазона, а наличие дымки, мглы резко снижают дальность распространения.

#### Вопросы для самопроверки

1. Расскажите о строении атмосферы Земли с точки зрения ее влияния на распространение радиоволн.
2. Расскажите о процессах образования ионосферы и ее поведении в пространстве и во времени.
3. Проанализируйте поведение радиофизических параметров тропосферы.
4. В каких пределах изменяется диэлектрическая проницаемость ионосферы?
5. В чем заключается физика влияния магнитного поля Земли на радиофизические параметры ионосферы?
6. Поясните причины существования нерегулярных процессов в тропосфере и ионосфере.
7. Что является причиной рефракции радиоволн в тропосфере?
8. Поясните понятие «нормальная» тропосфера. Перечислите виды рефракции.
9. Дайте понятие эквивалентного радиуса Земли и сформулируйте цель его введения.
10. Чему равен эквивалентный радиус Земли при критической рефракции? Сверхрефракции?
11. В чем заключается физика дальнего тропосферного распространения радиоволн?
12. Как определяется величина рассеивающего объема при ДТР?
13. Перечислите механизмы ослабления радиоволн в тропосфере.
14. Как определяется полное ослабление?
15. Запишите выражение для полного внутреннего отражения (поворота) луча в ионосфере.
16. Сформулируйте понятие критической частоты ионосферы.
17. Что означает термин «мертвая зона» при отражении радиоволн от ионосферы? Чем определяются размеры мертвой зоны?
18. Какие виды сложных траекторий распространения радиоволн в ионосфере могут иметь место?
19. Поясните физику эффектов многолучевости и Фарадея при распространении радиоволн в ионосфере.
20. Как определяются потери энергии при распространении радиоволн в ионосфере?
21. Назовите механизмы, приводящие к замираниям радиоволн в атмосфере, и сформулируйте способы их описания и борьбы с ними.
22. В чем заключаются особенности распространения СДВ и ДВ?
23. В чем заключаются явления «антипода» и «свистящего атмосферика»?

24. Расскажите о методах расчета напряженности поля в диапазонах СДВ и ДВ.
25. В чем заключаются особенности распространения СВ?
26. Расскажите о природе замираний в диапазоне СВ.
27. Методы расчета напряженности поля в диапазоне СВ.
28. Условия применения КВ для построения линий связи.
29. Особенности распространения КВ.
30. Поясните механизмы замираний в диапазоне КВ.
31. Расскажите о методах расчета коротковолновых линий связи.
32. Для чего осуществляется перестройка частоты на КВ линиях связи в течение суток?
33. Механизмы распространения метровых волн.
34. Особенности распространения дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн.
35. Распространение радиоволн оптического диапазона.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ**

1. *Грудинская, Г. П.* Распространение радиоволн: учеб. пособие / Г. П. Грудинская. – М.: Высшая школа, 1975. – 280 с.
2. *Калашников, В. С.* Электродинамика и распространение радиоволн (электродинамика): письменные лекции / В.С. Калашников Л.Я. Родос. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2002, 2004.- 92 с.
3. *Калинин, А. И.* Распространение радиоволн и работа радиолний: учеб. пособие / А.И. Калинин, Е.Л. Черенкова. – М.: Связьиздат, 1971. – 439 с.
4. *Фок, В. А.* Проблемы дифракции и распространения радиоволн: монография / В.А. Фок. – М.: АН СССР, 1970. – 518 с.
5. *Азрилянт, П .А.* Численные результаты теории дифракции радиоволн вокруг земной поверхности: монография / П.А. Азрилянт, М.Г. Белкина. – М.: Советское радио, 1957. – 312 с.
6. *Черный, Ф. Б.* Распространение радиоволн: учеб. пособие / Ф.Б. Черный. – М.: Советское радио, 1972. – 463 с.
7. *Долуханов, М. П.* Распространение радиоволн: учеб. пособие / М.П. Долуханов. – М.: Связь, 1972. – 336 с.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Атмосфера 11, 17, 38 – 51
- Береговая рефракция 32
- Волноводное распространение 55
- Гироманнитная частота 49
- Гюйгенсовские вторичные источники 12
- Дальнее тропосферное распространение 56
- Двойное лучепреломление 66
- Диапазоны радиоволн 5
- Дифракция радиоволн 17 – 18
- Длинные радиоволны 5, 70 – 74
- Закон секанса 63
- Земная (поверхностная) волна 5, 74, 76
- Зона молчания 77
- Зона Френеля 12 – 15
- Индекс рефракции 44 – 46
- Интерференция электромагнитных волн 21
- Интерференционная формула 22
- Ионосферная (пространственная) волна 5, 74
- Квадратичная формула Введенского 24
- Короткие волны 6, 76 – 79
- Коэффициенты отражения 22 – 23
- Критическая частота 63
- Луч Педерсена 65
- Магнитное поле Земли 48 – 49
- Максимально применимая частота 76, 79
- Метод зеркальных отображений 34
- Множитель ослабления 11 – 12, 22 – 29
- Модуль множителя ослабления 11, 23
- Необыкновенная волна 66
- Нормальная рефракция 54
- Нормальная тропосфера 52
- Область прямой видимости 20 – 21, 25
- Область, существенная для распространения 12 – 15

Область тени 17, 26  
Обыкновенная волна 66  
Оптимальная рабочая частота 80 – 82  
Оптические радиоволны 6, 84  
Отрицательная рефракция 54  
Параболическая аппроксимация 64  
Плазменная частота (Ленгмюра) 48  
Поглощение (ослабление) радиоволн 59 – 61, 68  
Положительная рефракция 54  
Помехи в работе радиолинии 16  
Приближение Борна 56  
Приведенные высоты 25 – 26  
Принцип Гюйгенса-Френеля 12  
Радиус зоны молчания 77  
Радиус кривизны 52  
Расстояние прямой видимости 20  
Рефракция радиоволн 51 – 55  
Свехдлинные радиоволны 5, 70  
Сверхрефракция 54  
Свистящий атмосферик 73  
Скачки напряженности поля 30  
Средние радиоволны 5, 74 – 76  
Турбулентное движение воздуха 45  
Ультракороткие радиоволны 6, 82  
Уравнение траектории 52  
Уравнение радиосвязи 9  
Участок, существенный для отражения 34  
Фаза множителя ослабления 11  
Формула идеальной радиосвязи 9  
Численное (нормированное) расстояние 18  
Эквивалентный радиус Земли 52 – 53  
Эффект Фарадея 67  
Эхо на коротких волнах 78

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	СТР.
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	4
1.1 КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОВОЛН ПО ДИАПАЗОНАМ И СПОСОБУ РАСПРОСТРАНЕНИЯ.....	4
1.2 ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ.....	7
1.3 ПОТЕРИ ПЕРЕДАЧИ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ.....	10
1.4 МНОЖИТЕЛЬ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛЯ СВОБОДНОГО ПРОСТРАНСТВА.....	11
1.5 ОБЛАСТЬ ПРОСТРАНСТВА, СУЩЕСТВЕННАЯ ДЛЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН.....	12
1.6 ФЛЮКТУАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН НА ЕСТЕСТВЕННЫХ ТРАССАХ.....	16
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	16
2. ВЛИЯНИЕ ЗЕМЛИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН.....	17
2.1 ДИФРАКЦИЯ РАДИОВОЛН НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	18
2.2 РАСЧЕТ МНОЖИТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ В ОСВЕЩЕННОЙ ЗОНЕ.....	21
2.3 УЧЕТ ВЛИЯНИЯ КРИВИЗНЫ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	25
2.4 РАСЧЕТ МНОЖИТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ ТЕНИ И ПОЛУТЕНИ.....	26
2.5 ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН.....	29
2.6 ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ НА ВЕЛИЧИНУ МНОЖИТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ.....	33
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	38
3. ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН.....	38
3.1 СОСТАВ И СТРОЕНИЕ АТМОСФЕРЫ.....	38
3.2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АТМОСФЕРЫ.....	43
3.2.1 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТРОПОСФЕРЫ И СТРАТОСФЕРЫ.....	43
3.2.2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИОНОСФЕРЫ.....	46
3.3 ВЛИЯНИЕ ТРОПОСФЕРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН.....	51
3.3.1 РЕФРАКЦИЯ РАДИОВОЛН В ТРОПОСФЕРЕ.....	51
3.3.2 ДАЛЬНЕЕ ТРОПОСФЕРНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ (ДТР).....	56
3.3.3 ОСЛАБЛЕНИЕ РАДИОВОЛН В ТРОПОСФЕ.....	59
3.4 ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН.....	61
3.5 ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРЫ НА ЗАМИРАНИЯ СИГНАЛОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН ВДОЛЬ ЗЕМЛИ.....	68
3.6 ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНОВ.....	70
3.6.1 СВЕРХДЛИННЫЕ И ДЛИННЫЕ РАДИОВОЛНЫ (СДВ И ДВ).....	70
3.6.2 СРЕДНИЕ ВОЛНЫ (СВ).....	74
3.6.3 КОРОТКИЕ ВОЛНЫ (КВ).....	76
3.6.4 ОСНОВЫ РАСЧЕТА КВ ЛИНИЙ СВЯЗИ.....	79
3.6.5 УЛЬТРАКОРОТКИЕ ВОЛНЫ (УКВ).....	82
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	84
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ.....	85
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.....	86

Леонид Яковлевич Родос

Электродинамика и распространение радиоволн  
(распространение радиоволн)  
Учебно-методический комплекс  
Учебное пособие

Редактор А.М. Никитина

Сводный темплан 2007 г.  
Санитарно-эпидемиологическое заключение №  
78.01.07.953.П.005641.11.03  
Лицензия ЛР № 020308 от 14.02.97 г.

---

Подписано в печать	07	Формат 60x84 1/16.
Б. кн. – журн		П.л. 5.75 Б.л.2.875 Изд–во СЗТУ
Тираж		Заказ

---

Северо–Западный государственный заочный технический университет  
Изд–во СЗТУ, член Издательско–полиграфической ассоциации вузов  
Санкт–Петербурга  
191186, Санкт–Петербург, ул. Миллионная, 5