

# **Оценка зависимости показателя поглощения сигнала загоризонтной РЛС от частоты при прохождении через ионосферу**

**А.В. Бархатов**

## **Аннотация**

В докладе рассматривается алгоритм вычисления интегрального показателя поглощения сигнала загоризонтной РЛС в зависимости от частоты при его прохождении через ионосферу. Исходными данными для алгоритма являются географические координаты РЛС, расстояние до цели и направление луча. Параметры, необходимые для оценки показателя поглощения, такие как температура электронов, концентрация электронов и нейтральных частиц берутся из международной справочной модели ионосферы IRI-2007 и модели нейтральной атмосферы MSIS-E-90.

## **Estimation of the over-the-horizon radar signal absorption coefficient when passing through the ionosphere**

**A.V. Barkhatov**

## **Abstract**

The report deals with the algorithm for estimation of the over-the-horizon radar signal integral absorption coefficient depending on the frequency when passing through the ionosphere. Input data for the algorithm are the geographic coordinates of the radar, the distance to the target and the beam direction. Parameters which are required to evaluate the absorption coefficient, such as electron temperature, electron and neutral particles densities, are taken from the International Reference Ionosphere model (IRI-2007) and the neutral atmosphere model (MSIS-E-90).

Расчет ионосферной радиотрассы заключается обычно в нахождении максимально возможной частоты, при которой радиолокационный сигнал, отразившись от ионосферы, падает на землю на заданном расстоянии  $D$  от передающей позиции [1]. Эта частота называется максимальной применимой частотой (МПЧ). Ей соответствует минимальное поглощение радиосигнала в ионосфере.

Так как ионосфера помимо регулярных изменений подвержена изменениям нерегулярным, и их невозможно отслеживать в реальном времени, рабочую частоту загоризонтной РЛС выбирают немного ниже МПЧ, чтобы обеспечить непрерывное прохождение радиоволны через ионосферу до заданной точки. На основании экспериментальных данных установлено, что рабочая частота должна быть равна 0,85 от МПЧ [1]. Значение 0,85 МПЧ называют оптимальной рабочей частотой. Расчет радиотрассы завершают оценкой величины поглощения для этой частоты.

В то же время, при выборе рабочей частоты загоризонтной РЛС нельзя не учитывать другие факторы. Например, уровень активных помех, который в коротковолновом (КВ) диапазоне может на десятки децибел превышать уровень собственных шумов приемника [2]. Может оказаться, что на частоте 0,85 МПЧ будет присутствовать мощная активная помеха, делающая функционирование РЛС невозможным. В связи с этим при комплексном (с учетом различных факторов) решении задачи выбора рабочей частоты КВ РЛС расчет прохождения сигнала через ионосферу должен заключаться не в определении одной только МПЧ, а в оценке зависимости поглощения от частоты во всем рабочем диапазоне. При этом оптимальная

рабочая частота (ОРЧ) должна определяться не только по условиям ионосферного распространения, а с учетом всех значимых факторов.

Здесь, как и при обычном определении МПЧ, будем исходить из идеализированной картины отражения радиоволн от ионосферы, при которой пренебрегают горизонтальными градиентами концентрации электронов, влиянием магнитного поля земли и сферичностью ионосферы [1].

На рис. 1 показана траектория пространственной волны при распространении из точки И в точку П с прохождением через ионосферу. До входа в ионосферу сигнал распространяется прямолинейно с постоянной скоростью, равной скорости света  $c$ . В ионосфере луч искривляется. Показатель преломления  $n$  меняется с высотой. На криволинейном участке скорость сигнала переменна и равна  $\vartheta_{gp} = cn$ . Скорость  $\vartheta_{gp}$  меньше скорости света, так как  $n$  всегда меньше единицы.

Согласно первой теореме эквивалентности [1], время прохождения сигналом криволинейного пути в ионосфере с групповой скоростью  $\vartheta_{gp} = cn$  равно времени прохождения сигналом воображаемого треугольного пути АОБ со скоростью  $c$ .

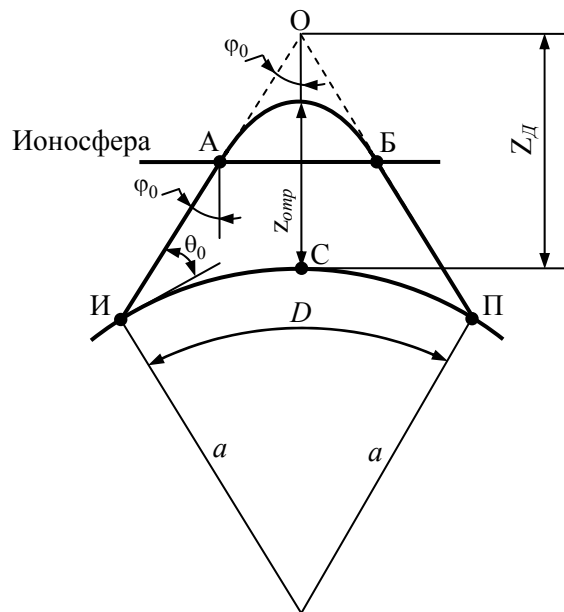


Рис. 1

Высота  $Z_D$  называется действующей высотой. Из теоремы синусов получается:

$$Z_D = a \left[ \frac{\sin\left(\frac{D}{2a} + \varphi_0\right)}{\sin \varphi_0} - 1 \right], \quad (1)$$

где  $a$  – радиус Земли,  $D$  – расстояние между точками И и П,  $\varphi_0$  – угол падения луча на ионосферу.

Для вертикально направленного сигнала (угол возвышения  $\theta_0 = 90^\circ$ ), если пренебречь влиянием магнитного поля Земли,

$$Z_D = z_0 + \int_{z_0}^{z_{omp}} \frac{dz}{n}, \quad (2)$$

где  $z_0$  - высота ионосферы,  $z_{omp}$  - истинная высота отражения сигнала. Действующая высота является воображаемой высотой, на которой отражается сигнал, если считать, что его скорость распространения в ионосфере, как и вне ее, постоянна и равна  $c$ .

Показатель преломления

$$n = \sqrt{1 - \frac{80,8N_e}{f^2}}, \quad (3)$$

где  $f$  - частота сигнала,  $N_e$  - электронная концентрация, которая меняется с высотой.

Корень квадратный из произведения  $80,8N_e$  - плазменная частота:  $f_N = \sqrt{80,8N_e}$ . Отражение сигнала происходит на той высоте, где плазменная частота равна частоте сигнала:  $f_N(z_{omp}) = f$ . Таким образом, имея зависимость  $N_e$  от высоты  $z$ , можно построить зависимость  $f_N$  от высоты и по известной частоте сигнала  $f$  найти истинную высоту отражения  $z_{omp}$ , после чего решить определенный интеграл (2), найдя действующую высоту  $Z_D$  отражения вертикально направленного сигнала.

Согласно второй теореме эквивалентности [1], действующая высота наклонно излучаемого сигнала равна действующей высоте вертикального излучаемого сигнала, если равны их истинные высоты отражения. В то же время, согласно «закону секанса», если  $z_{omp} / a \ll 1$  (а это условие выполняется для всех  $z_{omp}$ ), наклонный луч на частоте  $f_0$  и вертикальный луч на частоте  $f$  отражаются на одной и той же высоте  $z_{omp}$ , если  $f_0 = f \sec \varphi_0$ . Задавшись расстоянием  $D$  между точками и вычислив действующую высоту, как описано выше, можно вычислить угол падения луча на ионосферу  $\varphi_0$  с помощью выражения, которое следует из (1):

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{a \sin D/2a}{Z_D + a(1 - \cos D/2a)}, \quad (4)$$

и, таким образом, по известной частоте вертикального сигнала  $f$  найти частоту  $f_0 = f \sec \varphi_0$  наклонно излучаемого сигнала, который, отразившись от ионосферы, упадет на землю на заданном расстоянии  $D$ . При этом угол возвышения (угол места)  $\theta_0$  также определяется из выражения, которое следует из теоремы синусов (см. рис. 1):

$$\operatorname{tg} \theta_0 = \frac{Z_D \cos D/2a - a(1 - \cos D/2a)}{(Z_D + a) \sin D/2a}. \quad (5)$$

Для получения данных о распределении электронной концентрации  $N_e$  по высоте используют в большинстве случаев прогностические модели. Многие исследователи (например, [3-6]) считают, что лучшая из них - это международная справочная модель ионосферы (IRI - International Reference Ionosphere). Эта модель является глобальной, т.е. позволяет проводить вычисления практически для любой точки земного шара, в ней предусмотрен учет возмущенного состояния ионосферы, модель использует аппроксимацию распределений электронной концентрации не только в слоях ионосферы, но и в межслоевой области (так называемая область долины между слоями  $E$  и  $F$ ), а также дополнена моделью спорадического слоя  $E$ . На Интернет-странице [7] даны краткое описание модели, ссылки на литературные источники, ссылка на сайт FTP, где доступны программы, реализующие все имеющиеся версии

модели (IRI-90, IRI-95, IRI-2001, IRI-2007), а также ссылка [8], позволяющая проводить расчеты в рамках модели через Интернет.

Для того, чтобы программа IRI-2007 выполнила расчет, сначала необходимо, как минимум, задать географические координаты, дату и время (местное или универсальное). При расчетах односкачковых ионосферных трасс используют высотные профили электронной концентрации - а также другие профили, речь о которых пойдет ниже, - для точки местности, располагающейся посередине между пунктами излучения и приема (точка С на рис. 1). Географические координаты т. С определяются следующим образом. Дуга ИС является дугой так называемого большого круга (ортодромией). Согласно основным формулам ортодромии [9] и формулам, следующим из сферической геометрии [10], широта т. С вычисляется как:

$$\varphi_2 = \arcsin\left(\sin \varphi_1 \cos \frac{D}{2a} + \cos \varphi_1 \sin d \cos \alpha\right), \quad (6)$$

где  $\varphi_1$  - широта начальной точки (т. И),  $\alpha$  - направление луча КВ РЛС относительно севера.

Долгота вычисляется по формуле

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \arccos\left(\frac{\cos d - \sin \varphi_1 \sin \varphi_2}{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}\right). \quad (7)$$

Средний радиус Земли  $a$  при аппроксимации ее фигуры сфероидом равен приблизительно 6371,01 км. В то же время, наименьшую среднеквадратическую ошибку вычислений координат по формулам ортодромии дает значение радиуса  $a=6372,8$  км, которое и используется в последующем примере.

Если КВ РЛС расположена в Санкт-Петербурге (широта  $59^{\circ}53'N$ , долгота  $30^{\circ}15'E$ ), дальность действия  $D=2000$  км, направление  $\alpha=135^{\circ}$ , то, согласно формулам (6-7), координаты т. С:  $53^{\circ}1'30"N$ ,  $40^{\circ}50'12"E$ , и расположена эта точка рядом с селом Новокруглое Тамбовской области. На рис. 2 показано распределение электронной концентрации  $N_e$  по высоте в указанном месте, рассчитанное с помощью онлайн программы [8], а также график распределения плазменной частоты  $f_N = \sqrt{80,8N_e}$ . Расчет выполнен для 12 часов местного времени, на 17.02.2011. Для всех параметров, являющихся исходными данными для модели IRI, сохранены значения по умолчанию, за исключением параметра, отвечающего за выбор модели максимума слоя F. Вместо модели URSI, используемой по умолчанию, выбрана CCIR, так как последняя дает более точные результаты для суши.

По графику плазменной частоты видно, что максимальная частота вертикально излучаемого сигнала, который еще отражается от ионосферы, имеет значение около 8 МГц. Эта частота называется критической частотой  $f_{кр}$ .

Перебирая частоту  $f$  вертикально излучаемого сигнала от нуля до  $f_{кр}$ , для каждого значения  $f$  по зависимости  $f_N(z)$  можно определить истинную высоту отражения вертикально излучаемого сигнала, и затем, по формуле (2), действующую высоту. График действующей высоты приведен на рис. 3. Этот график называют высотной-частотной характеристикой (или ионограммой), его можно получить экспериментально методом вертикального зондирования. Тонкой пунктирной линией на рис. показана истинная высота отражения  $z_{отр}$ .

При вычислении действующей высоты интеграл в формуле (2) решался численно методом левых прямоугольников. Частота менялась с шагом 10 кГц.

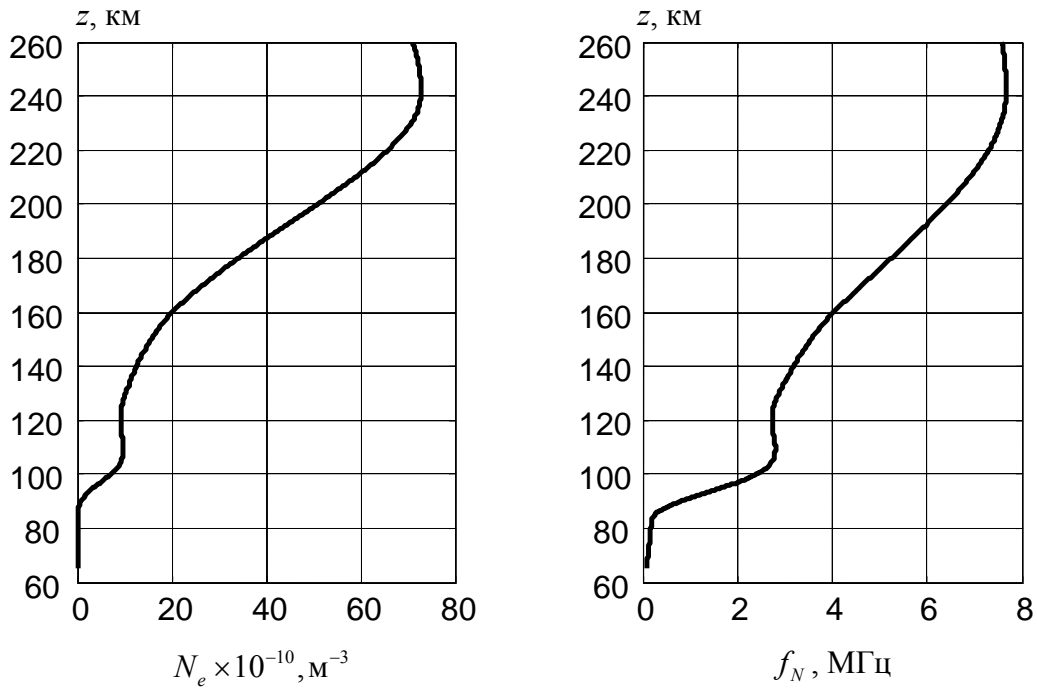


Рис. 2

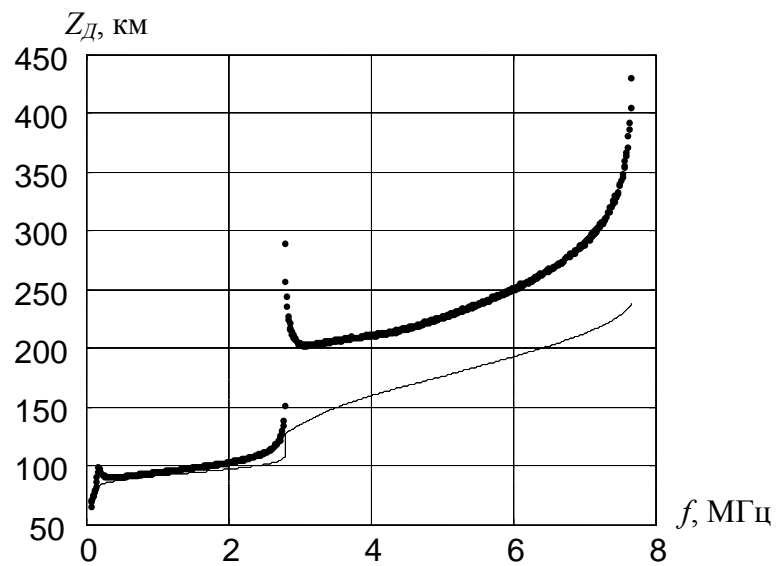


Рис. 3

Расчет угла падения луча на ионосферу  $\varphi_0$  по формуле (4), частоты наклонно излучаемого сигнала  $f_0 = f \sec \varphi_0$  и угла места  $\theta_0$  по формуле (5) приводит к результату, показанному на рис. 4.

Как сказано выше, сигнал частоты  $f_0$ , излученный под углом  $\theta_0$ , отразившись от ионосферы, упадет на землю на расстоянии  $D$  (2000 км). Для некоторых частот одному значению частоты соответствуют несколько углов места  $\theta_0$ , и в точку приема может прийти сразу несколько лучей, что приведет к такому эффекту, как замирание сигнала. Максимальная применимая частота (МПЧ) равна 20,3 МГц.

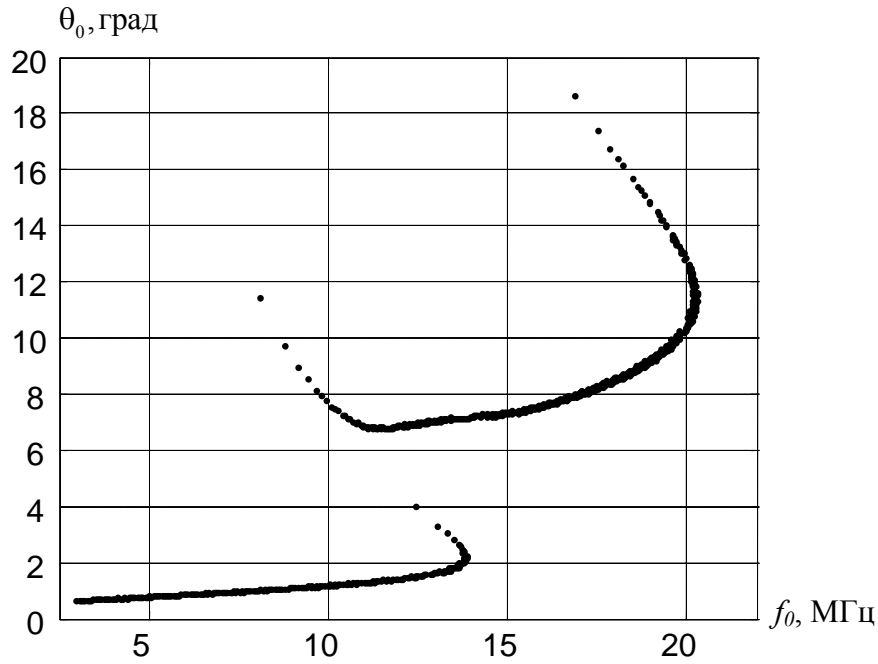


Рис. 4

Интегральный показатель поглощения вычисляется по формуле [1]:

$$\Gamma = \frac{80,8}{cf_0^2 \cos \varphi_0} \int_{z_0}^{z_{omp}} \frac{N_e v dz}{\sqrt{1 - \frac{80,8 N_e}{f_0^2 \cos^2 \varphi_0}}}, \quad (8)$$

где  $v$  - частота соударений электронов, которая, как и электронная концентрация  $N_e$ , зависит от высоты  $z$ .

Частота соударений электронов определяется как сумма двух слагаемых [11]:

$$v = v_{ei} + v_{en}, \quad (9)$$

где  $v_{ei}$  - частота соударений электронов с ионами,  $v_{en}$  - частота соударений электронов с нейтральными частицами.

Частота электрон-ионных соударений [12]

$$v_{ei} = N_e \cdot 10^{-6} \left[ 59 + 4,18 \lg \left( \frac{T_e^3}{N_e} \right) \right] T_e^{-3/2}, \quad (10)$$

где  $T_e$  - температура электронов. Концентрация  $N_e$  выражена в  $\text{м}^{-3}$ .

Частота соударений электронов с нейтральными частицами определяется для трех основных компонент в составе атмосферы [13]: молекулярного азота ( $N_2$ ), молекулярного и атомарного кислорода ( $O_2$  и  $O$ ):

$$v_{en} = v_{eN_2} + v_{eO_2} + v_{eO}. \quad (11)$$

Частоты соударений с этими частицами вычисляются по следующим формулам [14]:

$$v_{eN_2} = 2,33 \cdot 10^{-11} N_{N_2} (1 - 1,21 \cdot 10^{-4} T_e) T_e, \quad (12)$$

$$v_{eO_2} = 1,82 \cdot 10^{-10} N_{O_2} (1 + 0,036 \sqrt{T_e}) \sqrt{T_e}, \quad (13)$$

$$v_{eO} = 8,9 \cdot 10^{-11} N_O (1 + 5,7 \cdot 10^{-4} T_e) \sqrt{T_e}, \quad (14)$$

где концентрации нейтральных частиц  $N_{N_2}$ ,  $N_{O_2}$  и  $N_O$  выражены в  $\text{см}^{-3}$ .

Температура электронов  $T_e$  меняется с высотой. Для значений высоты больше 120 км профиль  $T_e$  может быть получен с помощью IRI. Для меньших значений высоты температуру электронов можно определить, учтя, что на небольших высотах «обычно сохраняется тепловое равновесие между электронным, ионным и нейтральным газами ( $T_e \approx T_i \approx T_n$ ) из-за высокой плотности нейтральных частиц, в столкновениях с которыми эффективно охлаждаются как ионы, так и электроны» [15]. Здесь  $T_i$  - температура ионов,  $T_n$  - температура нейтральных частиц. Температура  $T_n$ , а также профили концентрации частиц различного сорта являются выходными данными моделей нейтральной атмосферы. Вместе с IRI в Интернете [16] доступна модель нейтральной атмосферы MSIS-E-90 (MSIS – аббревиатура от Mass-Spectrometer-Incoherent-Scatter), для которой также есть возможность выполнять онлайн расчеты требуемых параметров. На высотах ниже 72,5 км она совпадает с моделью CIRA-86, а выше – представляет скорректированную версию модели MSIS-86.

На рис. 5 слева показаны профили концентрации основных нейтральных компонент, вычисленных с помощью MSIS-E-90 для указанных выше географических координат, на 17.02.2010 в 12 часов по местному времени. Справа на рис. 5 показан профиль электронной температуры, значения выше 120 км вычислены моделью IRI-2007, профиль ниже 120 км соответствует профилю температуры нейтральных частиц, вычисленному с помощью MSIS-E-90.

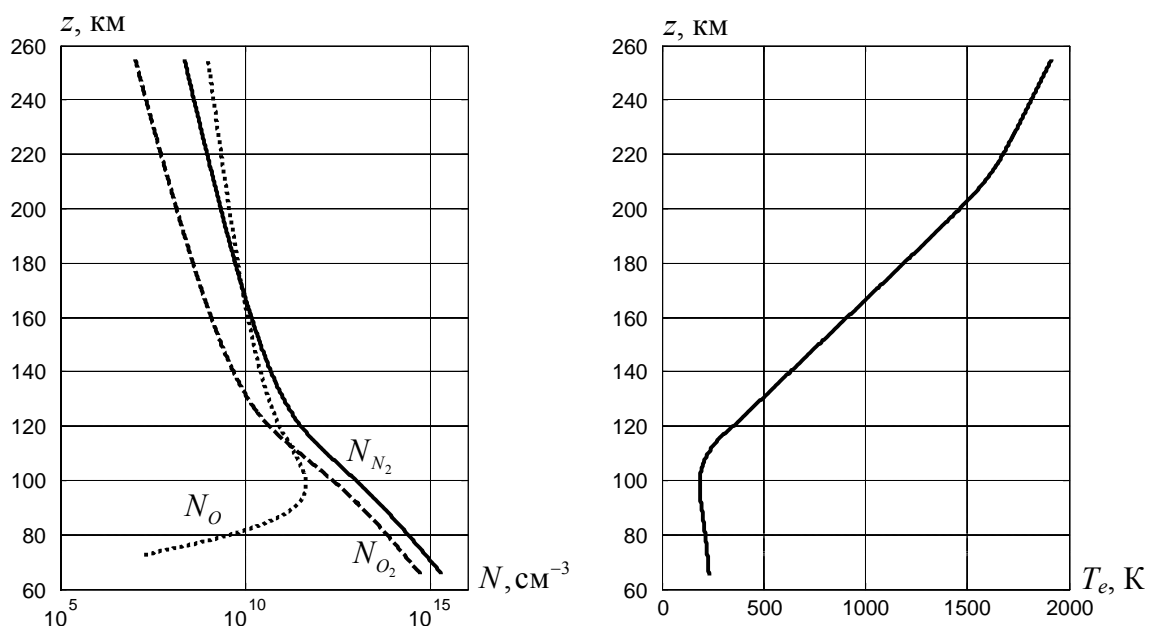


Рис. 5

На рис. 6 показаны графики зависимостей частоты столкновений электронов с ионами и нейтральными частицами трех основных сортов от высоты, вычисленных по формулам (10, 12-14). Основной вклад в частоту столкновений электронов вносят столкновения с молекулярным азотом и молекулярным кислородом.

На рис. 7 представлен график зависимости показателя поглощения от частоты. Флуктуации рассчитанных значений относительно аппроксимирующей кривой обусловлены погрешностями численного интегрирования в формулах (8) и (2). Как отмечено выше, вычисление определенных интегралов выполнялось методом левых прямоугольников.

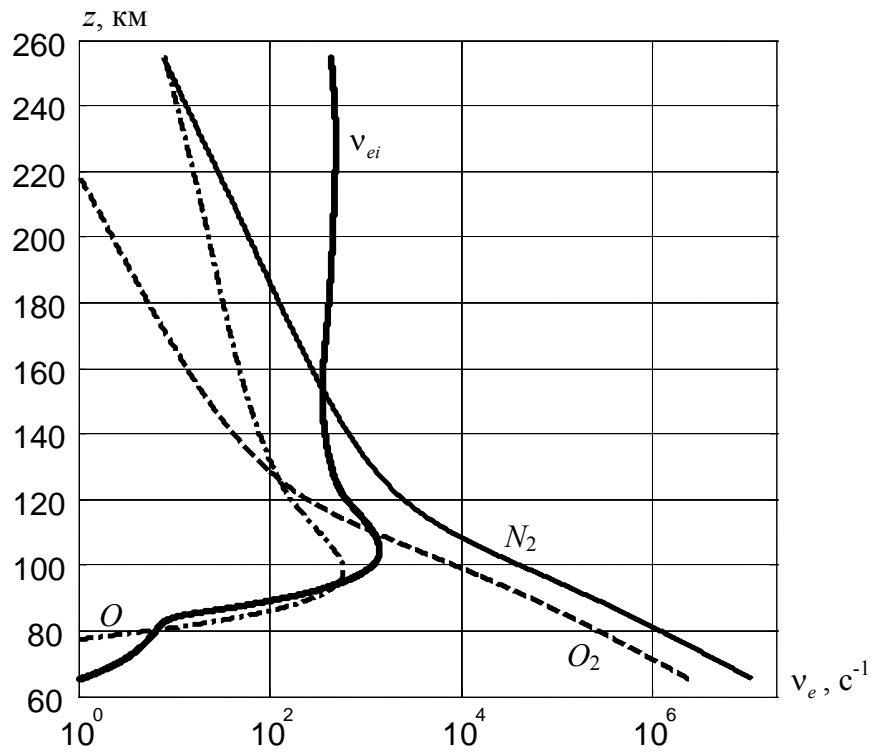


Рис. 6

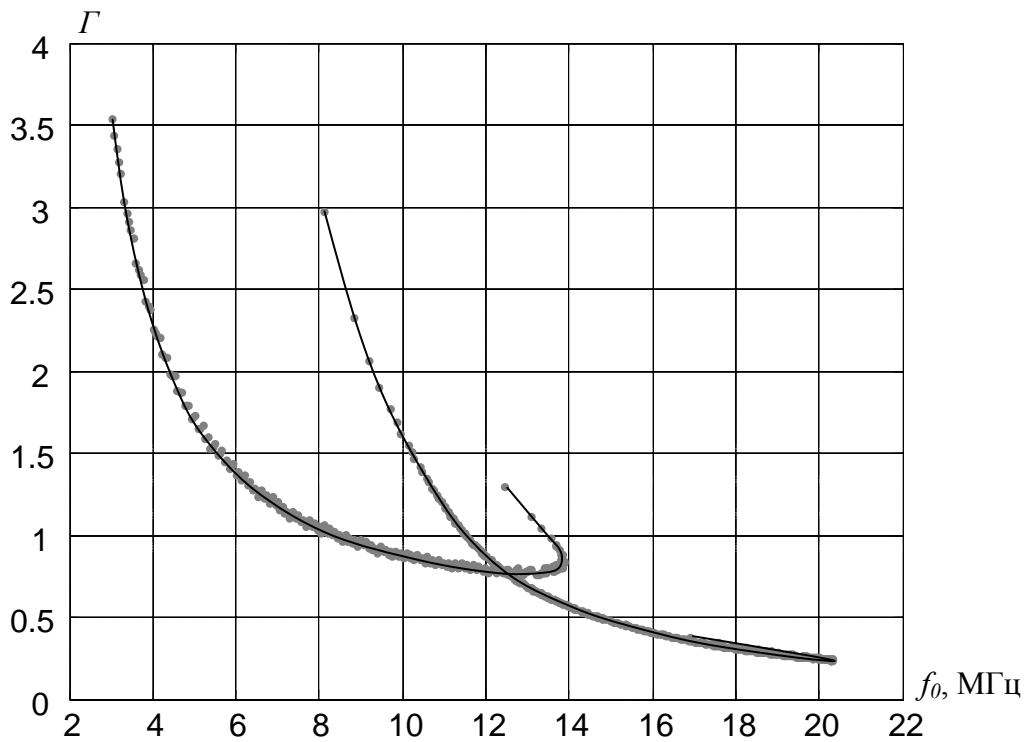


Рис. 7

Минимальное значение показателя поглощения (0,24) достигается на МПЧ. Напряженность поля при прохождении волны частотой 20,3 МГц через ионосферу за



счет поглощения уменьшится в  $e^{0,24} = 1,27$  раза. На минимальной частоте, для которой выполнялся расчет (3 МГц), напряженность упадет в  $e^{3,54} = 34,4$  раза.

Рассчитанная зависимость показателя поглощения от частоты сигнала может быть использована совместно с другими частотными зависимостями (уровня активных помех, коэффициента усиления антенны РЛС, эффективной площади рассеяния цели и т.д.) для выбора оптимальной рабочей частоты, при которой обеспечивается максимальное значение отношения сигнал/(шум+помеха) в приемнике РЛС.

Ключевую роль в вычислении показателя поглощения играют данные о высотных распределениях ионосферных параметров. При вычислениях электронной концентрации модель IRI использует среднемесячные значения переменных, определяющих высотный профиль. Для адаптации модели к текущим условиям предусмотрена возможность ввода значений этих переменных, к которым относятся [3, 8]:

максимальное значение электронной концентрации в слое F2 ( $NmF2$ );

максимальное значение плазменной частоты (критическая частота)  $f_0F2$ , которую можно задавать вместо  $NmF2$ ;

высота, на которой электронная концентрация достигает своего максимального значения ( $hmF2$ );

или, вместо высоты  $hmF2$ , коэффициент распространения  $M(3000)F2$ , который представляет из себя отношение [17]

$$M(3000)F2 = \frac{\text{МПЧ}_{3000}}{f_0F2},$$

где  $\text{МПЧ}_{3000}$  - максимальная применимая частота сигнала, отраженного от ионосферы и падающего на землю на расстоянии 3000 км от источника излучения. В [17] показано, как через  $M(3000)F2$  оценивается высота максимума концентрации  $hmF2$ . Помимо  $M(3000)F2$ , в формулу, по которой вычисляется  $hmF2$ , входят критическая частота  $f_0F2$ , скользящее 12-месячное среднее значение числа солнечных пятен  $R_{z12}$  и ряд других параметров, для которых не имеется возможности задать значения (значение  $R_{z12}$  пользователь модели может задать).

Если вместо максимальной электронной концентрации в слое F2 задается критическая частота  $f_0F2$ , то первая высчитывается по формуле [17]:

$$NmF2 = 1,24 \cdot 10^{10} f_0F2^2,$$

где концентрация выражена в  $\text{м}^{-3}$ , а частота – в мегагерцах.

Параметры  $f_0F2$  и  $M(3000)F2$  могут быть получены, соответственно, при вертикальном и наклонном зондировании ионосферы.

Адаптация модели также может выполняться по общему содержанию электронов (ТЕС – от Total Electron Content) в слое от 50 до 2000 км. В работе [4] сказано, что «в настоящее время ТЕС становится основным параметром, поставляющим информацию об условиях в ионосфере, поскольку с помощью спутников осуществляется его круглосуточный глобальный мониторинг».

Кроме перечисленных параметров, для адаптации к текущим условиям может задаваться глобальный ионосферный индекс  $I_{G12}$  [18], и, кроме того, предусмотрен выбор, как в модели будет учитываться солнечная активность: через индекс  $R_{z12}$ , через  $I_{G12}$  или через значение  $F_{10,7}$  потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10,7 см.

Для адаптации модели нейтральной атмосферы MSIS-E-90 задается поток солнечного радиоизлучения  $F_{10,7}$ .

Выше отмечалось, что при расчетах трасс используют профили распределений ионосферных параметров по высоте в зоне распространения сигнала, а конкретнее – в точке посередине между пунктами излучения и падения сигнала на цель. Если для этой точки не известны текущие значения параметров, применяемых при адаптации модели, и, в то же время, доступны данные в других точках, то возможно построить пространственные карты этих параметров на текущий момент. Методы для решения этой задачи разрабатываются и используются уже несколько десятилетий [3], и самый распространенный из них – метод Кригинга [3, 4, 6], основанной на взвешенной интерполяции аппроксимируемых значений в соседних точках.

В заключение хотелось бы отметить, что для модели IRI предложен метод адаптации по данным GPS. В частности, в [4] описано, как из обычного приемника GPS, предназначенного для навигации, извлекаются данные о параметре TEC и проводится корректировка модели IRI.

### Список литературы

1. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. Изд. 2-е, доп. и переработ. – М.: «Сов. радио», 1972. – 464 с.
2. Алебастров В.А., Гойхан Э.Ш., Заморин И.М. и др. Основы загоризонтной радиолокации. / Под ред. А.А. Колосова. – М.: Радио и связь, 1984.
3. Барабашов Б.Г., Мальцева О.А. Ионосферное обеспечение однопозиционных пеленгаторов-дальномеров диапазона декаметровых волн // Труды НИИР, М., 2003. С. 120 - 126.
4. Шлюпкин А.С. Исследование эффективности применения международной модели ионосферы IRI-2001 для прогнозирования характеристик ВЧ радиосвязи: Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. / Ростов-на-Дону, 2006.
5. Г.Г. Вертоградов. Комплексные исследования ионосферного распространения декаметровых радиоволн на трассах разной протяженности: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Ростов-на-Дону, 2007.
6. Дзвонковская А.Л. Расчет характеристик многолучевого распространения радиоволн КВ-диапазона по данным станций вертикального и наклонного зондирования ионосферы для адаптации систем связи и локации // Нелинейный мир. – 2006. – Т. 4, № 10. – С. 541-546.
7. International Reference Ionosphere. <http://iri.gsfc.nasa.gov>.
8. International Reference Ionosphere - IRI-2007. [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri\\_vitmo.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri_vitmo.html).
9. Михайлов В.С., Кудрявцев В.Г. Навигация и локация: Учебное пособие. К.: Аристей, 2006. – 832 с.
10. C. Langston, J. Zhang, K. Howard. Four-Dimensional Dynamic Radar Mosaic // Journal of atmospheric and oceanic technology. 2006. Volume 24. P. 776-790.
11. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. – М.: «Наука», 1972. – 564 с.
12. Michael C. Kelley. The earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics. Academic Press, 2009. – 556 p.
13. Мишин Е.В., Ружин Ю.Я., Телегин В.А. Взаимодействие электронных потоков с ионосферной плазмой. – Л.: Гидрометеиздат, 1989.
14. Robert W. Schunk, Andrew F. Nagy. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. Second edition. Cambridge University Press, 2009. – 628 p.
15. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. – М.: «Наука», 1988. – 528 с.
16. MSIS-E-90 Atmosphere Model. [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis\\_vitmo.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis_vitmo.html).

17. D. Bilitza (ed.). International Reference Ionosphere 1990, NSSDC 90-22, Greenbelt, Maryland, 1990.
18. Liu R.Y., Smith P.A., King J.W. A new solar index which leads to improved foF2 predictions using the CCIR Atlas // Telecom. J. 1983. Vol. 50. № 8.

### **Сведения об авторе**



**Бархатов Алексей Владимирович.** Родился в 1975. Старший научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина). Окончил СПбГЭТУ в 1998 г. по специальности радиотехника. Автор 15 работ. Научные интересы: цифровая обработка сигналов, спектральный анализ, радиолокационная гидрография, многопозиционные радиолокационные комплексы, траекторная обработка.  
E-mail: [aleksbar@yandex.ru](mailto:aleksbar@yandex.ru)