**Лекция № 5.**

**Атмосфера Земли и её влияние на распространение радиоволн**

Атмосфера Земли состоит из газов. Основными составляющими являются молекулярные газы – азот *N2* (78 %) и кислород *О2* (21 %). Остальные газы, включая водород, составляют менее одного процента. Вблизи поверхности Земли возможны индустриальные газы и водяной пар, который местами концентрируется в облака.

Плотность газов, окружающих Землю, неравномерна. Основной характеристикой плотности является её отрицательный градиент – плотность уменьшается с увеличением высоты от земной поверхности. На высоте 10 тыс. км плотность газа ничтожна.

Под действием солнечного излучения верхняя часть атмосферы Земли ионизируется. *Ионизация* – это процесс выбивания электрона из внешней оболочки молекулы газа под действием энергии Солнца. Молекулы становятся положительно заряженными ионами. В ночное время проходит обратный процесс – *рекомбинация*, в результате которогочасть электронов при столкновении с ионами возвращается на прежние орбиты. Солнечное излучение способно ионизировать газы до высоты 60 км от поверхности Земли. Поэтому верхний, ионизированный, слой атмосферы от 60 до 10000 км называется *ионосферой.* Нижний слой под ионосферой – *тропосфера* Земли. В тропосфере молекулы газа нейтральны. Энергия Солнца при прохождении через ионосферу уменьшается настолько, что процесс ионизации прекращается.

В процессе ионизации участвует не только ультрафиолетовое и ещё более коротковолновое излучение Солнца (*λ <* 0,134 мкм), но и поток заряженных частиц – *корпускул.* Излучение светового спектра не участвует в ионизации и проходит через ионосферу к Земле. Таким образом, ионосфера защищает Землю от опасного для жизни ионизирующего излучения.

Корпускулярное излучение (электроны, протоны) захватывается постоянным магнитным полем Земли и в соответствии с силой Лоренца устремляется винтообразно к северному магнитному полюсу. Сталкиваясь с нейтральными частицами, оно вызывает свечение – *полярное сияние.*

Плотность электрически заряженных частиц *Nэ* в ионосфере распределена неравномерно. В верхних участках ионосферы все молекулы ионизированы, но их мало, и их количество увеличивается с уменьшением расстояния до земной поверхности. На высоте около 300 км наступает максимум. Плотность газа увеличивается, но не все молекулы ионизируются. Степень ионизации уменьшается с уменьшением высоты. На рисунке 1 сплошной линией показан график в дневное время. В ночное время (прерывистая линия) происходит частичная рекомбинация и плотность уменьшается.

График плотности в дневное время имеет ярко выраженные слои – D, E, F1 и F2.

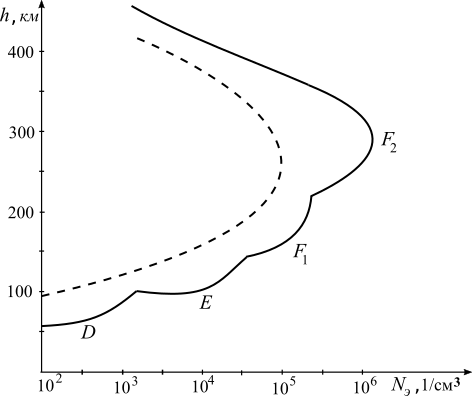


Рис. 1. Структура ионосферы

В ночное время слой D исчезает, слой F1 сливается со слоем F2, образуя единую область F. Дневные и ночные слои являются регулярными, но их плотности зависят от времени года и географической широты. Регулярность слоев нарушается во время солнечной активности.

Электрические заряды и нейтральные молекулы находятся в постоянном движении. Сталкиваясь между собой, они теряют энергию, превращая её в тепло. Этим обстоятельством объясняется необычная температурная зависимость воздуха от высоты. В тропосфере температура определяется нагревом земной поверхности и уменьшается с высотой до 15-20 км. Затем она стабилизируется на уровне 220 К до высоты 80 км и увеличивается в слое Е до 270 К, в слое F1 до 800 – 1500 К, в слое F2 до 1000 – 2000 К и плавно уменьшается с высотой до абсолютного нуля. Возрастание температуры с высотой в области ионосферы объясняется тем, что воздух здесь нагревается непосредственно излучением солнца.

Основными параметрами, определяющими распространение радиоволн в ионосфере, являются относительная диэлектрическая проницаемость *ε* и удельная проводимость *ϭ* ионизированного газа. Эти параметры определяются уравнениями:

, (1)

где *mэ* – масса электрона (9,1 10-31 кг);

*е –* заряд электрона (1,6 10-19 Кл);

*ν –* частота соударений электрона с тяжелыми частицами (<1 МГц);

*Nэ* – электронная плотность, см-3.

Для частот радиоволн *ω*, для которых выполняется неравенство *ω2 >> ν2*, можно пренебречь величиной *ν2* по сравнению с *ω2*. Тогда выражения для *ε* и *ϭ* с учетом подстановки в них численных значений *е, mэ, ε0* можно записать:

. (2)

. (3)

. (4)

Используя частоту радиоволны *f (кГц),* формулу для *ε* можно записать в следующем виде:

. (5)

При значительной электронной плотности диэлектрическая проницаемость газа может оказаться равной нулю. Тогда

. (6)

Частота *f0*, определяемая уравнением (6), называется *собственной частотой ионизированного газа* или *частотой Ленгмюра.* Этот параметр является удобным при исследовании распространения радиоволн в ионосфере.

Уравнение (5) с учетом (6) можно записать в виде:

. (7)

При *f < f0* относительная диэлектрическая проницаемость оказывается меньше нуля. Это значит, что коэффициент преломления *n = ε0,5* является мнимой величиной. В такой среде электромагнитные колебания не распространяются и быстро затухают.

Коэффициент затухания радиоволн в ионосфере определяется формулой:

. (8)

Поглощение радиоволн вызвано столкновениями электронов с молекулами и ионами и переходом электромагнитной энергии в тепловую энергию движения тяжелых частиц.

**5.1. Распространение радиоволн в неоднородной среде**

При распространении радиоволны в неоднородной среде её траектория искривляется. При достаточно большой электронной плотности искривление траектории волны может оказаться настолько сильным, что произойдет отражение радиоволны в ионосфере. При этом распространение волны до точки отражения будет сопровождаться ослаблением мощности волны. Отражение может произойти только в той области ионосферы, где диэлектрическая проницаемость убывает с высотой, а следовательно, электронная плотность возрастает с высотой, то есть ниже максимума электронной плотности ионосферы.

Условие отражения связывает угол падения волны на нижнюю границу ионосферы *θ0* с диэлектрической проницаемостью в толще ионосферы *εn* на той высоте, где происходит отражение:

. (9)

Из уравнения (9) можно определить рабочую частоту , при которой волны отразятся от ионосферы при заданных значениях электронной плотности и угла падения:

. (10)

Если волна нормально падает на ионосферу (*θ0* = 0), то

. (11)

Следовательно, при нормальном падении отражение происходит на той высоте, где рабочая частота равна собственной частоте ионизированного газа. Этот факт положен в основу исследования ионосферы. При наклонном падении на этой высоте могут отразиться волны с более высокой частотой.

. (12)

Чем больше электронная плотность, тем для более высоких частот выполняется условие отражения. Максимальная частота, при которой волна отражается при вертикальном падении на ионосферу, называется *критической ионосферной частотой*. При этой частоте отражение происходит вблизи максимума ионизации:

. (13)

Сферичность Земли ограничивает максимальный угол падения на ионосферу *θмакс*, а следовательно, и максимальные частоты радиоволн, которые могут отразиться от ионосферы при данной электронной плотности:

. (14)

Формула (14) и приведена без учета рефракции радиоволн в тропосфере.

В тропосфере, в отличие от ионосферы, газовая среда состоит из нейтральных молекул азота и кислорода с малыми добавками водорода и других, в том числе, промышленных газов. Механизм распространения радиоволн здесь иной, нежели в ионосфере, но общим является неоднородность среды, хотя физические основы неоднородности различны.

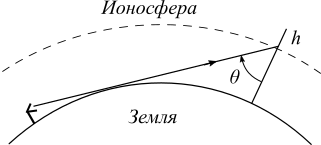


Рис. 2. Максимальный угол падения на ионосферу

Неоднородность тропосферы определяется температурой воздуха и давлением атмосферных газов и водяных паров. Эти параметры зависят от высоты над поверхностью Земли (за поверхность принят уровень мирового океана), и поэтому показатель преломления воздуха в тропосфере *n(h)* есть функция высоты *h*. Поскольку *n* мало отличается от единицы, то удобнее пользоваться параметром *N*, который называют *радио рефракционным индексом,* или *приведенным показателем преломления тропосферы.* В соответствии с уравнением Дебая:

. (15)

Плотность воздуха максимальна у поверхности Земли и уменьшается с увеличением высоты. Для оценки *N(h)* в интервале высот 0 – 3 км используют соотношение:

; (16)

.

Параметр есть градиент изменения *N(h)*. Он зависит от метеорологических факторов и определяет *рефракцию в тропосфере,* оказывающую существенное влияние на распространение радиоволн.

Представим тропосферу в виде дискретных слоев, окружающих Землю. Нижний слой имеет наибольший показатель преломления *n1*,в то время как последующие слои имеют всё уменьшающиеся значения: *n1 > n2 > n3 >* и т.д. В соответствие с законом преломления Снеллиуса:

. (17)

Волна, падающая на границу раздела из оптически более плотной среды на менее плотную, изгибается в сторону границы раздела.

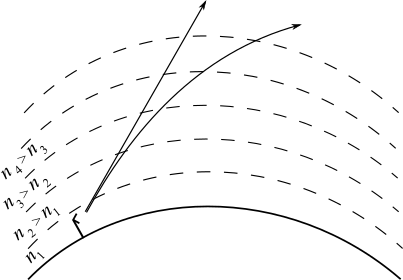


Рис.3. Рефракция радиоволн в тропосфере

На этом рисунке прямая 1 указывает направление распространения волны без учета рефракции. Кривая 2 показывает направление распространения с учетом рефракции.

Кривизна кривой рефракции зависит от климатических условий региона. В целях стандартизации понятий и числовых характеристик *Рекомендацией ITU-R Р.453* установлено среднее значение *N(h)*, определяемое формулой:

. (18)

где *N0* = 315 – среднее значение рефракционного индекса, экстраполированного от уровня моря; *h0* = 7,35 *км.*

Эта рекомендация определяет *нормальную рефракцию.*

При нормальной рефракции *dN/dh* = - 40 *км-1*.

Таким образом, основное влияние тропосферы на распространение радиоволн заключается в искривлении траектории волны. Введем некоторые полезные параметры, характеризующую рефракцию.

Если предположить, что коэффициент преломления изменяется по линейному закону, что в среднем справедливо до высоты 7 *км*, то можно ввести понятие *эквивалентный радиус Земли Rэкв*. Тогда картину распространения волн по криволинейным траекториям можно заменить на прямолинейные траектории вблизи поверхности Земли, рассматривая тропосферу как однородную среду. Соотношение между эквивалентным и действительным радиусом Земли (*R0* = 6370 *км*) определяется уравнением:

. (19)

При нормальной рефракции *Rэкв* = 8500 *км*, *К = 4/3.*

Расстояние прямой видимости между антеннами, поднятыми на высоту *h1* и *h2* (в метрах), без учета рефракции определяется уравнением:

. (20)

С учетом нормальной рефракции:

. (21)

Реальная рефракция вблизи поверхности Земли может существенно отклоняться от нормальной. Основной причиной отклонения является разница между температурами воздуха и земной поверхности. Если она значительна (несколько десятков градусов), то вдоль поверхности формируется «тепловая подушка», внутри которой градиент показателя преломления существенно отличается от нормального. Заметим также, что параметры рефракции справедливы в очень широких пределах длин волн – от оптического диапазона до метрового включительно.

Рефракция в тропосфере обычно классифицируется по величине *dN/dh*.

При нормальной рефракции, как отмечалось выше, *dN/dh* = - 40 *км-1*.

Если температура воздуха *Тв* значительно превышает температуру поверхности *Тп*, то рефракция может доходить до *критической,* при которой *dN/dh* = - 157 *км-1* , и волна распространяется вдоль земной поверхности. Такая рефракция характерна для тропической зоны на море, когда воздух разогревается до 50 – 60 градусов, а температура морской поверхности не превышает 25 градусов. Пример – пресловутый «летучий голландец», когда корабль виден далеко за горизонтом как бы «парящим в небе». В высоких северных широтах весной при положительной температуре воздуха и отрицательной температуре поверхности возникает явление, близкое к критической рефракции. Дальность горизонта увеличивается многократно и видны острова в Ледовитом океане за сотни километров. Это явление способствует дальнему распространению ультракоротких радиоволн.

Если *Тв < Тп*, то возможна *отрицательная рефракция,* при которой показатель преломления возрастает с высотой, и кривая траектории распространения прогибается выпуклостью в сторону Земли. Примером такой рефракции являются «миражи в пустыне». Раскаленный песок при вечерней прохладе создает отражение голубого неба на песке. В радиосвязи этот вариант рефракции приводит к большим потерям мощности радиосигнала.

**5.2. Распространение радиоволн в свободном пространстве**

Свободное пространство можно рассматривать как однородную непоглощающую среду с *ε* = 1. Такой средой является вакуум. В земной атмосфере таких идеальных сред не существует, тем не менее, выражения, описывающие условия распространения радиоволн в этом простейшем случае, являются фундаментальными. Распространение радиоволн в более сложных случаях характеризуется теми же выражениями с внесением в них множителей, учитывающих влияние конкретных условий распространения.

Для свободного пространства плотность мощности *П (Вт/м2)* на расстоянии *r (м)* от изотропного источника, излучающего равномерно во всех направлениях, связана с мощностью, излучаемой этим источником *Ризл (Вт)* следующей зависимостью:

. (22)

Плотность мощности от направленной излучающей антенны с нормированной диаграммой направленности *F (θ,φ)* и с коэффициентом направленного действия (КНД) антенны *Dизл* определяется уравнением:

. (23)

В уравнениях *Ризл* есть мощность излучения антенны передатчика, а *r* – расстояние между антеннами передатчика и приемника.

Из электродинамики известны соотношения, устанавливающие связь между параметрами электромагнитных волн в виде:

. (24)

Используя эти соотношения, получим выражение для амплитуды напряженности электрического поля *Е* на входе антенны приемника в виде:

. (25)

Допустим, что диаграммы направленности антенн передатчика и приемника направлены строго навстречу друг другу и имеют одинаковые поляризации. Тогда для обеих антенн справедливо уравнение *F(θ,φ) = 1.*

Мощность на входе приемника *Рпр* с согласованной антенной определяется плотностью мощности *П* на входе антенны и *эффективной поверхностью приемной антенны* *Аэф* , которая характеризуется площадью фронта волны, из которой антенна извлекает электромагнитную энергию при известном КНД приемной антенны *Dпр*:

. (26)

А при *F(θ,φ) = 1*, получим:

. (27)

Преобразуем это уравнение, выразив длину волны *λ* через частоту *f*. Получим:

. (28)

Определим ослабление мощности радиосигнала в децибелах на входе приемника при условии, что приемник и передатчик имеют изотропные антенны, у которых *D = 1.* Получим:

. (29)

Подставляя известные численные значения в это уравнение и выражая частоту в *МГц,* получим:

. (30)

Величина *L0* называется *основным ослаблением свободного пространства.* Обратим внимание на то, что ослабление мощности в канале «передатчик – приемник» происходит не за счет тепловых потерь (они в вакууме отсутствуют), а за счет рассеивания энергии в пространстве изотропными антеннами. Приемная антенна получает только малую часть излученной энергии. Чтобы увеличить мощность приема, используют направленные антенны с *D>>1.* Тогда мощность увеличивается, а ослабление уменьшается, и уравнение, описывающее ослабление мощности радиосигнала, в этом случае принимает вид:

. (31)

На практике вместо коэффициента направленного действия *D*, который является теоретическим параметром, используют измеряемый параметр – *коэффициент усиления антенны G.* Эти два параметра связаны соотношением:



В общем случае *D(θ,φ),* то есть являетсяфункцией координат пространства. *D0*, как и *G*, определяется только в главном направлении – максимуме излучения (приема).

Уравнение (31) с использованием коэффициента усиления *G* применяют для анализа *бюджета канала связи.* При этом некоторые из параметров являются заданными, например, мощность передатчика, несущая частота и расстояние до приемника, остальные требуемые параметры рассчитываются и сопоставляются с возможными.

Удобным параметром при анализе бюджета связи является *эффективная изотропно-излучаемая мощность (ЭИИМ), равная* произведению мощности передатчика и коэффициента усиления передающей антенны:

*ЭИИМ = Ризл Gизл*

Тепловые потери в тропосфере малы. Они вызваны в основном молекулами воды и кислорода и в диапазоне частот до 15 ГГц и не превышают 0,015 дБ на километр. Всплеск затухания до 0,5 дБ/км на частоте около 22 ГГц считается значительным. Примерно такое же затухание в диапазоне ниже 10 ГГц испытывают радиоволны в дожде средней плотности, облаках и в густом тумане.