

УДК 621.371

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ И КРИТИЧЕСКОГО УГЛА ОТРАЖЕНИЯ РАДИОСИГНАЛА ОТ ИОНОСФЕРЫ

Е.В. Куцев

Рассматривается метод определения критической частоты и максимального угла падения радиоволны, при которых возможно ее отражение от ионосферы в зависимости от электронной плотности.

Ключевые слова: частота; отражение; ионосфера; радиоволна; рефракция.

FINDING CRITICAL FREQUENCIES AND CRITICAL ANGLE OF REFLECTED RADIO SIGNAL FROM THE IONOSPHERE

E.V. Kutsev

It describes the method of finding the critical frequency and the maximum angle of radio waves incidence that allow its reflection from the ionosphere as a function of the electron density.

Key words: frequency; reflection; ionosphere; radio wave; refraction.

Дальность радиосвязи – одна из основных составляющих любой радиолинии. Она определяется и зависит не только от параметров передатчика и приемника, но в большой степени и от условий распространения радиоволн [1–3].

Большой интерес представляет ионосферное распространение радиоволн, т. е. их однократное или многократное отражение от ионосферы.

В данной статье рассматривается вопрос определения критической частоты $f_{кр}$ и критического угла к горизонту $\varphi_{кр}$, при которых радиоволны будут отражаться от ионосферы.

Существенное влияние на распространение радиоволн оказывает ионосфера. Ионосфера – это

верхняя область атмосферы, которая находится на высоте примерно от 60 до 20000 км, где газ частично или полностью находится в состоянии ионизации, которая приводит к большому содержанию в нем электронов и ионов.

В стратосфере (приблизительно до высоты 60 км) плотность воздуха намного ниже, чем в тропосфере (примерно до высоты 10 км). Благодаря этому стратосфера оказывает несущественное влияние на распространение сигнала.

Экспериментальное изучение ионосферы по степени ионизации выявило ее слоистое строение. Распределение электронной плотности по высоте h над земной поверхностью показано на рисунке 1. Основной максимум ионизации образуется на высоте 250–400 км и называется слоем F_2 .

Состояние тропосферы определяется ее составом, температурой, давлением, процессами ионизации, рекомбинации, подверженные регулярным и аномальным изменениям.

К регулярным изменениям относятся суточные, сезонные, широтные и долготные изменения. К аномальным изменениям относят ионосферно-магнитные бури, образование спорадического слоя (сильно ионизированный, в направлении облачности на высотах 90–100 км). Данные изменения зависят от регулярной и нерегулярной солнечной активности, а изменения спорадического слоя обусловлено тепловыми процессами и усиленными потоками

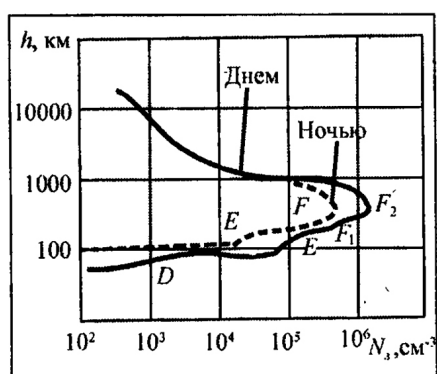


Рисунок 1 – Распределение электронной плотности

частиц в E слое. Кроме этих значительных изменений существуют мелкие изменения неоднородности (до нескольких десятков метров) с пониженной или повышенной электронной концентрацией по сравнению с окружающей ионосферой.

Мелкие неоднородности непрерывно перемещаются под действием ветров в ионосфере, флуктуируют по электронной плотности в течение единиц и десятков секунд и вызывают рассеяние радиоволн.

Относительная диэлектрическая проницаемость ионизированного газа определяется выражением:

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{Ne^2}{m\varepsilon_0(\omega^2 + \nu^2)}, \quad (1)$$

Относительная проводимость ионизированного газа определяется выражением:

$$\gamma_u = 1 - \frac{Ne^2\nu}{m(\omega^2 + \nu^2)}. \quad (2)$$

где N – электронная плотность; e – заряд электрона; m – масса электрона; ν – частота соударений электрона с нейтральными молекулами и ионами в единицу времени; ω – круговая частота; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума.

Для большинства диапазонов частотой соударений можно пренебречь:

$$\omega^2 \gg \nu^2. \quad (3)$$

С учетом (3) формулы (1) и (2) можно представить в упрощенном виде:

$$\varepsilon_u \approx 1 - \frac{Ne^2}{m\varepsilon_0\omega^2}, \quad (4)$$

$$\gamma_u \approx 1 - \frac{Ne^2\nu}{m\omega^2}. \quad (5)$$

Обозначив $\omega_0^2 = \frac{Ne^2}{m\varepsilon_0}$, получим:

$$\varepsilon_u \approx 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} = 1 - \frac{f_0^2}{f^2}, \quad (6)$$

где частота f_0 называется плазменной или лэнгмюровой с учетом того, что $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \frac{\Phi}{m}$; $m = 9,106 \cdot 10^{-31}$ кг; $e = -1,602 \cdot 10^{-19}$, получаем:

$$f_0 = \sqrt{80,8N}. \quad (7)$$

На основании (7) получаем расчетную формулу в удобном виде:

$$\varepsilon_u \approx 1 - 80,8 \frac{N}{f^2}. \quad (8)$$

Из приведенных формул видно, что относительная диэлектрическая проницаемость ионосферы меньше единицы, другими словами, абсолютная проницаемость ионосферы меньше проница-

емости вакуума. Диэлектрическая проницаемость и проводимость ионосферы зависят от частоты. Это показывает, что фазовая скорость радиоволн неодинакова по частоте, т. е. ионосфера является диспергирующей средой. В результате изменения концентрации электронов N в пространстве ионосфера является неоднородной.

Относительная диэлектрическая проницаемость в ионосфере, в зависимости от электронной плотности и частоты радиоволн, может принимать любые значения меньше единицы, а также быть равной нулю или даже отрицательной.

Если предположить, что волна частоты f падает на ионизированный слой, в котором с высотой меняется концентрация электронов и имеет максимум внутри слоя, то на некоторой высоте плазменная частота, зависящая от концентрации электронов по формуле (7), может стать равной частоте падающей волны:

$$f_0(N) = f. \quad (9)$$

В результате выполнения данного условия относительная диэлектрическая проницаемость ε_u и коэффициент преломления $n = \sqrt{\varepsilon_u}$ станут равными нулю. Ниже данного уровня по концентрации электронов эти величины больше нуля, а выше этого уровня ε_u становится отрицательной, n мнимой. Другими словами, ниже этого уровня происходит волновой процесс, а выше волна не распространяется. Согласно теории сохранения энергии, волна должна отражаться от области слоя выше этого уровня.

Если увеличить частоту падающей волны f , то отражение произойдет от области с более высокой концентрацией. Это будет происходить до тех пор, пока частота волны f не станет равной плазменной частоте в слое с максимальной концентрацией электронов:

$$f = f_0(N_{max}) = f_{кр}. \quad (10)$$

Частота $f_{кр}$ называется критической, т. е. это максимальная частота вертикально падающей волны, которая еще отражается от данного слоя. При частоте падающей волны, больше критической, отражения не будет ни на какой частоте, следовательно, слой для волны становится прозрачным.

Помимо отражения и преломления радиоволн, в ионосфере происходит ослабление амплитуды за счет проводимости ионосферы. В большинстве диапазонов поглощение энергии радиоволн уменьшается с ростом частоты.

Примем, что уровни одинаковых значений электронной концентрации являются плоскостями, параллельными плоской земной поверхностью. На рисунке 2 условно изображены слои ионосферы, в пределах которых электронная концентрация оди-

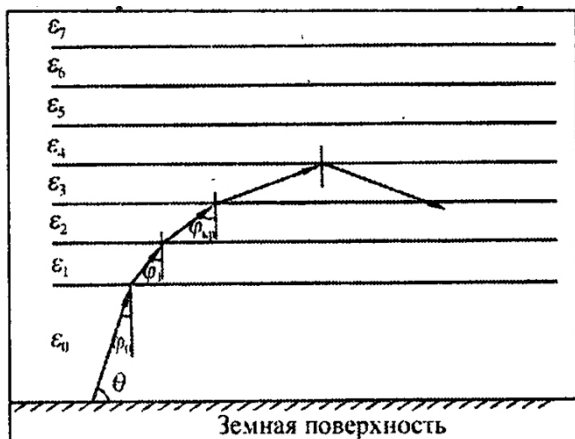


Рисунок 2 – Слои атмосферы с одинаковой электронной концентрацией

накова. Нижний слой ϵ_1 соприкасается со слоем воздуха ϵ_0 . Диэлектрическая проницаемость каждого слоя меньше единицы и падает с увеличением высоты, т. е. растет электронная концентрация.

При падении волны на границу раздела двух слоев будет выполняться закон Снеллиуса [1]:

$$\sqrt{\epsilon_0} \sin \varphi_0 = \sqrt{\epsilon_1} \sin \varphi_1 = \dots = \sqrt{\epsilon_n} \sin \varphi_n, \quad (11)$$

где $\epsilon_0, \epsilon_1, \dots, \epsilon_n$ – относительные проницаемости каждого слоя.

При прохождении радиоволны из оптически более плотной в оптически менее плотную среду, угол преломления на каждой из границ будет больше угла падения, и волна отклонится в сторону земной поверхности. На границе с некоторым слоем угол преломления может стать большим или равным 90° . Следовательно, волна изменит направление своего распространения в сторону земной поверхности – произойдет отражение волны.

С учетом того, что $\sqrt{\epsilon_0} = 1$, из формулы (11) найдем угол $\varphi_{кр}$, при котором происходит отражение:

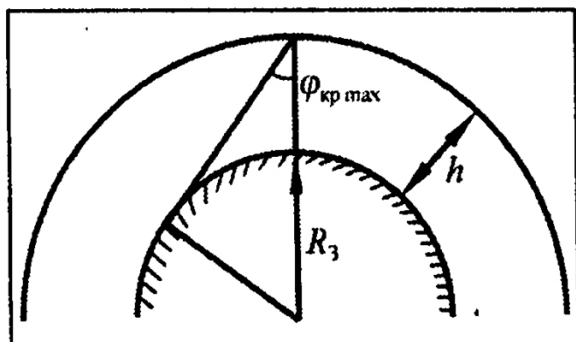


Рисунок 3 – К определению максимального угла падения

$$\sin \varphi_{кр} = \sqrt{\epsilon_n} = \sqrt{1 - 80,8 \frac{N}{f^2}}, \quad (12)$$

Формула (12) показывает, что электромагнитная волна с частотой f может отразиться от ионосферы с электронной плотностью N , только если угол падения волны равен или превышает критический угол $\varphi_{кр}$. Чем больше электронная плотность N , тем при меньших углах $\varphi_{кр}$ возможно отражение радиоволн от ионосферы.

Критический угол отражения $\varphi_{кр}$ – это угол, при котором возможно отражение при частоте f и электронной плотности N .

В реальности изменение диэлектрической проницаемости происходит плавно, поэтому искривление траектории волны происходит непрерывно.

Из формулы (12) следует:

$$\sin \varphi_{кр}^2 = 1 - 80,8 \frac{N}{f^2}. \quad (13)$$

С учетом формулы (7) получим закон секанса:

$$f = f_{кр} \sec \varphi_{кр}. \quad (14)$$

Эта величина является максимальной, при которой радиоволна отражается от данного слоя ионосферы при заданной максимальной концентрации и угле падения $\varphi_{кр}$:

$$f_{max} = f_{кр} \sec \varphi_{кр}. \quad (15)$$

Максимальный угол падения $\varphi_{кр \max}$ ограничен наиболее пологим лучом, проходящим по касательной к земной поверхности вследствие ее сферичности и слоев ионосферы. Его можно определить по рисунку 3.

$$\sin \varphi_{кр \max} = \frac{R_3}{R_3 + h}. \quad (16)$$

Отсюда наибольшее значение максимальной частоты:

$$f_{max \max} \approx f_{кр} \sqrt{\frac{R_3 + 2h}{2h}}. \quad (17)$$

Таким образом, отражение радиоволн в ионосфере происходит не от нижней границы с воздухом, а на некоторой высоте в ионосфере.

По формуле (15) определим максимальную частоту радиоволны, которая может отразиться от слоя данной максимальной концентрации N_{max} на высоте h при самом пологом падении волны $\varphi_{кр \max}$. Радиоволны с частотой f выше частоты (15) не отражаются от ионосферы ни при каких углах падения. Они проходят сквозь ионосферу, частично затухая.

Таким образом, если частота радиоволны меньше критической $f < f_{кр}$, то она всегда отражается от данной области ионосферы, независимо

от угла падения. Радиоволны с диапазоном частот $f_{кр} < f < f_{\max \max}$ отражаются только при углах падения больше критических $\varphi > \varphi_{кр}$. Радиоволны с частотами $f > f_{\max \max}$ не отражаются от ионосферы.

Метод увеличения дальности радиосвязи хорошо подходит для коротковолновых линий связи, т. к. максимальная частота отражения $f_{\max \max}$ ограничена 10–12 МГц.

Литература

1. Семенов А.И. Распространение радиоволн по естественным трассам: учеб. пособие для вузов / А.И. Семенов. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2005.
2. Калинин А.И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний / А.И. Калинин. М.: Связь, 1979.
3. Колосов М.А., Шабельников А.В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса / М.А. Колосов, А.В. Шабельников. М.: Советское радио, 1976.