

**Министерство Образования Украины  
Донецкий Государственный Технический Университет  
Военная кафедра**

к.т.н., доцент В.В. Паслен  
Г.И. Тарасенко  
Е.И. Юркин

**Распространение радиоволн и антенны войсковых  
радиостанций**

Методическое пособие

Под общей редакцией  
к.п.н., доцента  
Стефаненко П.В.

Методическое пособие обсуждено и  
утверждено на заседании ПМГ №4.  
От “\_\_\_” января 1998 г.  
Протокол № \_\_\_\_\_

**Донецк ДонГТУ – 1998г.**

ББК 32.841  
УДК 621.396.67  
621.371

к.т.н., доцент Паслен В.В. Владимир Владимирович  
Тарасенко Г.И. Геннадий Ильич  
Юркин Е.И. Евгений Иванович

Распространение радиоволн и антенны: Методическое пособие/ под общей редакцией доц. П.В. Стефаненко. – Донецк: Военная кафедра ДонГТУ, 1998 г.– 36 с.

Рассматриваются основные понятия о распространении радиоволн, строение и электрические свойства земной поверхности и атмосферы, общие сведения и классификация антенн, основные показатели антенн, антенны используемые в радиосвязи, особенности построения и применения полевых радиостанций.

Предназначено для студентов проходящих военную подготовку по ВУС 121200, 121202, 121203.

Компьютерная верстка:

студент Скидан Д.А.

## Введение.

Любая линия связи состоит из 3-х основных частей передающего устройства, приемного устройства и промежуточного звена – соединяющей их линии. В случае проводной связи роль линии выполняет воздушный провод или кабель. В случае радиосвязи роль промежуточного звена выполняет среда, пространство, в котором распространяются радиоволны.

Наука о распространении радиоволн занимается изучением этого промежуточного звена, т.е. изучением свойств земной поверхности и атмосферы с точки зрения влияния их на распространение радиоволн. Задача исследователей и инженеров, работающих в области распространения радиоволн, заключается в изучении законов распространения и изыскание способов выбора нужной длины волны, мощности передатчика и напряженности поля, необходимой для уверенного приема информации.

Особенностью науки о распространении радиоволн является очень большой круг охватываемых ею вопросов. В основном это вопросы радиотехники, но, кроме того, часто приходится обращаться к физике, геофизике, астрономии, электронике и т.д. В области распространения радиоволн выполнено много теоретических и экспериментальных работ. Большой вклад в это дело внесли отечественные ученые Б.А. Введенский, А.Г. Аренберг, В.А. Фок, Г.П. Грудинская. Многие вопросы, еще не решены и требуют дальнейшей сложной теоретической, а также длительной и обширной экспериментальной работы.

Для понимания особенностей функционирования антенн в реальных условиях, правильного выбора рабочих частот радиостанций и параметров антенн большое значение имеют свойства среды, в которой распространяются радиоволны. Поэтому методическое пособие традиционно начинается с вопросов распространения радиоволн и дальнейшим переходом к антенным устройствам.

Значительный вклад в теорию развития антенн внесли отечественные ученые Бахрах Л.Д., Фельда Я.Н., Драбнин А.Л., Никольский В.В., Марков Г.Т., Сазонов Д.М. и др.

# 1. Основные понятия о распространении радиоволн.

## 1.1 Электромагнитное поле.

Известно, что если по проводу проходит переменный ток, то вокруг провода возникают переменные электрическое и магнитное поля образующие вместе электромагнитное поле (ЭМП).

ЭМП, движущееся в пространстве, иначе называют электромагнитной волной (ЭМВ). Раздельно друг от друга переменные электрическое и магнитное поля существовать не могут. Всякое изменение электрического поля вызывает появление переменного магнитного поля, и наоборот, всякое изменение магнитного поля вызывает появление переменного электрического поля. Нельзя называть ЭМП постоянные электрическое и магнитные поля, существующие одновременно в каком-либо месте пространства. В этом случае оба поля самостоятельны и не взаимодействуют между собой. А ЭМП представляет собой сочетание равноправных переменных электрического и магнитного полей, взаимодействующих друг с другом, как бы поддерживающих друг друга.

Взаимная связь между переменными электрическим и магнитным полями объясняет причину движения ЭМП в пространстве. Изменения электрического поля создают в окружающем пространстве магнитное поле, которое меняется, т.к. меняется создавшее его электрическое поле. Но изменяющееся магнитное поле в свою очередь создает вокруг себя электрическое поле, которое тоже изменяется и создает опять магнитное поле и т.д. ЭМП представляет собой колебательный процесс, захватывающий все новые части пространства.

При своем распространении ЭМП может потерять связь с проводом, вокруг которого оно первоначально создавалось. Если выключить ток в проводе, то ЭМП будет продолжать движение в пространстве. Принято говорить, что провод с переменным током излучает ЭМП в пространстве. ЭМП несут с собой энергию, полученную от тока в проводе. Чем больше мощность переменного тока в проводе, тем больше энергия излучаемых волн. Эта энергия пропорциональна квадрату частоты. Эффективное излучение ЭМП возможно только в том случае, когда длина провода соизмерима с длиной волн.

ЭМВ свободно распространяются в безвоздушном пространстве. Однако неправильно считать, что ЭМВ есть движения энергии в пустоте, т.к. в природе нет пустоты и нет энергии без материи. В результате последних достижений науки можно утверждать, что ЭМВ представляют собой движущуюся материю.

Основные свойства ЭМП и составляющих его полей.

— ЭМП всегда движется в данной среде со скоростью:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}},$$

где  $\epsilon$  и  $\mu$  — диэлектрическая и магнитная проницаемость среды;

$c$  — скорость распространения ЭМП в вакууме ( $3 \cdot 10^8$  м/с).

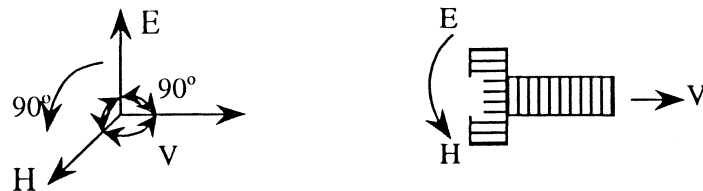
— Электрические и магнитные силовые линии взаимно перпендикулярны.

— Магнитные силовые линии замкнуты и охватывают проводник с током или переменное магнитное поле.

- Электрические силовые линии либо идут от одного электрического заряда к другому либо представляют собой замкнутые линии, охватывающие переменное магнитное поле.
- Магнитные силовые линии у поверхности проводника с током параллельны этой поверхности.
- Электрические силовые линии не могут идти около поверхности идеального проводника вдоль нее, а всегда перпендикулярны этой поверхности. Т.е., если имеется идеальный проводник, не обладающий сопротивлением, то при прохождении тока в нем не образуется падение напряжения. Все его точки имеют один и тот же потенциал. Значит, вдоль его поверхности электрические силовые линии идти не могут, т.к. они всегда проходят через точки с разными потенциалами.

Два последних свойства определяют структуру ЭМП около поверхности проводника, т.е. на границе между проводником и внешним пространством. Поэтому их называют граничными условиями. ЭМП всегда имеет такую структуру, при которой выполняются эти граничные условия.

Сила поля характеризуется величиной напряженности поля, представляющей собой вектор. Как известно, векторами называются величины, имеющие не только числовые значения, но и определенное направление. На чертежах векторы принято обозначать стрелками, причем длина стрелки может показывать числовое значение вектора в каком-либо масштабе, а направление стрелки должно соответствовать направлению действия данного вектора. Вектор напряженности поля в данной точке всегда направлен по касательной к силовой линии, проходящей через эту точку.



На рис. изображены для поперечной волны векторы напряженности электрического поля  $E$ , напряженности магнитного поля  $H$  и скорости распространения волны  $V$ . Взаимное расположение этих векторов для поперечной волны подчиняется следующему правилу: если вращать винт по кратчайшему расстоянию от  $E$  к  $H$  (по часовой стрелке), то его поступательное движение покажет направление вектора  $V$ .

На практике стрелками изображают только два вектора, например  $V$  и  $H$ , а третий вектор, перпендикулярный плоскости чертежа, показывают в виде крестика, если он направлен от нас, или в виде точки, если он направлен на нас.



В ЭМВ векторы  $E$  и  $H$  в каждой точке пространства непрерывно изменяют свою величину. Они изменяются также и вдоль направления распространения волны.

От величины  $E$  и  $H$  зависит мощность ЭМВ. Если выразить  $E$  в вольтах на метр и  $H$  в амперах на метр, то их произведение дает мощность в ваттах потока энергии, переносимой ЭМВ через  $1\text{ м}^2$  поперечного сечения волны.

Произведения векторов  $E$  и  $H$  называют вектором Пойтинга и измеряют в ваттах на квадратный метр. По направлению этот вектор совпадает с вектором  $V$ .

### 1.2. Радиоволны.

Радиоволны представляют собой электромагнитные колебания несущие информацию. Важной характеристикой радиоволны является расстояние между двумя узлами или пучностями волны, называемые длиной волны и обозначаемые  $\lambda$ . Частота электромагнитных колебаний связана с длиной волны соотношением

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

где  $\lambda$  – длина волны,

$f$  – частота колебаний,

$c$  – скорость распространения волны (в пустоте она равна  $3 \cdot 10^8$  м/сек.). При распространении в какой-либо другой среде скорость движения волны изменяется:

$$V = \frac{c}{n},$$

где  $n$  – коэффициент преломления среды.

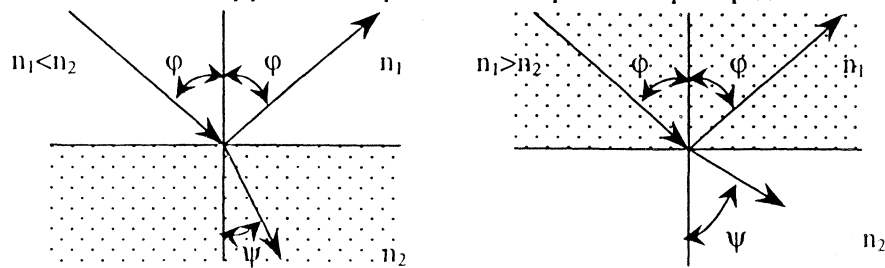
Для любой среды, кроме вакуума,  $n > 1$ .

Вспомним основные свойства распространения радиоволн:

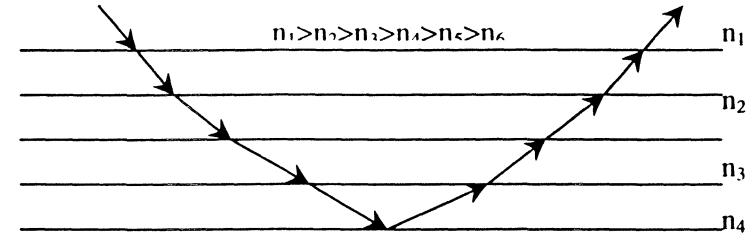
1. В однородной среде, т.е. среде, свойства которой не меняются по всему объему, волна движется прямолинейно с постоянной скоростью.
2. При переходе волны из одной среды в другую на границе раздела двух сред происходит преломление и отражение волны. Волна частично проходит во вторую среду, причем направление ее движения меняется, и частично отражается от границы раздела. При этом угол падения равен углу отражения. Угол падения  $\varphi$  и угол преломления  $\psi$  связаны соотношением:

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = \frac{n_2}{n_1},$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – коэффициенты преломления первой и второй сред.



3. Когда свойства среды (коэффициент преломления) плавно меняются, т.е. среда неоднородна, волны как бы непрерывно преломляются и движутся по криволинейной траектории. Явление искривления траектории волны в неоднородной среде называется **рефракцией**.



В том случае, когда волна проходит из среды с большим коэффициентом преломления, при достаточно большом угле падения может наступить явление полного внутреннего отражения, т.е. вся энергия волны отразится от границы раздела и не проникнет во вторую среду. Явление полного внутреннего отражения может иметь место и в неоднородной среде, когда коэффициент преломления среды уменьшается в направлении движения волны. При этом волна не проникает дальше некоторого определенного расстояния.

4. Нередко в место приема приходит не одна, а две или несколько волн одной и той же частоты. Эти волны могут иметь различные фазы, если они пришли от разных источников или от одного источника различными путями. Явление наложения волн одинаковой частоты, но разной фазы называется интерференцией. В зависимости от разности фаз результирующее поле может оказаться либо больше, либо меньше полей отдельных волн.
5. Если на пути распространения волн встречается непрозрачное препятствие, то волна стремится обогнуть его. Это явление называется дифракцией.

Дифракция наиболее сильно проявляется в том случае, когда размеры препятствия того же порядка, что и длина волны. Если препятствие очень мало по сравнению с длиной волны, то дифракция сказывается так сильно, что на интенсивность поля (за препятствием) оно не влияет. При больших размерах препятствия волны практически не огибают его, и за ним образуется область тени.

6. Интенсивность радиоволн (электромагнитных колебаний) можно характеризовать напряженностью электрического или магнитного поля, которое, как уже говорилось выше связано между собой определенным соотношением (вектором Пойтинга). Обычно измеряют напряженность электрического поля, так как это практически удобнее. Напряженность электрического поля измеряется в вольтах на метр [В/м], а магнитного поля в амперах на метр [А/м].

Часто напряженность поля измеряется в относительных логарифмических единицах (дБ):

$$1 \text{ дБ} = 20 \lg \frac{E}{E_0}.$$

Обычно принимают  $E_0 = 1$  мкВ/м или 1 мВ/м.

Представим себе антенну, помещенную в однородную среду и одинаково излучающую во все стороны. Такая антенна называется ненаправленной. В любом направлении на одном и том же расстоянии от такой антенны напряженность поля одинакова и имеет одинаковую фазу. Поверхность, на которой фазы волн одинаковы, называется фронтом волны. Такие волны называются сферическими. Небольшие участки сферического фронта волны можно приближенно считать плоскими. В этом смысле говорят о плоских волнах. Понятие о плоских волнах упрощает рассмотрение многих вопросов распространения радиоволн.

Модули векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в плоской ЭМВ связаны соотношением:

$$\epsilon_0 \epsilon \cdot E^2 = \frac{H^2}{\mu_0 \cdot \mu}$$

В вакууме  $\epsilon = \mu = 1$ , тогда:

$$H = \sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0} \cdot E = \frac{E}{c}$$

где  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$  – скорость света в вакууме,

$\epsilon_0$  и  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные в СИ.  $\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.  
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

## 2 Стрoение и электрические свойства земной поверхности и атмосферы.

Средой, где распространяются радиоволны, являются атмосфера и земная поверхность. Радиоволны могут распространяться в атмосфере непосредственно вблизи земной поверхности. В этом случае на их распространение большое влияние оказывают свойства земной поверхности и нижних слоев атмосферы.

Радиоволны также могут распространяться и путем отражения их от верхних ионизированных слоев атмосферы. В этом случае условия распространения зависят главным образом от состояния ионизированных слоев атмосферы. С точки зрения распространения радиоволн в атмосфере следует различать две области:

- нижний слой атмосферы, названный тропосферой простирается непосредственно от поверхности земли до высоты 10-14 км;
- верхние ионизированные слои, расположенные на высоте от 60 до 400-600 км названные ионосферой.

### 2.1. Земная поверхность.

Установить свойства земной поверхности довольно сложно, так как почва неоднородно по своему составу. Электрические свойства сухой и влажной почвы различны, так же различаются свойства пресной и морской воды. Например, для УКВ все виды земной поверхности, кроме поверхности моря, можно считать почти идеальным диэлектриком. Это упрощает рассмотрение многих вопросов. Но в УКВ диапазоне возникает другая проблема: даже небольшие неровности поверхности оказывают существенное влияние на распространение радиоволн.

При падении радиоволн на неровную поверхность получается рассеянное отражение, причем напряженность поля отраженной волны ослабляется сильнее по сравнению со случаем отражения от гладкой поверхности. Отражения от земли носят рассеянный характер в тех случаях, когда высота неровности  $h$  больше некоторой волны, зависящей от длины волны  $\lambda$  и угла падения волны на поверхность  $\varphi$ :

$$h > \frac{\lambda}{8 \cos \varphi}.$$

Для скользких лучей рассеяние вызывается более высокими неровностями, чем для отвесно падающих лучей.

Понятие “неровность поверхности” различно для различных длин волн:

- для метровых волн неровностями являются холмы, здания, деревья;
- для волн длиной 3-10 см даже травяной покров и небольшие бугры уже являются неровностью.

## 2.2. Тропосфера

В пределах тропосферы воздух имеет такой же состав, как и у земной поверхности, т.е. состоит главным образом из азота (78% по объему) и кислорода (21% по объему). Состояние воздуха в тропосфере характеризуется его давлением, температурой и влажностью. С повышением над земной поверхностью плотность воздуха уменьшается; обычно уменьшается также влажность и температура, т.к. в пределах тропосферы воздух нагревается за счет излучения тепла земной поверхностью.

Параметры тропосферы меняются в зависимости от времени года, суток и метеорологических условий. Наблюдения за изменением метеоусловий ведутся на метеостанциях, как в приземном слое, так и на высоте. Для этого измерительные приборы поднимают на воздушных шарах или самолетах. Измерения проводят через небольшие интервалы по высоте, что дает возможность подробно исследовать строение тропосферы.

Коэффициент преломления воздуха обычно считают равным единице. Но это справедливо только в первом приближении. В действительности коэффициент преломления тропосферы зависит от давления, температуры и влажности воздуха. При нормальных давлении, температуры и влажности коэффициент преломления превышает единицу примерно на  $4 \cdot 10^{-4}$ . Он непостоянен на высоте и в общем с повышением над земной поверхностью уменьшается, стремясь к единице. Поэтому нижние слои атмосферы являются неоднородной средой, причем параметры ее меняются в зависимости от времени суток, года и погоды. Неоднородность изменения коэффициента преломления атмосферы существует до высоты  $\approx 10$  км. На этой высоте коэффициент преломления превышает единицу на  $109 \cdot 10^{-6}$  и постоянен на всем земном шаре. Как видно абсолютная величина коэффициента преломления атмосферы изменяется мало.

Как показала практика на распространение радиоволн оказывает влияние не абсолютная величина коэффициента преломления, а закон его изменения с высотой. Многочисленные наблюдения показали, что в средних широтах среднее состояние атмосферы характеризуется равномерным изменением ее коэффициента преломления с высотой. Атмосфера, в которой коэффициент преломления уменьшается на  $4 \cdot 10^{-8}$  на каждый метр изменения высоты, называется "стандартной атмосферой".

Закон изменения коэффициента преломления тропосферы с высотой иногда сильно отличается от линейного. Бывают случаи, когда коэффициент преломления сначала убывает с высотой, затем с некоторого уровня начинает возрастать и затем снова убывать. Иногда коэффициент преломления возрастает от земной поверхности до высоты в несколько десятков метров, а затем начинает уменьшаться. Неоднородность атмосферы в вертикальном направлении приводит к искривлению траектории волны, т.е. РЕФРАКЦИИ.

Тропосфера неоднородна и в горизонтальном направлении. В ней имеются местные неоднородности, причиной появления которой является турбулентное движение воздуха в атмосфере, т.е. движение с завихрением. Отдельные участки земной поверхности нагреваются различно и от этого в тропосфере появляются восходящие и нисходящие воздушные потоки, а от этого на отдельных участках плотность воздуха оказывается больше или меньше. Следовательно, в отдельных точках атмосферы коэффициент преломления может значительно отличаться от среднего значения. Объемные неоднород-

ности тропосферы оказывают большое влияние на распространение радиоволн вызывая их рассеивание.

Энергия радиоволн также рассеивается капельками воды и частицами льда, содержащимися в атмосфере. Данное обстоятельство позволяет обнаруживать области выпадения дождя, а также грозные облака при помощи радиолокационных станций метрового диапазона. Полученные сведения служат для определения движения грозных облаков и штормов.

Проводимость воздуха очень мала, поэтому при распространении в тропосфере радиоволн длиннее 30 см они практически не испытывают поглощение. Более короткие волны поглощаются в капельках воды. Поле радиоволн высокой частоты наводит в капельках воды токи смещения, а за счет проводимости воды возникают потери, т.е. поглощение радиоволн. Сантиметровые и миллиметровые волны воздействуют на молекулы газов и претерпевают резонансное поглощение. Например: волны длиной 1,3 см поглощаются парами воды, волны длиной 0,5 см – кислородом воздуха.

## 2.3. Ионосфера

В 1902 году физики А. Кенелли и О. Хевисайд высказали смело предложение: верхние слои атмосферы должны состоять из ионизированного газа – т.к. они подвергаются прямому воздействию солнечного ультрафиолета и других жестких космических излучений. Ионизированный газ проводит электрический ток, а проводники отражают ЭМВ. Следовательно, радиоволны должны отражаться от верхних слоев атмосферы! Данная гипотеза вызвала много споров, которые затихли только в 1925 г., когда американские ученые Г. Брейт и М. Туве послали импульсный радиосигнал вертикально вверх, приняли отраженный сигнал и экспериментально определили высоту отраженного слоя. Долгое время ионосферу называли слой Хевисайда, пока не выяснилось, что слоев отражения несколько: летним днем их не меньше 4-х оказывается, один ионизированный слой образовался бы, если бы атмосфера была однородной и имела одинаковую температуру на всех высотах.

Ионизация – это процесс удаления электрона из "родного" атома. Она возможна при сильном нагреве, облучении квантами энергии, облучении воздуха элементарными частицами высоких энергий. Энергия сообщаемая атомам должна быть больше энергии ионизации атома, которая равна работе, совершаемой против сил поля ядра при "отрывании" электрона.

Состав верхних слоев атмосферы неоднороден и кроме того наблюдается несколько температурных инверсий (отклонений от нормального закона убывания температуры с высотой). Ближе всего к поверхности Земли на высоте 60-80 км расположен слой D. Это нерегулярное образование ионосферы существует только в дневные часы, когда велика интенсивность солнечного ионизирующего излучения.

На высотах 100-120 км постоянно существует слой E. В зависимости от времени суток и года изменяется лишь концентрация свободных электронов в этом слое. Ночью слой располагается выше, а днем – ниже, что связано с изменением потока ионизирующего излучения.

Самый верхний слой – слой F, располагается на высотах 150-400 км, где атмосферы уже практически нет, настолько разрежен воздух на этих высотах. Молекулы газов,

составляющих атмосферу, там распадаются на отдельные атомы, которые под воздействием ионизирующего излучения немедленно теряют внешние, наиболее удаленные от ядра электроны и становятся положительно заряженными ионами. Потерянные ими электроны становятся свободными и с огромными скоростями летают в верхних слоях атмосферы, пока не столкнутся с каким-нибудь положительным ионом. Путь, проходимый любой частицей между двумя столкновениями, называется длиной свободного пробега. В верхних слоях, где частиц мало, длина свободного пробега может быть очень большой. Процесс воссоединения электрона с ионом называется РЕКОМБИНАЦИЕЙ. Таким образом, содержание заряженных частиц в атмосфере определяется двумя процессами:

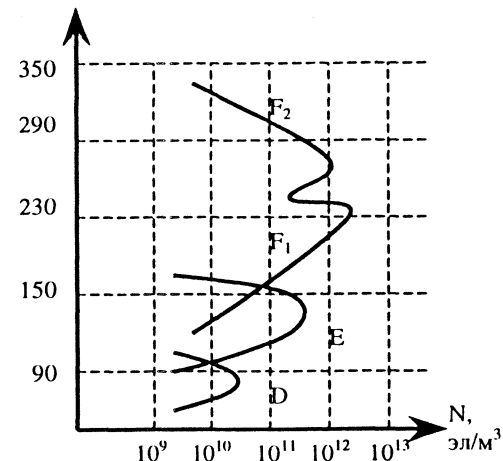
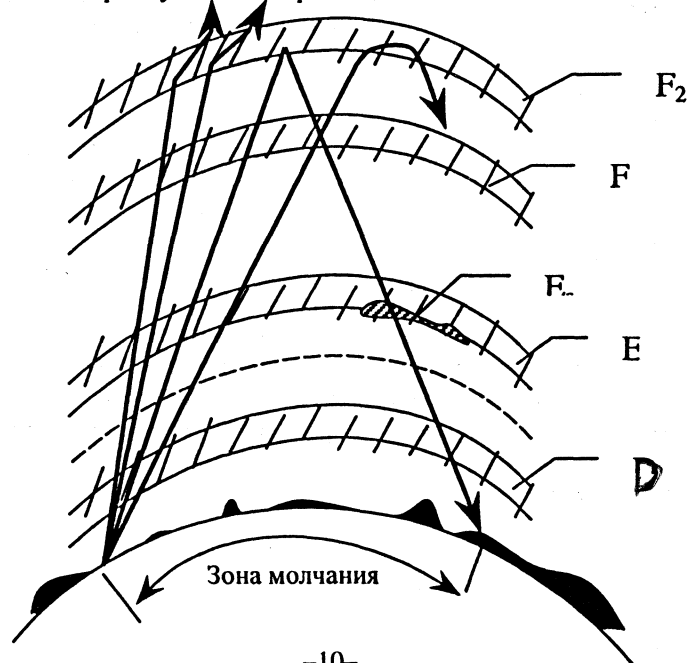
- ионизацией внешним излучением;
- рекомбинацией из-за соударения.

Теперь становится понятным, почему ионизированных атомов и молекул почти нет у поверхности Земли: поток ионизирующего излучения здесь очень мал, поскольку он уже поглотился в верхней атмосфере, а соударения очень часты и рекомбинация ионов и электронов происходит немедленно.

В верхних слоях все наоборот: поток ионизирующего излучения велик, а столкновения, приводящие к рекомбинации, относительно редки. Вот поэтому практически все атомы в самых верхних слоях ионосферы ионизированы.

Днем слой F распадается на два: F<sub>1</sub> и F<sub>2</sub>. Слой F<sub>1</sub> расположенный ниже и обусловлен ионизацией молекулярного азота, а слой F<sub>2</sub> — ионизацией атомарного кислорода. Ночью слой F<sub>1</sub> исчезает вследствие рекомбинации пар электрон-ион, а слой F<sub>2</sub> сохраняется, хотя концентрация электронов в нем значительно уменьшается.

На рисунке приведена схема расположения ионосферных слоев и примерный график связывающий электронную концентрацию с высотой.



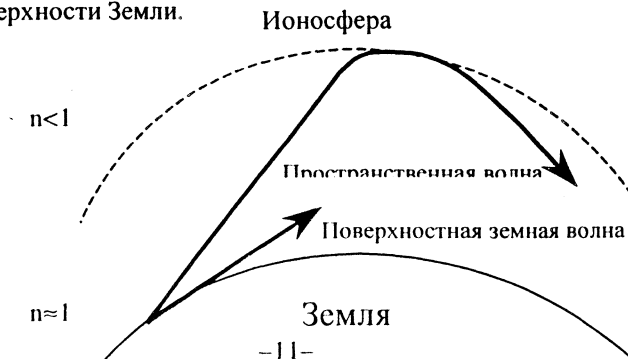
Кроме регулярных слоев в ионосфере время от времени на высоте 90-110 км образуется нерегулярный слой E<sub>s</sub>. Он представляет собой скопления ионизированного газа гораздо большей электронной плотности, чем плотность на той же высоте в окружающей среде. Этот слой появляется над сравнительно небольшой территорией (примерно 100X100 км) и может перемещаться под действием господствующих в ионосфере ветров в каком-либо направлении. Скорость перемещения этого слоя 150-250 км/ч. Слой E<sub>s</sub> чаще появляется в дневные часы летом в южных широтах.

Например: слой E<sub>s</sub> в экваториальной зоне в дневное время присутствует все время, а в средних широтах в дневное время летом 50-70% времени, т.е. 15-20 дней в месяц. Зимой в средних широтах слой появляется редко.

Не следует думать, что об ионосфере Земли уже все известно. Она преподносит ученым все новые и новые сюрпризы.

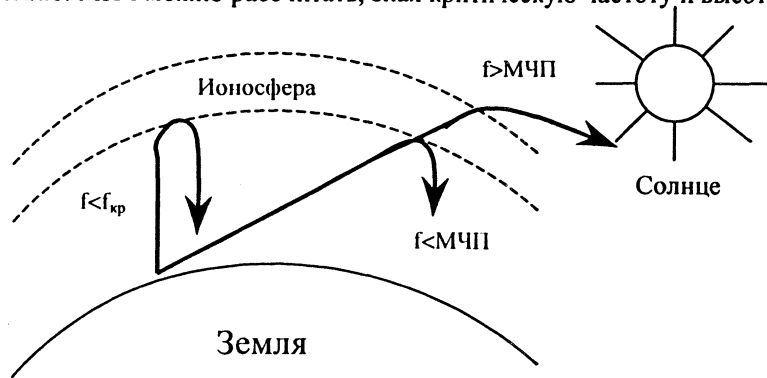
Теоретики рассчитали показатель преломления ионосферы для радиоволн — он получился меньше единицы. Напомню, что показатель преломления в вакууме равен единице, а для обычных сред он больше единицы. Кроме того, показатель преломления ионосферы оказался сильно зависящим от частоты колебаний ЭМВ — чем больше частота, тем он ближе к единице. Как известно, волна всегда преломляется в сторону среды с большим показателем преломления.

Следовательно: радиоволна, попадая из стратосферы в ионосферу, преломляется и направляется к поверхности Земли.



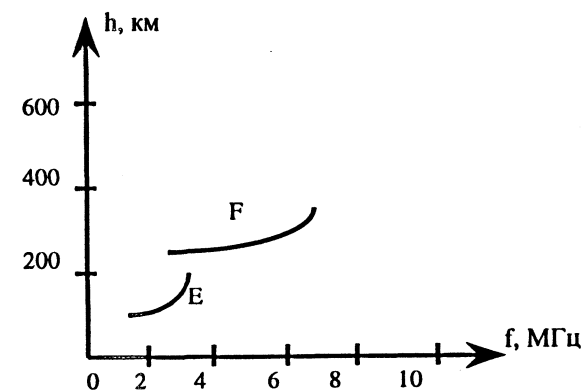
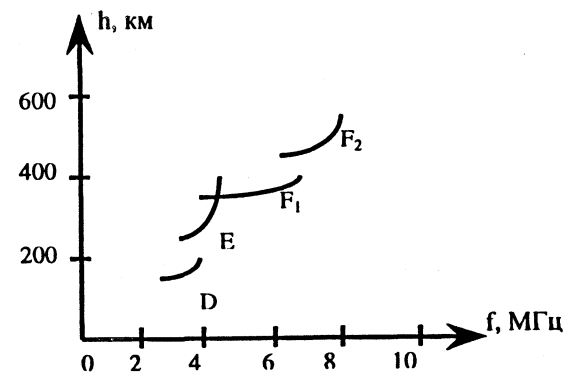
Способность ионосферы преломлять радиоволны зависит от угла падения волны на ионизирующий слой. Если радиолуч послать вертикально вверх, то он может вернуться обратно, а может, пронизав ионосферу исчезнуть в космосе. Все зависит от частоты электромагнитных колебаний: если она ниже некоторой критической частоты, то луч возвращается, если выше – то нет. Исследователи показали, что критическая частота зависит только от концентрации электронов в слое.

Радиолуч, посланный наклонно, отражается ионосферой лучше. Касательные к горизонту лучи обеспечивают связи на большую дальность. Частота колебаний касательного луча, еще отражающегося от ионосферы, выше критической частоты в 3-5 раз. Она называется максимально применяемой частотой (МПЧ). Волны с частотой выше МПЧ, посланные с поверхности Земли, уже ни при каких условиях не могут вернуться обратно на Землю. МПЧ можно рассчитать, зная критическую частоту и высоту слоя.



Путь радиоволн в ионосфере.

Для практики желательно знать два параметра – критическую частоту и высоту над поверхностью Земли. Они очень изменчивы и зависят от времени суток, сезона, географического положения места, где производятся измерения и от многих других причин, которые до настоящего времени еще хорошо не изучены. Сейчас во всем мире действуют тысячи ионосферных станций, представляющих собой КВ радиолокаторы. Они зондируют ионосферу короткими импульсами радиоволн вертикально вверх. Отраженные импульсы принимаются и регистрируются. Одновременно измеряется частота излучаемых импульсов. Станция устроена так, что на регистрирующем устройстве отраженные сигналы отображаются в координатах частота-высота. Полученный график называется ионосферной характеристикой или ионограммой. По нему можно сразу определить и высоту каждого из слоев, и их критические частоты. На рисунке показаны типичные ионосферные характеристики снятые в наших широтах летом, когда солнце высоко и интенсивность ионизации верхних слоев ионосферы велика, и зимой – при низком солнце.



Ионосферные характеристики.

Из графиков видно, что критические частоты летом выше, чем зимой. Причина та же – возросший уровень солнечной радиации – вызывает летнее повышение температуры тропосферы и критических частот ионосферы.

Чтобы составить прогноз ионосферного распространения необходимо учесть многое. Это время суток и года, фазу одиннадцатилетнего цикла солнечной активности, число пятен на солнце, возмущение магнитного поля Земли и многое другое. Благодаря этим прогнозам можно рекомендовать оптимальные частоты для радиосвязи в заданное время между любыми заданными пунктами.

Как говорилось выше МПЧ – это максимальная частота волны, еще отражающейся от ионосферы. Но вывод о том, что на всех частотах ниже МПЧ возможна связь, не совсем верен, т.к. с –понижением частоты возрастает поглощение радиоволн в ионосфере. Поэтому значительно понижать частоту тоже нельзя. С этой целью вводят понятие наименьшей применяемой частоты (НПЧ). Между МПЧ и НПЧ лежит оптимальная для данной трассы частота, на которой гарантирована надежная связь.

Например: в летний полдень значения МПЧ возрастают до 20-30 МГц. В этих условиях хорошо проходят волны 13 и 16 метровых диапазонов, а в диапазонах 41 и 49 м



можно принимать только местные радиостанции, сигнал которых распространяется поверхностной волной. К вечеру происходит “оживление” диапазонов 19, 25 и 31 метровых, а в диапазоне 13 м уже не слышно радиостанций. Ну а ночью диапазоны 41 и 49 м уже переполнены сигналами радиостанций.

Часто радисты используют “термины ночные” волны (длиннее 25м) и “дневные волны” (короче 25м). То же повторяется и при смене сезонов года: зимой лучше приходят более длинные волны.

Уровень сигнала удаленной радиостанции зависит не только от времени суток и года. В течение нескольких минут он может изменяться в сотни раз. Происходит хорошо известное замирание сигнала (фрединг). Основная причина которого интерференция нескольких волн, пришедших от передатчика к приемнику различными путями. С замираниями стараются бороться, применяя различные системы автоматического регулирования усиления приемника. Эффективнее прием на несколько разнесенных в пространстве антенн.

Еще существеннее суточные измерения в прохождении радиоволн в диапазоне средних волн. Если включить приемник в диапазоне средних волн днем, то мы услышим 2-3 местные радиостанции, а ночью — массу радиостанций разных городов и стран. Это объясняется тем, что волны СВ диапазона отражаются слоем E, критическая частота которого достигает несколько МГц. Днем же ниже слоя E появляется слой D сильно ионизирующий волны СВ и ДВ диапазона.

### 3 Общие сведения и классификация антенн.

Особенностью работы всех типов радиооборудования является использование ЭМВ для передачи и приема информации. Излучение и прием ЭМВ осуществляется с помощью антенн.

Антенны подключаются к приемо-передающей аппаратуре с помощью фидеров, поэтому их часто рассматривают как одно целое — антенно-фидерное устройство (АФУ). Это обусловлено тем, что их характеристики и параметры часто взаимосвязаны и они объединяются в единую конструкцию.

АФУ являются составными элементами радиосвязи. Поэтому они оказывают прямое влияние на энергетику и дальность действия радиолинии, а также на ее развед- и помехозащищенность.

Рациональным построением и использованием антенн, их оптимальным размещением и взаимной ориентацией с учетом пространственной и частотной избирательности могут быть решены важные задачи электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств.

Освоение радиосвязью широкого диапазона ЭМВ обусловили создания большого количества типов антенн.

Антенны можно классифицировать по следующим основным признакам:

- по назначению: передающие, приемные и приемо-передающие;
- по области применения: связные, телевизионные, радиолокационные, радионавигационные и т.д.;
- по диапазону волн: длинноволновые, средневолновые, коротковолновые, метровые, дециметровые, сантиметровые, миллиметровые, оптические;
- по направленности излучения (приемные): направленные и ненаправленные;
- по принципу действия и конструкции: линейные, апертурные (поверхностные) и антенные решетки;
- по месту установки: наземные, самолетные, вертолетные, спутниковые и т.д.

Передающая антенна преобразует энергию токов высокой частоты в энергию ЭМВ и концентрирует излучение этой энергии в заданных направлениях. Она же определяет вид поляризации излучения.

Приемная антенна преобразует энергию ЭМВ в энергию высокочастотных токов.

Характер процессов, происходящих в приемной и передающей антеннах, свидетельствует об их обратимости, т.е. о возможности использования одной и той же антенны в качестве передающей и приемной.

Теоретически эта возможность обоснована принципом взаимности, который устанавливает; основные параметры антенны в режиме прима и передачи одинаковы.

Применение одной антенны в радиоэлектронных устройствах позволяет получить некоторые технические преимущества, например уменьшается масса и габариты оборудования.

Направленными называются антенны, которые излучают (принимают) электромагнитную энергию в определенных направлениях.

Ненаправленными называют антенны, которые излучают (принимают) электромагнитную энергию практически равномерно во всех направлениях.

## 4 Основные показатели антенн.

Параметры передающих и приемных антенн в основном одинаковы, поэтому сначала рассмотрим показатели передающих антенн, а затем особенности характеристик приемных антенн.

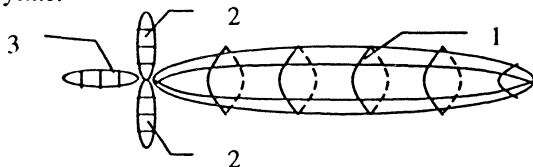
### 4.1. Параметры передающих антенн.

Диаграмма направленности (ДН) – это графическое изображение зависимости напряженности поля излучения от направления. Чтобы построить ДН характеристики поля измеряют на одинаковом расстоянии от антенны.

Т.к. напряженность поля характеризуется амплитудой, фазой и поляризацией, то ДН могут быть соответственной амплитудной, фазовой и поляризационной.

Чаще всего на практике пользуются амплитудной ДН, которая выражает зависимость напряженности электрической составляющей поля  $E(\varphi, \alpha)$ . Углы  $\varphi$  и  $\alpha$  в полярной системе координат – соответственно азимут и угол места. В некоторых случаях пользуются ДН по мощности. Она представляет собой графическую зависимость мощности  $P_{\Sigma}$ , излучаемой антенной от направления излучения.

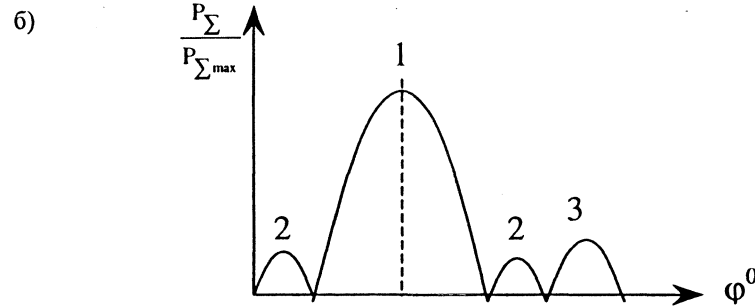
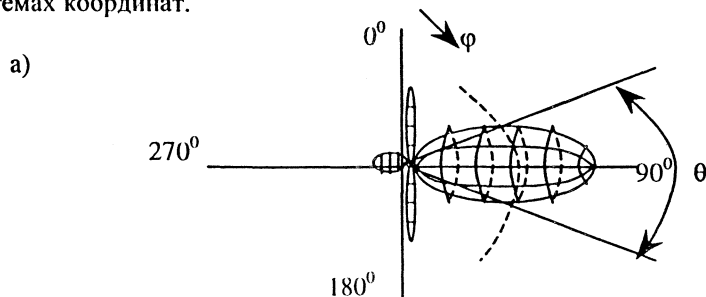
В пространстве ДН представляет собой некоторую замкнутую поверхность, например как на рисунке.



У любой реальной антенны имеется направление максимального излучения, называемое главным (основным) лепестком 1 ДН. Кроме этого могут быть боковые лепестки 2 и задний 3.

Строить ДН не всегда удобно и просто на практике обычно ограничиваются ДН в горизонтальной и вертикальной плоскостях. ДН строят либо в полярной системе координат, либо в прямоугольной (декартовой), которая позволяет более точно изобразить узкие ДН. Для оценки направленных свойств антенн обычно интересуются не абсолютной величиной, а относительным распределением ЭМП, поэтому строят нормированные ДН, т.е. зависимости  $E(\varphi)/E_{\max}$  или  $P_{\Sigma}(\varphi)/P_{\Sigma \max}$ .

На рисунке показаны нормированные ДН в полярной (а) и прямоугольной (б) системах координат.



Распределение излученной антенной энергии в пространстве характеризуется шириной ДН. Она измеряется углом  $\theta$  между двумя ближайшими к направлению максимума основным лепестка направлениями, в которых мощность излучения уменьшается в два раза. Т.к. мощность излучения пропорциональна квадрату напряженности поля, то половинной мощности соответствует уровень  $\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.707$  напряженности.

Коэффициент направленного действия (КНД) – антенны  $D$  – это число показывающее во сколько раз нужно увеличить мощность излучения абсолютно ненаправленной антенны  $P_{\Sigma \text{ нн}}$  по сравнению с мощностью излучения направленной антенны  $P_{\Sigma \text{ н}}$ , чтобы сохранить неизменной напряженность поля в месте приема.

$$D = \frac{P_{\Sigma \text{ нн}}}{P_{\Sigma \text{ н}}}$$

Иначе говоря КНД характеризует распределение концентрации электромагнитной энергии в пространстве.

Коэффициент полезного действия  $\eta$  характеризуется ее эффективностью как преобразователя подводимой к ней высокочастотной энергии в энергию радиоволн.

Любой антенне присущи потери энергии, поэтому излучаемая мощность  $P_{\Sigma}$ , меньше мощности подводимой к антенне  $P_A$ . КПД – это отношение излучаемой мощности  $P_{\Sigma}$  к мощности  $P_A$ :

$$\eta = \frac{P_{\Sigma}}{P_A}$$

Коэффициент усиления антенны  $G$  – это число показывающее во сколько раз мощность, излучаемая реальной антенной в данном направлении больше мощности излучения абсолютно ненаправленной антенны без потерь. Количественно  $G$  определяется как произведение КНД на КПД.

$$G = D\eta$$

КУ более полно характеризует антенну, как КНД, т.к. он учитывает и концентрацию энергии в определенном направлении, и потери мощности в антенне.

Сопротивление излучения антенны  $R_{\Sigma}$  характеризует способность излучать электромагнитную энергию. Количественно  $R_{\Sigma}$  определяется как активное сопротивление,

на котором выделяется мощность, численно равная мощности излучения  $P_{\Sigma}$  при токе в сопротивлении, равном току в антенне  $I_A$ :

$$R_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{I_A^2}.$$

Сопротивление потерь антенны  $R_{\Pi}$  характеризует потери электромагнитной энергии в антенне, обусловленные ее превращением в тепло в элементах антенны и в окружающих предметах.

$$R_{\Pi} = \frac{P_{\Pi}}{I_A^2},$$

где  $P_{\Pi}$  – мощность потерь, Вт.

Сопротивление потерь и сопротивление излучения образуют полное активное сопротивление антенны  $R_A$ .

$$R_A = P_{\Sigma} + R_{\Pi}.$$

Тогда КПД можно записать как:

$$\eta_A = \frac{P_{\Sigma}}{P_A} = \frac{I_A^2 R_{\Sigma}}{I_A^2 R_A} = \frac{R_{\Sigma}}{R_{\Sigma} + R_{\Pi}}.$$

**Вывод:** Чем меньше сопротивление потерь  $R_{\Pi}$ , тем выше КПД антенны.

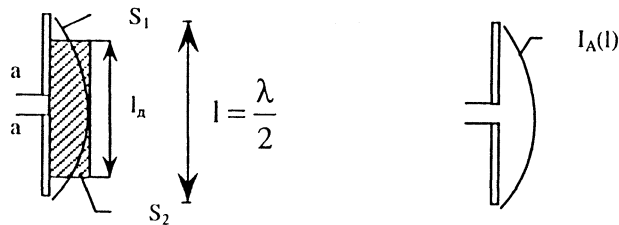
Входное сопротивление антенны – это сопротивление на входных зажимах антенны, которое в общем случае имеет активную  $R_{вх}$  и реактивную  $X_{вх}$  составляющие. Активная составляющая  $R_{вх}$  представляет собой полное активное сопротивление антенны  $R_A$ , а реактивная составляющая обусловлена наличием электрического и магнитного полей в зоне индукции.

Т.е.  $Z_A = R_{вх} + jX_{вх} = R_A + jX_L$ .

Для увеличения эффективности антенны ее настраивают в резонанс с частотой подводимых колебаний.

В этом случае  $X_A = 0$  антенна представляет собой чисто активную нагрузку.

Действующая длина (высота) антенны  $l_d$  равна длине некоторой воображаемой антенны с равномерным распределением тока, амплитуда которого равна амплитуде тока реальной антенны, причем в максимуме ДН эта воображаемая антенна создает такую же напряженность поля, как и реальная антенна.



Если известно распределение тока вдоль линейной антенны, то для определения ее действующей длины необходимо построить прямоугольник так, чтобы его площадь  $S_2$  была равна площади  $S_1$  ограниченной кривой распределения  $I_A(l)$  и проводом самой антенны. Эта площадь называется площадью тока антенны.

Длина полученного прямоугольника  $l_d$  называется действующей длиной антенны.

**Вывод:** Чем равномернее распределение тока по длине реальной антенны, тем ближе ее действующая длина к геометрической.

Диапазонные свойства антенны. Эти свойства антенны оцениваются диапазон рабочих частот (полосой пропускания), в пределах которого основные характеристики антенны изменяются в заданных пределах. Диапазон рабочих частот – это интервал частот, определяемый допустимым изменением одного или нескольких параметров антенны.

В зависимости от ширины полосы пропускания различают узкополосные, широкополосные и широкодиапазонные антенны.

Поляризация антенны определяется по поляризации ее поля излучения. Вектор  $\vec{E}$  характеризующий поляризацию ЭМВ, со временем изменяет свою величину и направление. Эти изменения описываются поляризационными характеристиками.

Поляризационная характеристика – это зависимость ЭДС в приемной антенне линейной поляризации, принимающей ЭМВ от угла поворота этой антенны относительно направления распространения волны.

## 4.2. Параметры приемных антенн.

Из принципа взаимности антенн следует, что независимо от режима работы антенны значения ее параметров остаются неизменными. Однако режим работы антенны определяет физический смысл основных ее показателей.

ДН приемной антенны – это графическое изображение зависимости ЭДС (тока) на клеммах антенны от направления прихода ЭМВ.

Приемная антенна по отношению к радиоприемному устройству является источником ЭДС  $E_A$  индуцируемой ЭМП на зажимах антенны.

Как уже говорилось процесс приема ЭМВ, заключается в преобразовании радиоволн, пришедших в точку расположения приемной антенны, в направляемые ЭМВ. При этом в антенне возбуждаются переменные токи высокой частоты. Но при протекании переменных токов в антенне создаются условия для излучения ЭМЭ.

**Вывод:** В процессе приема не вся принятая энергия будет поступать на вход приемного устройства, часть энергии будет излучаться в окружающее пространство.

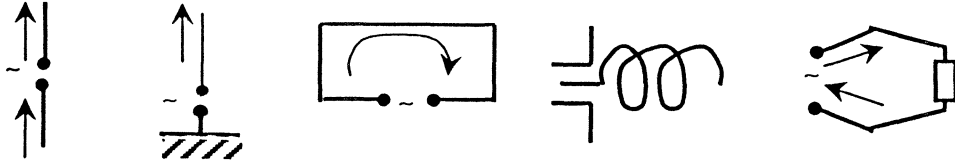
Отношение мощности, отдаваемой антенной в приемное устройство, к мощности, которую она отдала бы в эту же нагрузку, если бы не имела потерь, называется КПД приемной антенны.

Для того, чтобы отдавала максимальную мощность в приемное устройство, необходимо, чтобы она была согласованной с фидером, а он с входным сопротивлением приемника. При этом, в фидере установится режим бегущей волны и вся энергия, поступающая от антенны, будет поступать в приемник. Согласование антенн с фидером осуществляется с помощью шлейфов и четвертьволновых трансформаторов.

## 5 Антенны используемые в радиосвязи

По принципу действия и построения антенны можно разделить на проволочные (или линейные, выполняемые из тонких по сравнению с их длиной волны проводников) и антенны с излучающим раскрытием (дифракционные).

Проволочные (или линейные) могут быть: симметричными и несимметричными, вибраторными, рамочными, спиральными, ромбическими, однопроводными, образовать антенные решетки из перечисленных излучателей.



Антенны с излучающим раскрытием (дифракционные) включают: щелевые, рупорные, линзовые, зеркальные, двухзеркальные.

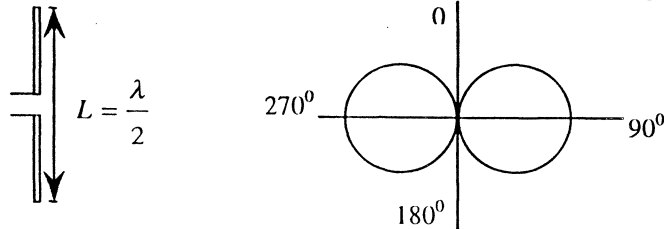
Каждый класс антенн характеризуется общностью применяемого для его исследования и расчета математического аппарата. Так, для проволочных антенн сначала определяют распределение тока вдоль проводника, затем разделяют их на элементарные электрические диполи и находят поле излучения как сумму полей этих диполей. В дифракционных антеннах сначала определяют поле на излучающем раскрытии (апертуре), делят его на элементы Гюйгенса и находят поле излучения как сумму полей этих элементов.

### 5.1. Симметричные вибраторы

Симметричный вибратор – это антенна в виде прямолинейного проводника с равными плечами. Он широко используется как самостоятельная антенна и как элемент многовибраторных антенн.

Для изготовления таких антенн используют хорошо проводящие металлы. В диапазонах КВ и СВ в антеннах обычно применяют многожильные гибкие провода. В диапазоне УКВ вибраторы выполняются из стержней или полых трубок. Для симметричных вибраторов характерна симметрия относительно вертикальной оси и подключение питающего фидера к средней части. ДН симметричных вибраторов зависит от соотношения между геометрической длиной антенны и длиной излучаемой радиоволны.

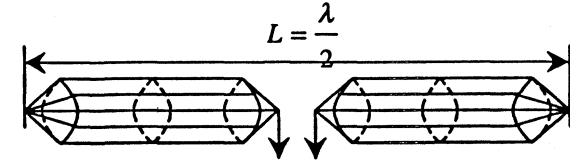
Наибольшее распространение получили полуволновые вибраторы.



ДН вибратора в вертикальной плоскости имеет вид восьмерки. Входное сопро-

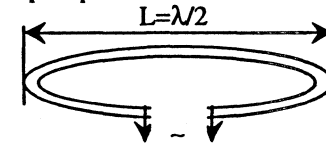
тивление полуволнового вибратора равно 73,1 Ом. Однако реальный полуволновой вибратор не представляет собой резонансное устройство, его входное сопротивление имеет и реактивную составляющую индуктивного характера. Причем чем толще вибратор, тем больше реактивная составляющая. Поэтому для настройки вибратора в резонанс его длину укорачивают на некоторую величину  $\Delta l$ .

В наземных средствах связи наиболее распространен диполь Наденко.



Такой вибратор выполняется из ряда параллельных проводов, расположенных по образующим цилиндра. На концах и в середине провода соединяются в узел. Число проводов обычно шесть-восемь. Диполь Наденко широко применяется в диапазоне коротких волн и является широкополосной антенной. Входное сопротивление антенны сравнительно невелико, что обеспечивает возможность хорошего согласования вибратора с линией передачи.

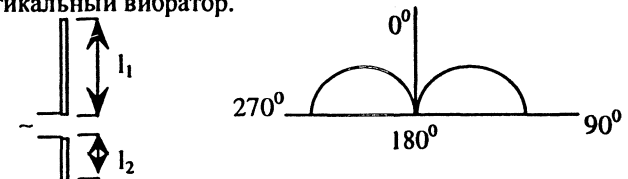
Петлевой вибратор Пистолькорса – он также является полуволновым. Фактически он состоит из двух близко расположенных вибраторов, связанных между собой на концах перемычкой. Вибратор Пистолькорса является широкополосной антенной. ДН совпадает с ДН полуволнового вибратора.



### 5.2. Несимметричные антенны

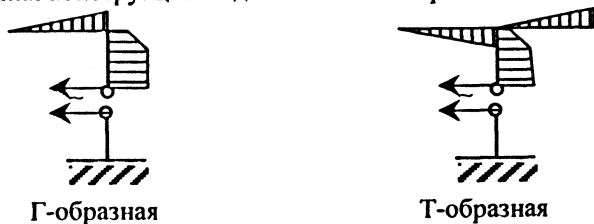
Под ними понимают антенны с несимметричным распределением тока. Несимметрия этих антенн обуславливается, как правило, их расположением у поверхности земли или вблизи экранов, размеры которых обычно можно считать большими по сравнению с размерами антенны. Такие антенны применяют в диапазонах длинных, средних, коротких и ультракоротких волн.

В наземных радиоустройствах в диапазоне средних и коротких волн применяются несимметричный вертикальный вибратор.



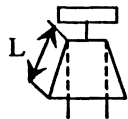
Он представляет собой скрученный из нескольких металлических жил вертикальный проводник или вертикально расположенную мачту. ДН несимметричной ан-

тенны вследствие влияния проводящей поверхности совпадает с половиной симметричной антенны. Действующая высота несимметричного вибратора в диапазоне средних волн мала, в два раза меньше действующей длины симметричного вибратора. Поэтому к верхнему концу вибратора присоединяют сеть горизонтальных или наклонных проводов. Такая конструкция обеспечивает более равномерное распределение тока вдоль вибратора и уменьшение его действующей высоты. С помощью горизонтальной концевой части можно осуществлять настройку несимметричных вибраторов, При этом с точки зрения конструкции выделяют Г- и Т-образные антенны.



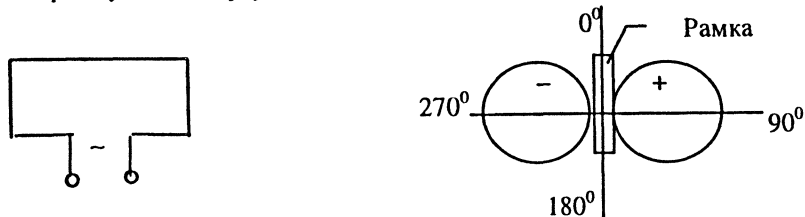
Высота этих антенн обычно много меньше длины волны, поэтому их называют короткими антеннами. ДН всех коротких антенн в горизонтальной плоскости имеет вид правильной окружности, а в вертикальной – половины “восьмерки”.

С целью расширения полосы пропускания несимметричного вибраторов, так же, как и в симметричных антеннах утолщают провода вибраторов. Наиболее распространенной широкополосной несимметричной антенной является дискоконусная антенна. Она представляет собой систему из конического вибратора, расположенного перпендикулярно плоскому диску. ДН этой антенны в плоскости диска круговая, а в плоскости, проходящей через ось конуса, имеет вид двух лепестков, форма которых зависит от рабочей частоты. С увеличением частоты лепестки сужаются и прижимаются к образующим конуса. Поляризация дискоконусной антенны вертикальная. Применяют такие антенны в метровом и дециметровом диапазонах волн для самолетов.



### 5.3. Рамочные антенны.

Они представляют собой один или несколько последовательно включенных витков провода. В простейшем случае рамочная антенна представляет собой плоский виток провода прямоугольной формы.



ДН рамочной антенны имеет вид “восьмерки” в горизонтальной плоскости, перпендикулярной рамке с двумя ярко выраженными минимумами.

ЭДС наведенная в рамке волной пришедшей с левого полупространства отличается по фазе на  $\pi$  от ЭДС наведенной в рамке волной, приходящей с правого полупространства. На ДН это отличие фаз ЭДС отмечено знаками “+” и “-”.

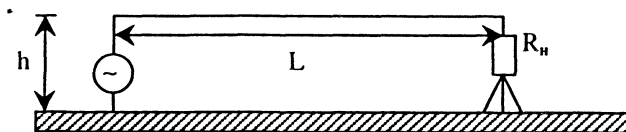
Направленные свойства рамочной антенны позволяют использовать ее для определения направления на радиостанцию. Рамочная антенна, обычно используется в качестве приемной в диапазоне средних и длинных волн.

При введении внутрь рамки магнитного сердечника значительно возрастает его действующая длина, т.е. увеличивается величина наведенной ЭДС. В качестве материала сердечника обычно применяют ферриты. Выбор марки феррита определяется диапазоном волн, на которых должна работать антенна.

### 5.4. Направление антенны земных волн.

#### 5.4.1. Однопроводная антенна бегущей волны.

Антенна представляет собой горизонтальный провод длиной в несколько волн, подвешенный на высоте 1,5–4 м над землей.

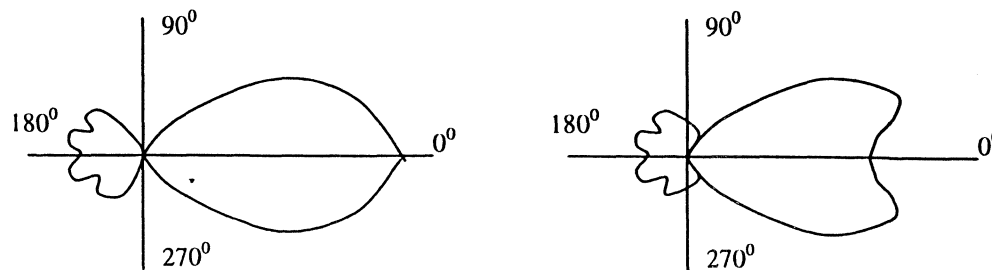


Используется антенна, главным образом, в качестве приемной антенны и рассчитана на прием вертикально поляризованной земной волны.

Один конец антенны присоединен к приемнику, а второй – к активному сопротивлению  $R_n$ , равному волновому сопротивлению провода ( $120\pi \approx 400-500$  Ом). Второй конец активного сопротивления либо заземлен, либо присоединяется на земле веером в направлении корреспондента. Антенна согласована и работает в режиме бегущей волны.

Благодаря обеспечению режима бегущей волны антенна имеет однонаправленную ДН и почти постоянное и активное входное сопротивление в широком диапазоне частот, это упрощает согласование с приемником (передатчиком).

ДН антенны показана на рисунке с увеличением относительно  $L/\lambda$ , ДН сужается и одновременно растет КНД. Длина антенны, при которой достигается ее наибольшая направленность, считается оптимальной.



При  $h < \lambda/4$   $I_{cp} = (5-7)\lambda$ . Если длину антенны сделать больше оптимальной, то ДН будет иметь провал в направлении от антенны.

Эффективность антенны тем выше, чем суше почва и короче длина волны. Это происходит благодаря увеличению горизонтальной составляющей поля земной волны с увеличением проводимости почвы и длины волны.

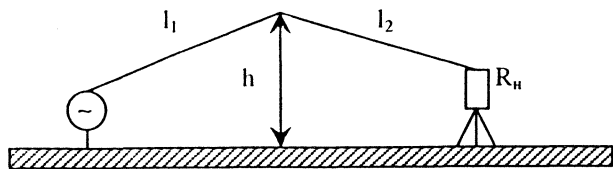
Приемные антенны находят особенно широкое применение на КВ, т.к. они обладают высоким КНД ( $D=10-60$ ) и низким уровнем боковых лепестков, что позволяет существенно повысить помехозащищенность приема в условиях сильных помех.

#### 5.4.2. Вертикальная полуромбическая или $\lambda$ -образная антенна.

Данный вид антенны получается путем подъема средней или ближайшей к радиостанции части провода антенны на высокую опору.

Повышение эффективности этих антенн обусловлено следующими причинами:

- благодаря удалению провода от земли уменьшаются потери в антенне;
- из-за наклона проводов антенны к земле она будет принимать не только горизонтальную, но и более интенсивную вертикальную составляющую поля земной волны.



Длины сторон  $l_1$  и  $l_2$  и высоту  $h$  выбирают так, чтобы ЭДК наводимые в элементах проводов горизонтальной и вертикальной составляющими поля, складывались в приемнике в фазе. Эффективность таких антенн по сравнению с однопроводной антенной возрастает в 2–5 раз на КВ. Для работы в КВ диапазоне рекомендуется выбирать общую длину провода 200–300 м и высоту опоры 15–25 м, а в УКВ (20–60 МГц) диапазоне 60–70 м и 8–12 м соответственно.

ДН в горизонтальной плоскости антенны имеет расширенный главный лепесток с наибольшим провалом посередине, что снижает ее помехозащищенность. Этот недостаток отсутствует у  $\lambda$ -образной антенны ( $l_1=l_2$ ).

### 5.5. Антенны для радиосвязи поверхностными волнами.

Требования к антенне для КВ радиосвязи в основном определяются дальностью связи и диапазоном рабочих частот. Чем больше протяженность радиолинии, тем под меньшим углом к горизонту должен быть направлен максимум ДН антенны. Для ближней (до 500 км) КВ радиостанции антенны должны иметь максимум ДН под углом  $60^\circ-90^\circ$  к горизонту. Такие антенны называются антеннами зенитного излучения (АЗИ). На трассах средней протяженности (500–1500 км) необходимы антенны излучающие под углами  $25^\circ-60^\circ$ . Для дальнейшей (магистральной) радиосвязи (свыше 1500 км) необходимы остронаправленные антенны с углом прижатия главного лепестка ДН  $5-20^\circ$ .

Чем больше дальность связи, тем более высоким КУ должна обладать антенна, чтобы скомпенсировать растущее с увеличением протяженности трассы ослабление радиоволн. При этом для приемных антенн важным является увеличение КНД. Однако чрезмерное сужение ДН недопустимо.

В целях повышения помехо- и разведзащищенности и обеспечения ЭМ совместности одновременно работающих радиостанций приемные и передающие антенны должны иметь ДН с возможно малым уровнем боковых лепестков. При этом уменьшается и вредное влияние замираний.

Антенны для радиосвязи ионосферными волнами должны быть диапазонными и сохранять в диапазоне частот необходимую направленность и качество согласования с фидерами.

#### 5.5.1. Слабонаправленные антенны.

Основными типами антенн для КВ радиосвязи пространственными волнами на расстоянии до 1000 км являются:

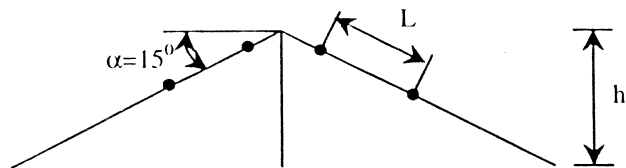
- горизонтальный симметричный вибратор (ВГ);
- наклонный симметричный вибратор (ВН).

Горизонтальный симметричный вибратор подвешивается параллельно поверхности земли. Если  $l$  – длина плеча вибратора,  $h$  – высота подвеса, то длину плеча вибратора выбирают из условия  $0,15-0,2 \leq l/\lambda \leq 0,65$ . Верхняя граница неравенства определяется тем, что при увеличении  $l/\lambda$  выше 0,65 ухудшаются направленные свойства вибратора за счет протекания по его плечам противофазных токов. Минимальная величина отношения  $l/\lambda$  определяется допустимыми пределами изменения входного сопротивления. При уменьшении отношения  $l/\lambda$  падает активная и увеличивается реактивная составляющая входного сопротивления вибратора, вследствие чего при слишком малом  $l/\lambda$  антенный контур передатчика может оказаться не в состоянии согласовать его с фидером.

При малой высоте подвеса  $h/\lambda \leq 0,25$  максимум излучения направлен в зенит. С увеличением высоты подвеса  $0,25 < h/\lambda < 0,5$  поле в зенитном направлении уменьшается, а максимум ДН оказывается под все меньшим углом к горизонту. При  $h/\lambda = 0,5$  поле в зенитном направлении отсутствует. Дальнейшее увеличение высоты подвеса приводит к появлению боковых лепестков и поэтому нежелательно.

ВГ целесообразно использовать для радиосвязи пространственными волнами на расстоянии до 1000 км.

В целях сокращения количества мачт и уменьшения времени развертывания на подвижных радиостанциях применяют симметричные вибраторы с наклонными плечами (ВН).



Направленные свойства ВН и ВГ идентичны. Однако за счет более близкого расположения проводов к земле в антенне выше потери в земле и КУ уменьшается в низкочастотной части КВ диапазона примерно в 1,5 раза по сравнению с КУ горизонтального вибратора. Благодаря возможности развертывания ВН на одной мачте он находит применение на подвижных радиостанциях средней и малой мощности. Угол наклона плеч  $\alpha$  ВН выбирается равным  $15^\circ$ . Дальнейшее увеличение наклона вредно, т.к. приводит к быстрому снижению КУ антенны.

Т.к. ВГ и ВН выполняются из тонкого провода, то они имеют большое волновое сопротивление (1000 Ом) и значительное изменение с частотой (от десятков до тысяч Ом) входного сопротивления. Поэтому выходные контура радиостанций должны иметь гибкие схемы, позволяющие согласовывать выходные цепи передатчика с антенной. Для обеспечения круглосуточной связи на различные дальности применяется несколько вибраторов, отличающихся длиной плеча и высотой подвеса (ВН-40/12, ВН-11/9).

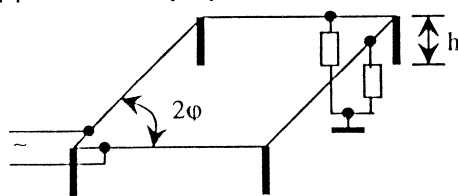
### 5.5.2. Направленные антенны.

Высокая направленность излучения может быть достигнута использованием антенн, построенных из длинных проводов с бегущей волной тока, либо антенных систем с большим числом излучателей.

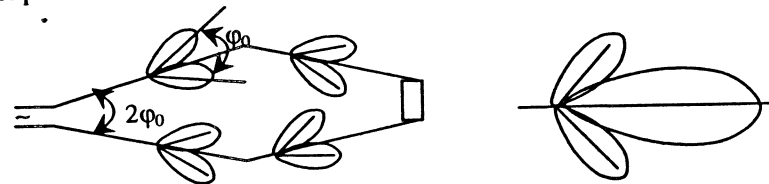
Ромбическая антенна (РГ) представляет собой длинную, по сравнению с длиной волны, двухпроводную линию, выполненную в виде ромба и подвешенную параллельно земле на четырех опорах.

Фидер подходит к одному из острых углов ромба, а к другому подсоединяется нагрузочное сопротивление равное волновому сопротивлению ромба. Вследствие этого в проводах антенны устанавливается режим бегущей волны и формируется узкая остронаправленная ДН.

Входное сопротивление ромбической антенны является чисто активным и слабо зависит от частоты. Поэтому антенна имеет хорошее согласование с фидером в диапазоне частот с коэффициентом перекрытия 2,5–3.



Формирование ДН легко понять, обратившись к ДН длинного провода с бегущей волной тока. Она имеет два максимума, наклоненные в сторону нагрузки под углом  $\theta_m$  параллельно оси. Если провода ромба ориентированы так, чтобы его сторона образовывала с большой диагональю угол  $\phi_0 = \theta$ , то излучаемые ими поля складываются вдоль этой диагонали. Поэтому главный лепесток ДН ориентирован в направлении поглощающего сопротивления.



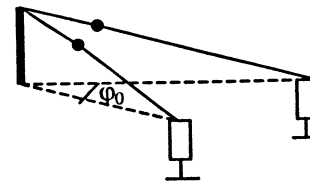
В остальных направлениях поля проводов ромба частично или полностью компенсируются, в результате чего образуется ряд боковых лепестков и провалы (нули) ДН (боковые лепестки составляют величину 0,4–0,5 от главного лепестка).

В подвижных КВ радиостанциях ромбические антенны не нашли применение из-за большого времени развертывания и свертывания.

### 5.5.3. V-образные антенны.

Стремление уменьшить число мачт, время развертывания, массу антенны и габариты ее в свернутом состоянии привело к разработке и широкому внедрению на подвижных станциях V-образных антенн, развертываемых на одной мачте и применяемых как на передачу, так и на прием.

Наклонная V-образная антенна (ВН) состоит из двух проводов, расходящихся под острым углом  $\phi_0$  друг к другу и плавно снижающихся от вершины мачты к поверхности земли. Для обеспечения однонаправленности излучения (приема) и высокого согласования с фидером в широком диапазоне частот каждый провод нагружается на согласованное сопротивление. Максимум излучения антенны направлен по биссектрисе угла, образованного лучами антенны.



Оптимальный угол между лучами, при котором обеспечивается наибольший коэффициент усиления антенны, меняется с изменением длины волны. Для диапазона 10–30 МГц можно рекомендовать антенну 46/12 с КУ=2–8 и раствором  $30\text{--}50^\circ$ .



## 6. Особенности построения и применения антенн полевых радиостанций.

### 6.2. Требования к антеннам.

Ввиду динамичности оперативно-тактической обстановки радиостанции должны обеспечивать радиосвязь с большим числом корреспондентов, которые могут и перемещаться.

Для решения этой задачи применяется большое число радиостанций, отличающихся предназначением, мощностью, диапазоном рабочих частот, комплектом антенн. Общий диапазон частот существующего парка полевых радиостанций КВ и примыкающего к нему участка МВ диапазонов составляет 1,5-80 МГц и более. При этом с расширением рабочего диапазона радиостанций растет и число антенн, входящих в комплект радиостанций.

Сложные и многообразные условия работы полевых радиостанций отражаются на требованиях к их антенным комплексам. Помимо обеспечения высоких электрических характеристик, необходимых для создания требуемого электрического потенциала радиолиний, обеспечения помехо- и радиозащищенности, должны приниматься во внимание габариты, прочность и надежность конструкции антенны, время ее развертывания и свертывания, ремонтпригодность, эксплуатационные удобства, транспортабельность, живучесть. Оптимальный вариант комплекса антенн устанавливается для каждой радиостанции путем компромиссного удовлетворения многим требованиям, порой противоречивым.

Для современных полевых радиостанций первостепенное значение имеют вопросы мобильности.

Повышение мобильности антенн достигается путем сокращения числа мачт, во многом определяющих массу, габариты и время развертывания, а также упрощения антенного такелажа, применения механизации при развертывании, конструктивного совершенствования отдельных узлов антенно-фидерных устройств. В частности широкое применение находят одномачтовые антенны с наклонными к земле излучающими полотнами, в большинстве случаев однопроводного исполнения, развертываемые на составных или телескопических мачтах высотой от 7 до 22 м. Последние часто устанавливаются непосредственно на транспортном средстве для сокращения времени развертывания. С этой же целью обычно на одной мачте развертывается несколько антенн на разные дальности, диапазоны частот или ориентации. Некоторые радиостанции комплектуются комбинированными антенными полотнами, допускающими изменение их длины посредством перемычек или преобразование одного типа антенны в другой. Такое полотно в зависимости от условий обеспечения связи развертывается, например, в виде наклонной V-образной или вертикальной полуромбической антенны, наклонного симметричного вибратора или T-образной антенны.

В настоящее время ко всем полевым радиостанциям предъявляются требования обеспечить работу на стоянке, коротких остановках и в движении. Требуемая эффективность антенн полевых радиостанций при работе на стоянке и коротких остановках достигается за счет использования достаточно высоких мачт. Это позволяет увеличить действующую длину антенны, дальность прямой видимости, улучшить направленные свойства, уменьшить потери в земле.

### 6.2. Особенности применения антенн.

Обеспечение различных дальностей КВ и УКВ радиосвязи от единиц до тысяч километров возможно при работе как земными, так и тропосферными и ионосферными волнами. Используемый вид распространения зависит от конкретных условий применения радиостанций от требуемой дальности и качества связи, от физико-географических условий региона и помеховой обстановки в нем.

При этом необходимы различные антенны, отличающиеся поляризацией излучения, рабочим диапазоном, направленностью, эффективностью, уровнем согласования с фидером. Для каждого типа радиостанций характерно применение определенных конструкций антенн с соответствующими электрическими и эксплуатационными характеристиками.

Радиостанции малой мощности (переносные) предназначаются для связи земными волнами в диапазоне 20-80 МГц на расстояния от единиц до десятков километров. В качестве антенн используют штыри, противовесом которых служит корпус радиостанции. Для обеспечения максимальной эффективности их высота равна или близка к четверти длины волны. Прочность, надежность, удобство в эксплуатации штырей обеспечивается разными конструктивными решениями. Так, штырь АШ-0,65 выполняется из профилированной стальной ленты. АШ-0,8 и АШ-1,5 изготавливают в виде коротких алюминиевых секций, стягиваемых стальным тросом с помощью рычажного устройства (штырь Куликова). Штыри большой высоты, как правило, содержат штырь Куликова и несколько дополнительных секций различной длины. В качестве направленных УКВ антенн в ряде радиостанций используют однопроводные антенны бегущей волны (ОБ), которые выполняют из изолированного провода длиной 40 м, развернутого на метровых опорах. К концу провода, обращенного в сторону корреспондента, подключается соединенное с противовесом нагрузочное сопротивление  $R_n=400$  Ом.

КВ радиостанции малой мощности комплектуют четырехметровым штырем для связи земными волнами и наклонным симметричным вибратором (ВН), позволяющим работать ионосферными волнами. При несимметричном питании ВН преобразуется путем соединения нижних концов проводов фидера в T-образную антенну (ТН), которая является более эффективной для связи земной волной, чем штыревая антенна. Штырь АШ-4 выполняется из четырех алюминиевых или стальных трубок, а вибратор – из изолированного провода типа МГШВ. Для обеспечения работы в широком диапазоне частот каждое плечо вибратора выполняется из двух или трех отрезков провода, которые можно соединить перемычками, что позволит менять длину плеча. Например, вибратор ВН 25/10,5 при работе в диапазоне 1,5-4,5 МГц имеет длину плеча 25 м, в диапазоне 4,5-11,6 МГц – 15 м и в диапазоне 11,6-20 МГц – 8 м. Плечи вибратора наклонены под углом 15 град относительно поверхности земли и крепятся с помощью капроновых оттяжек.

В некоторых радиостанциях для обеспечения связи земными и ионосферными волнами используется комбинированная антенна наклонный луч. Она состоит из наклоненного к земле провода и однолучевого противовеса тех же размеров. Для связи в диапазоне частот 1,5-5,5 МГц длины полотна и противовеса равны 17 м, а для более высоких частот имеется возможность укоротить их до 10 м отключив при помощи одноштыревого разъема периферийные отрезки длиной по 7 м. Верхний конец антенны подвешивается на высоте 6-8 м на местных предметах или на телескопической мачте.



Противовес подвешивается на двух стойках на высоте 1 м над землей в направлении на корреспондента.

КВ радиостанции средней мощности оснащаются передающими и приемными антеннами для связи как земными, так и ионосферными волнами в диапазоне от 1,5 до 30 МГц, а в некоторых станциях и до 60 МГц.

Дальность действия при работе земной волной пропорциональна корню четвертой степени из излучаемой мощности. Поэтому переход от радиостанций малой мощности (10-50 Вт) к более мощным (0,1-1 кВт) станциям приводит к сравнительно небольшому (в 2 раза) увеличению дальности.

Однако повышение мощности заметно улучшает надежность связи. Для связи земной волной используются штыревые (АШ-4, АШ-10) и Т-образные (ТН 40/112, ТН 13/9) антенны АШ-4 радиостанций средней мощности используются обычно для приема или излучения пониженной мощности, так как при номинальной мощности нарушается электрическая прочность. Штыри АШ-10 допускают излучение полной мощности. Их выполняют в виде полутелескопических конструкций, устанавливаемых на крыше транспортного средства. При неизменной величине излучаемой мощности предпочтителен для работы низкочастотный участок (1,5-7,5 МГц) КВ диапазона, в пределах которого, например, при использовании однокиловаттных передатчиков на среднепроводящих трассах достижима дальность до 100 км днем и до 60 ночью. Поскольку с ростом частоты КПД антенн увеличивается и одновременно возрастает поглощение земных волн на трассе, указанные дальности могут сохраняться и на более высоких частотах.

На частотах выше 20 МГц при работе земной волной на дальности до 60-70 км применяются широкодиапазонные вибраторы ОБ и ШДА с уменьшенным волновым сопротивлением. В этом случае поле в пункте приема является результатом интерференции прямой и отраженной земной поверхностью волн и их дифракции. Для направленного излучения и приема на дальности 120-150 км используются  $\lambda$ -образные и полуромбические антенны ВПР длиной 60-80 м. Дальнейшее увеличение дальности связи до 200-250 км достигается за счет тропосферного распространения радиоволн при использовании восьмивибраторной ЛПА. Все перечисленные УКВ антенны разворачиваются на мачтах высотой 12,5 м.

Для достижения больших (сотни и тысячи км) дальностей действия КВ радиостанций средней мощности используются антенны ионосферных волн, которые делятся на слабонаправленные и направленные. Слабонаправленные антенны предназначены для ближней (до 300-500 км) связи и поэтому должны обеспечивать максимальное излучение (прием) в зенит или под большими углами возвышения. Направленные антенны радиостанций средней мощности обеспечивают связь на средние (до 2000 км) дальности, причем с увеличением дальности трассы максимум вертикальной диаграммы направленности (ДН) антенн должен сильнее прижиматься к земле. В качестве слабонаправленных антенн используют вибраторы различных типоразмеров, поднимаемые на мачты разной высоты (ВН 40/12, ВН 11/9, ВН 13/9, ВН 8/12, ВН 15/12), так как их характеристики зависят от длины плеча ( $l/h$ ) и высоты над землей ( $h/\lambda$ ). Для диапазона 1,5-16 МГц необходим комплект из двух вибраторов различных типоразмеров.

В качестве направленной широко применяется для работы как на прием, так и на передачу симметричная согласованная V-образная антенна с лучами длиной по

46 м с мачтой высотой 12 м и питаемая двухпроводным фидером. Биссектриса угла между лучами антенны ориентируется на корреспондента.

КВ радиостанции большой мощности (более 1 кВт) имеют отдельные передающие и приемные антенные поля разнесенные друг от друга на десятки километров. Они комплектуются в основном антеннами ионосферных волн, предназначенными для работы на трассах средней и большой протяженности в целях обеспечения большой электрической прочности при работе с большими мощностями и повышения согласования с фидером передающие антенны отличаются использованием диапазонных конструкций. Для связи на расстояния до 1000 км широко применяются симметричные диапазонные вибраторы, плечи которых выполняются в виде плоских проволочных полотен. Плечи наклонных диапазонных вибраторов (ВНД) состоят из четырех проводов, расходящихся к нижним концам. Плечи горизонтального диапазонного шунтового вибратора (ВГДШ) состоят из пяти параллельных проводов, разнесенных друг от друга в вертикальной плоскости на расстояние 1 м.

Верхние провода плеч замкнуты между собой и образуют шунт. Питание отводится к нижним проводам. Антенна разворачивается на двух мачтах. В качестве антенны зенитного излучения используется также широкодиапазонная антенна двойной вертикальный ромб, содержащая два последовательно включенных ортогональных ромба. Питание подводится к одному из ромбов, а второй нагружен на сопротивление, выполненное в виде двух отрезков коаксиального кабеля (длиной 100 м каждый, расположенных на земле и допускающих рассеивание больших мощностей, безопасных для обслуживающего персонала.

Для связи на расстояния свыше 600 км нашли применение направленные антенны ВН-150/22 с нагрузочными сопротивлениями в виде отрезков коаксиального кабеля. В некоторых радиостанциях используются экспоненциальные ромбические и V-образные антенны без нагрузочных сопротивлений.

Приемные антенные поля мощных радиостанций включают слабонаправленные (ВН, АШ, НЛ) и направленные (ОБ и ВПР) антенны для однократного и двоякого приема с разносом в пространстве и по поляризации. Применение направленных антенн становится особенно эффективным при обеспечении связи в низкочастотной области КВ ночью, когда возрастает уровень помех и величина КНД имеет большее значение. С целью улучшения качества приема в условиях изотропно приходящих помех приемную антенну следует ориентировать максимумом ДН на корреспондента, а при приходе помехи с определенного направления антенну целесообразно направить нулем (минимумом) ДН на нее.

При выборе площадок для развертывания антенн необходимо иметь в виду, что размещение над влажной землей вертикальных несимметричных антенн (АШ, ТН, НЛ) приводит к росту КПД на 3-4 дБ, а КПД антенны ОБ уменьшается на 6-10 дБ (относительно случая сухой земли).

В случае высокой проводимости грунта табельную УКВ антенну ОБ выгоднее развернуть как  $\lambda$ -образную, используя мачту или местные предметы.

В холмистой местности при работе земными волнами антенны рекомендуются размещать на вершинах или на склонах, обращенных к корреспонденту. Не следует располагать антенны у обратного (относительно корреспондента) подножия холма – необходимо их относить на расстояние, соизмеримое с длиной склона. При размещении в

лесу или в городе имеет место резкое изменение напряженности поля сигнала от точки к точке в результате интерференции прямого луча и лучей, отраженных от деревьев или зданий. В подобных случаях антенны целесообразно размещать по возможности на открытых участках или варьировать место расположения антенны на каждой рабочей частоте.

При работе полевых КВ и УКВ радиостанций на стоянке должен разворачиваться полный комплект антенн, что позволяет проводить маневры антеннами для обеспечения лучшего качества связи.

Здесь следует добиваться строгого соответствия типоразмеров антенн рабочим диапазоном частот.

В противном случае будет снижена излучаемая на корреспондента мощность.

Чтобы более полно реализовать достоинства направленных антенн, необходимо стремиться к максимальному согласованию их направленных свойств с параметрами траектории ионосферной волны (углы входа и выхода волн в ионосфере, число мод). Вместе с тем следует заметить, что из-за изменения с частотой угла возвышения максимума и ширины луча ДН, с одной стороны, и изменения во времени условий распространения ионосферной волны, с другой стороны, достигнуть оптимального согласования направленности антенн с трактом распространения можно лишь при маневре антеннами. Необходимо иметь в виду, что неоптимальное использование направленных антенн может приводить не к ослаблению, а к усилению многолучевости и замираний и снижению энергетического потенциала радиолинии. Поэтому переход от остронаправленной, но дающей неудовлетворительную надежность связи, к менее направленной антенне можно считать в ряде случаев целесообразным.

Важный резерв повышения надежности КВ связи заключен также в более широком применении приема на разнесенные антенны. С этой целью все мощные радиостанции и отдельные приемные машины комплектуются 2-3 направленными идентичными антеннами.

Перспективными, с точки зрения оптимального использования направленных свойств, являются активные модульные фазированные антенные решетки АФАР. За счет управления фазами возбуждения группы излучающих элементов и обеспечения тем самым сложения полей в эфире может быть сформирована ДН с максимумом в заданном направлении. Групповое использование автоматизированных модулей обеспечивает возможность динамического управления не только направленностью, но и энергopotенциалом. Такая возможность реализуется выделением для каждой радиолинии части модулей, подключенных к соответствующим передатчикам и настроенным на заданные частоты.

При групповом принципе использования модулей облегчается их резервирование, повышается надежность и живучесть радиоцентра, создаются условия для полной унификации комплексов радиосвязи, так как на основе одного типа модуля можно перекрыть всю необходимую область энергopotенциалов и частот, для чего в настоящее время требуются различные радиосредства с десятками типов антенно-фидерных устройств.

Поскольку требуемый уровень согласования без дополнительных мер достигается при размерах излучателей не менее  $0,12-0,15 \lambda_{\text{МАХ}}$ , мобильные АФАР, перекрывающие весь КВ диапазон, могут быть реализованы только с резонансными настраиваемыми

ми элементами, например, в виде вертикальных вибраторов или рамок. Исследования показывают, что энергетический выигрыш АФАР по отношению к одному модулю, равный примерно квадрату числа модулей, создается как для линейной так и для плоской прямоугольной ФАР с расстоянием между излучателями около  $7,5 \text{ м}$ .

## Литература.

### Основна.

1. Грудинская Г.В. Распространение радиоволн: Учебное пособие – М.: Высшая школа. 1967, – 244 с.
2. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. – М.: Связь, 1965.
3. Марков М.П., Сазонов Д.М. Антенны: Учебник.– М.: Энергия, 1975 – 528с.
4. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: Учебник – М.: Высш. Шк., 1989 – 432с.
5. Жуков В.А., Серков В.П., Филиппов В.В. Радиочастотная служба и антенные устройства./ Под редакцией В.П. Серкова. – Л.: ВАС, 1989 – с 1–264с.

### Популярная

6. Поляков В.Т. Посвящения в радиоэлектронику. – М.: Радио и связь, 1988 – 351с.

## СОДЕРЖАНИЕ

	<u>СТР.</u>
Введение .....	1
1. Основные понятия о распространении радиоволн .....	2
1.1. Электромагнитное поле .....	2
1.2. Радиоволны .....	4
2. Строение и электрические свойства земной поверхности и атмосферы .....	7
2.1. Земная поверхность .....	7
2.2. Тропосфера .....	8
2.3. Ионосфера .....	9
3. Общие сведения и классификация антенн .....	15
3.1. Излучение и прием электромагнитной энергии .....	16
4. Основные показатели антенн .....	18
4.1. Параметры передающих антенн .....	18
4.2. Параметры приемных антенн .....	21
5. Антенны используемые в радиосвязи .....	22
5.1. Симметричные вибраторы .....	22
5.2. Несимметричные антенны .....	23
5.3. Рамочные антенны .....	24
5.4. Направление антенны земных волн .....	25
5.4.1. Однопроводная антенна бегущей волны .....	25
5.4.2. Вертикальная полуромбическая или $\lambda$ -образная антенна ...	26
5.5. Антенны для радиосвязи поверхностными волнами .....	27
5.5.1. Слабонаправленные антенны .....	27
5.5.2. Направленные антенны .....	28
5.5.3. V-образные антенны .....	29
6. Особенности построения и применения полевых радиостанций .....	30
6.1. Требования к антеннам .....	30
6.2. Особенности применения антенн .....	31
Литература .....	35