Физика плазмы и плазменные методы

УДК 621.371.182

Модель рассеяния коротких радиоволн искусственными ионосферными неоднородностями

М. С. Болдырев, Н. Д. Наумов, В. А. Никольский, В. П. Урядов

В работе представлена модель расчёта геометрии ракурсных контуров на земной поверхности, характеризующих рассеяние коротких радиоволн передатчика мелкомасштабными магнитно-ориентированными неоднородностями электронной концентрации, искусственно созданных в верхней ионосфере в результате работы нагревного стенда. Модель основана на решении системы дифференциальных уравнений, описывающих лучевую траекторию распространения радиоволны в трёхмерно-неоднородной ионосфере. Проведено сравнение результатов, полученных расчётным путём при использовании разработанной модели, с данными, полученными в результате экспериментальных исследований по ракурсному рассеянию декаметровых радиоволн с линейной частотной модуляцией, проведённых на отечественном стационарном среднеширотном нагревном стенде Сура в период 09-14 сентября 2013 г.

PACS: 52.40.Db

Ключевые слова: радиоволна, ракурсное рассеяние, ионосферные неоднородности, нагревной стенд.

Введение

Метод ракурсного рассеяния радиоволн широко применяется в исследовании искусственной ионосферной турбулентности, возникающей при воздействии на ионосферу мощного радиоизлучения нагревного стенда (НС) [1]. Данная турбулентность состоит из искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН), сильно вытянутых вдоль геомагнитного поля, что приводит к узконаправленному рассеянию радиоволн. В частности, для УКВ-диапазона можно считать, что волновые векторы рассеянных радиоволн расположены на поверхности конуса с осью, направленной вдоль продольной оси, совпадающей с направлением магнитного поля Земли [2]. Это означает, что сигнал радиопередатчика после рассеяния может попадать в приёмник, находящийся в любой точке т. н. ракурсного контура, который представляет собой множество точек пересечения поверхности конуса с земной поверхностью. При этом передатчик может находиться в любой точке сопряжённого контура, который является множеством точек пересечения с земной поверхностью такого же, но противоположно направленного конуса [3]. Информация о геометрии и расположении сопряжённых ракурсных контуров является важной и основополагающей в оценке влияния ИИН на распространение радиоволн [4].

Целью данной работы является разработка модели расчёта ракурсных контуров для коротких радиоволн, когда вследствие эффекта рефракции конус трансформируется в искривленную поверхность.

Расчётная модель

Как известно, образование ИИН обусловлено резонансной неустойчивостью ионосферной плаз-

Болдырев Михаил Сергеевич, научный сотрудник.
Наумов Николай Дмитриевич, ведущий научный сотрудник.
Никольский Василий Александрович, начальник отдела.
12 ЦНИИ Минобороны России.
Россия, 141307, Московская обл., г. Сергиев Посад-7.
E-mail: boldurevms@mail.ru
Урядов Валерий Павлович, начальник сектора.
Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ).
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Б. Печерская, 25/12а.

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2015 г.

© Болдырев М. С., Никольский В. А., Наумов Н. Д., Урядов В. П., 2016

мы в поле мощной высокочастотной волны. Речь идёт о верхнегибридном резонансе [5], т. е. когда частота излучения нагревного стенда f совпадает с верхнегибридной частотой $f_{ВГ} = \sqrt{f_p^2 + f_g^2}$. Здесь f_p — плазменная частота, f_g — гиромагнитная частота электрона. Следовательно, рассеивающая область расположена на высоте H, где концентрация электронов $N(H)$ удовлетворяет условию:

$$\frac{e^2 N(H)}{4m\varepsilon_0\pi^2} + f_g^2 = f^2,$$

где e, m — заряд и масса электрона. Зависимость концентрации электронов от высоты находится при помощи глобальной модели ионосферы IRI-2012 [6].

Ориентация ИИН вычисляется с помощью модели геомагнитного поля WMM-2010 [7]. Данный программный комплекс позволяет определять магнитное наклонение и склонение и по этим данным рассчитывать составляющие единичного вектора вдоль направления геомагнитного поля.

Для вычисления траектории радиоволны в ионосфере используется уравнение распространения лучей в неоднородной среде [8]. В сферической системе координат с началом в центре Земли траектория радиолуча описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{gathered}\frac{d^2\xi}{d\tau^2} - \xi\left[\left(\frac{d\theta}{d\tau}\right)^2 + \sin^2\theta\left(\frac{d\varphi}{d\tau}\right)^2\right] = \frac{R}{2}\frac{\partial\varepsilon}{\partial r}\\ \frac{d}{d\tau}\left(\xi^2\frac{d\theta}{d\tau}\right) - \xi^2\sin\theta\cos\theta\left(\frac{d\varphi}{d\tau}\right)^2 = \frac{1}{2}\frac{\partial\varepsilon}{\partial\theta}\\ \frac{d}{d\tau}\left(\xi^2\sin^2\theta\frac{d\varphi}{d\tau}\right) = \frac{1}{2}\frac{\partial\varepsilon}{\partial\varphi}.\end{gathered} \tag{1}$$

Здесь переменная $\xi = r/R$, где R — радиус Земли, является безразмерной и введена для удобства численного расчёта, τ — параметр, отсчитываемый вдоль траектории радиолуча, ε — относительная диэлектрическая проницаемость ионосферы. Начальные условия для системы обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка (1) определяются географическими координатами НС, а также волновым вектором радиоволны:

$$\begin{gathered}\xi_0 = 1 + H/R, \quad \left.\frac{d\xi}{d\tau}\right|_{\tau=0} = n_r\sqrt{\sigma_0},\\ \left.\frac{d\theta}{d\tau}\right|_{\tau=0} = \frac{n_\theta}{\xi_0}\sqrt{\sigma_0},\\ \left.\frac{d\varphi}{d\tau}\right|_{\tau=0} = \frac{n_\varphi}{\xi_0\sin\theta_0}\sqrt{\sigma_0},\end{gathered} \tag{2}$$

где $\sigma_0 = \varepsilon(r_0, \theta_0, \varphi_0)$, $r_0 = R + H$, H — высота расположения рассеивающего объема, n_r, n_θ, n_φ — сферические координаты единичного вектора

$$\mathbf{n} = \sin\alpha\,(\mathbf{i}\cos\beta + \mathbf{j}\sin\beta) - \mathbf{h_0}\cos\alpha,$$

который для любого значения угла β направлен вдоль образующей ракурсного конуса и характеризует начальное направление волнового вектора радиоволны. Здесь α — ракурсный угол, $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$ — два ортогональных единичных вектора, расположенные в плоскости, которая проходит через рассеивающий объем и ортогональна единичному вектору $\mathbf{h_0}$, направленному вдоль геомагнитного поля.

Решение этой системы дифференциальных уравнений с указанными начальными условиями для различных значений угла β позволяет получить семейство траекторий радиоволн. Распространение радиолуча вдоль поверхности другого конуса описывается аналогичной системой дифференциальных уравнений, где теперь начальные условия для первых производных определяются с помощью составляющих единичного вектора

$$\mathbf{m} = \sin\alpha\,(\mathbf{i}\cos\beta + \mathbf{j}\sin\beta) + \mathbf{h_0}\cos\alpha.$$

Этот вектор направлен вдоль образующей противоположно направленного конуса. Очевидно, что значение ракурсного угла $\alpha = \pi/2$ соответствует контуру обратного рассеяния.

Вычисление расположения ракурсного контура на земной поверхности заключается в многократном решении сформулированной выше задачи (1), (2) для разных начальных условий. Изменение этих условий осуществляется с помощью компонентов векторов $\mathbf{n}$ и $\mathbf{m}$, которые последовательно изменяются посредством выбора значений угла β с небольшим шагом из отрезка $0 \le \beta \le 2\pi$. В случае пересечения полученной траектории радиолуча с земной поверхностью находятся географические координаты точки этого пересечения. Такой цикл вычислений позволяет в итоге получить массивы географических координат для сопряжённых ракурсных контуров. Кроме этого, на каждом шаге вычисляется абсолютное время распространения рассеянного радиосигнала и его мощность на входе приёмника, которая определяется по известной формуле радиолокации [9].

Данные эксперимента

Для подтверждения правильности результатов, получаемых по предлагаемой расчётной модели, рассматривались данные эксперимента наклонного зондирования ионосферы радиоизлучением в режиме линейной частотной модуляции (ЛЧМ), полученные во время нагрева ионосферы в период 9–14 сентября 2013 г. с использованием стенда «Сура» (Нижегородская область). Три передатчика стенда работали в синфазном режиме,

излучалась волна обыкновенной поляризации под углом 12° от вертикали к югу вдоль магнитного меридиана. Режим излучения НС составлял 10 минут нагрев и 5 минут пауза регулярно, начиная с 0-ой минуты каждого часа. Радиоволны нагрева ионосферы излучались на частотах, близких к критической частоте ионосферы. Передатчик диагностического радиоизлучения КВ-диапазона располагался в ИЗМИРАН и излучал непрерывный ЛЧМ-сигнал в режиме 01, 06, 11, …, 56 минуты каждого часа в диапазоне 3,1—25 МГц, скорость его изменения составляла 200 кГц/с, мощность — 700 Вт. Регистрация прямых и рассеянных радиосигналов осуществлялась в приёмном пункте, располагавшемся в точке с географическими координатами φ = 49,12 N, λ = 42,57 E.

Геомагнитная обстановка во время проведения эксперимента была спокойная, значения магнитного индекса K_p находились в диапазоне 1÷2 [10]. Во время работы стенда «Сура» на ионограммах наклонного ЛЧМ-зондирования наблюдался рассеянный сигнал в виде моды, задержанной относительно прямого сигнала на несколько мс, причём пеленги этих сигналов отличались.

Сравнение результатов моделирования и эксперимента

С помощью расчётной методики проводилось моделирование распространения радиоволн как по прямым, так и по рассеянным радиотрассам. При моделировании осуществлялась коррекция глобальной модели ионосферы IRI-2012 для условий эксперимента. Коррекция проводилась по $N(h)$-профилю ионосферы в подионосферной точке центра области рассеяния. Кроме этого, варьировалось геометрическое расположение точки рассеяния по высоте и в горизонтальном направлении, что позволило оценить пространственные размеры области возмущения.

На рис. 1 представлены результаты моделирования ракурсного рассеяния радиоволн для сеанса зондирования 13:16 UT 09.09.2013 г. в период работы НС «Сура» в режиме воздействия на ионосферу. Сплошными линиями обозначены ракурсные контуры, проходящие через заданные пункты приёма и передачи и образовывающиеся при рассеянии радиоволн с частотой 17 МГц на высоте точки рассеяния 210 км, штриховыми линиями — радиоволн с частотой 20 МГц на высоте 230 км.

Цифрами обозначены сопряжённые друг с другом ракурсные контуры. Для частоты 17 МГц сопряжёнными контурами являются 79° и 101°, а для частоты 20 МГц — 78° и 102°.

На рис. 2 представлена зависимость времени задержки рассеянного сигнала от положения на ракурсном контуре. Обозначения используются такие же, как на предыдущем рисунке.

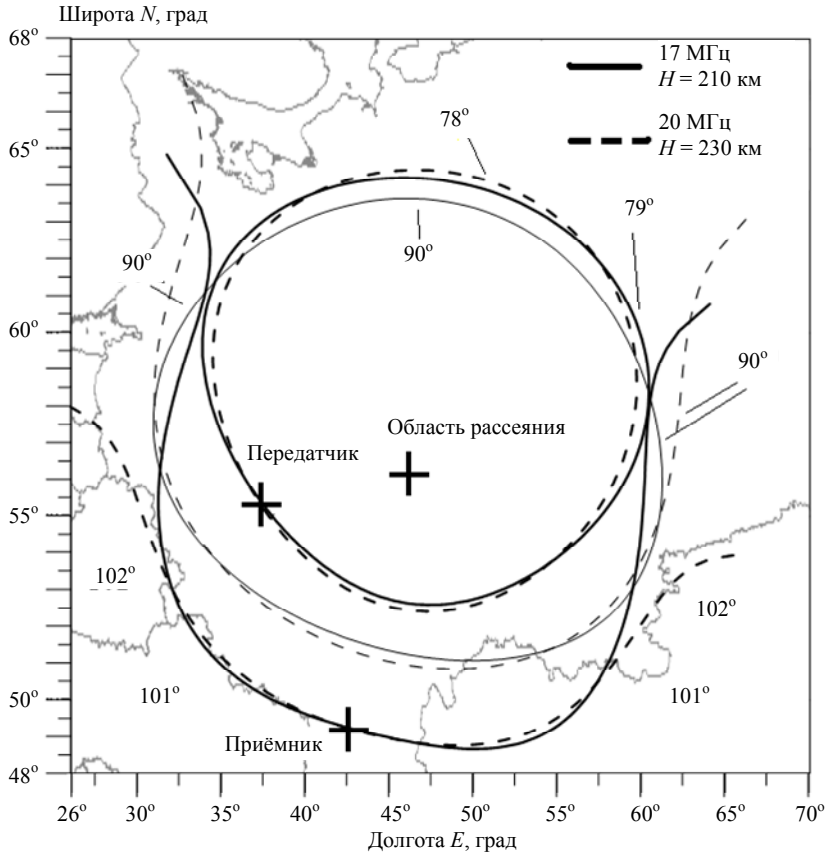

Рис. 1. Результаты моделирования.

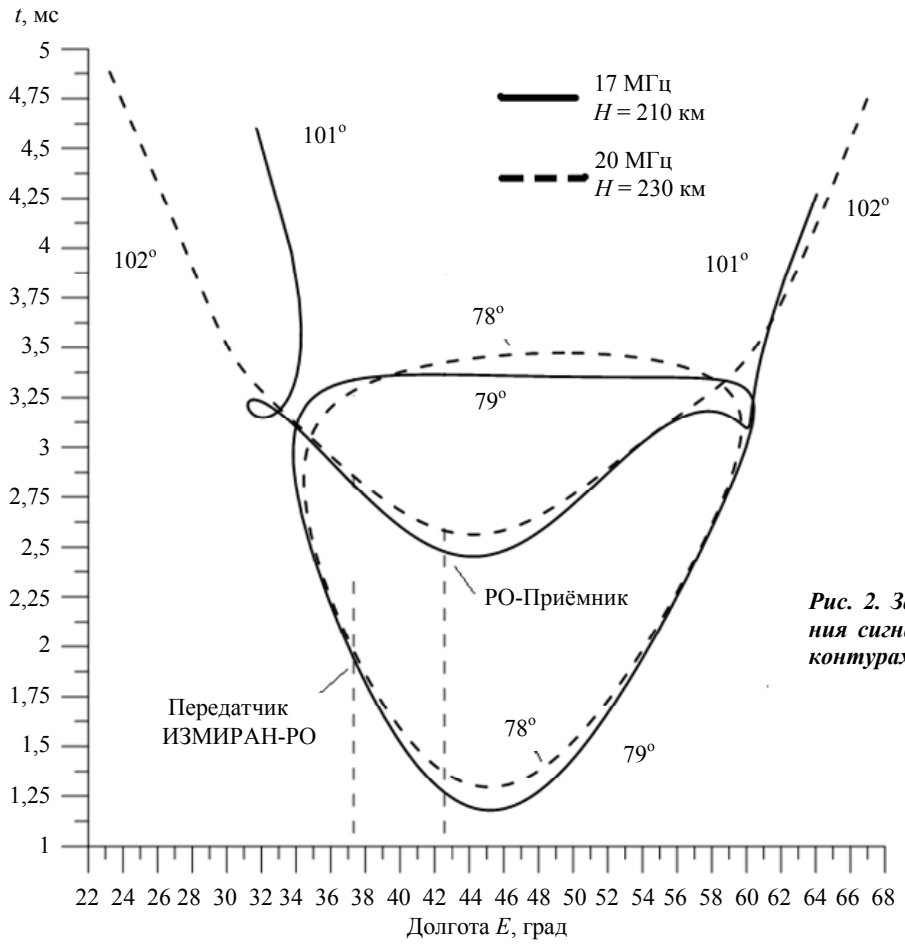

Рис. 2. Зависимость времени распространения сигнала t от положения на ракурсных контурах.

При анализе данного рисунка для определённых пунктов передачи и приёма, расположенных на сопряжённых ракурсных контурах, необходимо суммировать время распространения на двух участках траектории, а именно, «передатчик — область рассеяния» и «область рассеяния — приёмник». В частности, для случая ракурсного рассеяния сигнала с частотой 17 МГц расчётное время распространения на первом участке траектории составило ~ 1,9 мс (сплошная линия 79°), на втором участке — 2,5 мс (сплошная линия 101°). Для радиоволны 20 МГц (пунктирные линии, сопряжённые контуры 78° и 102°) времена распространения на соответствующих участках траектории составляют 2,1 и 2,6 мс.

Таким образом, можно отметить, что суммарное время задержки сигнала для частоты 17 МГц составляет 4,4 мс, а для частоты 20 МГц — 4,7 мс. Реальные значения времени задержки ЛЧМ-радиосигнала составляют ~ 4,41 мс и 4,65 мс для частот 17 и 20 МГц соответственно.

Полученные в результате моделирования ракурсного рассеяния значения времени задержки хорошо согласуются с экспериментальными данными из ионограмм наклонного зондирования ионосферы.

Заключение

Посредством разработанной модели проведено численное моделирование конкретной геометрии рассеяния. Практическая значимость представленной модели заключается в возможности прогнозирования и теоретической интерпретации результатов распространения радиоволн при проведении экспериментов, связанных с исследованием эффекта ракурсного рассеяния радиоволн.

Достоверность результатов, получаемых с использованием модели, подтверждена хорошим согласием с имеющимися экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я.* Волновые явления в ионосфере и космической плазме. — М.: Наука, 1984.

2. *Филипп Н. Д.* Ракурсное рассеяние УКВ среднеширотной ионосферой. — Кишинев: Штиинца, 1980.

3. *Гуревич А. В.* // УФН. 2007. Т. 177. № 11. С. 1145.

4. *Stathacopoulos A. D., Barry G. H.* // Radio Sci. 1974. Vol. 9. No. 11. P. 1021.

5. *Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А.* Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988.

6. *Bilitza D., McKinnell L.-A., Reinisch B., Fuller-Rowell T.* // J. Geodesy, 85:909-920, DOI 10.1007/s00190-010-0427-x, 2011.

7. *McLean S., Macmillan S., Maus S.L. et al.* // NOAA Technical Report NESDIS/NGDC-1. December 2004.
8. *Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И.* Геометрическая оптика неоднородных сред. — М.: Наука, 1980.
9. *Черенкова Е. Л., Чернышев О. В.* Распространение радиоволн. — М.: Радио и связь, 1984.
10. URL: http://www.swpc.noaa.gov/

The technique for a specular scattering of short radio waves from artificial ionospheric irregularities

M. S. Boldyrev[1], N. D. Naumov[1], V. A. Nikolskiy[1], and V. P. Uryadov[2]

[1]12-th Central Research Institute
Sergiev Posad-7, Moscow Region, 141300, Russia
E-mail: boldurevms@mail.ru

[2] Research Radiophysical Institute (NIRFI)
25/12a B. Pecherskaya str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

Received December 16, 2015

In operation the model of calculation of geometry contours of specular scattering on the ground surface, short radio waves of the transmitter characterizing dispersion is presented by the small-scale ionospheric irregularities of an electron concentration, is artificial created in the upper ionosphere as a result of operation heat facility. The model is grounded on the solution of system of the differential equations featuring a beam trajectory of distribution of a radio wave in a non-uniform ionosphere. Comparison of the effects gained settlement by at use of developed model, with the data gained as a result of experimental researches on specular scattering HF radio-waves with the linear frequency modulation, spent on domestic stationary middle-latitude heat facility Sura in September, 09–14th, 2013 is spent.

PACS: 52.40.Db

Keywords: radio wave, specular scattering, ionospheric irregularities, heat facility.

REFERENCES

1. B. N. Gershman, L. M. Erukhimov, and Yu. Ya. Yashin, *Wave Phenomena in Ionosphere and Space Plasma* (Nauka, Moscow, 1984) [in Russian].
2. N. D. Filipp, *Specular Scattering of Ultrashort Waves by the Middle-Latitude Ionosphere* (Shtiintsa, Kishinev, 1980) [in Russian].
3. A. V. Gurevich, Phys. Usp. **177,** 1145 (2007).
4. A. D. Stathacopoulos and G. H. Barry, Radio Sci. **9,** 1021 (1974).
5. B. E. Brunelli and A. A. Namgaladze, *Physics of Ionosphere* (Nauka, Moscow, 1988) [in Russian].
6. D. Bilitza, L.-A. McKinnell, B. Reinisch, and T. Fuller-Rowell, J. Geodesy, 85:909-920, DOI 10.1007/s00190-010-0427-x, (2011).
7. S. McLean, S. Macmillan, S. L. Maus et al., *NOAA Technical Report NESDIS/NGDC-1*. (December 2004).
8. Yu. A. Kravtsov and Yu. I. Orlov, *Geometrical Optics of Inhomogeneous Media* (Nauka, Moscow, 1980) [in Russian].
9. E. L. Cherenkova and O. V. Chernyshev, *Propagation of Radio Waves* (Radio Svyaz', Moscow, 1984) [in Russian].
10. URL: http://www.swpc.noaa.gov/