УДК 519.8

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕВИАЦИЙ ЧАСТОТЫ ДЕКАМЕТРОВОГО РАДИОСИГНАЛА В ИСКУССТВЕННО-ВОЗМУЩЕННОЙ ИОНОСФЕРЕ

¹Агеева Е.Т., ²Афанасьев Н.Т., ¹Ким Д., ¹Михайлов Н.И.

¹ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет», Братск, e-mail: nikita-oxford@mail.ru; ²ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет», Иркутск

В приближении геометрической оптики и метода малого параметра выполнено математическое моделирование статистических характеристик доплеровского смещения частоты декаметрового радиосигнала в ионосфере с искусственным возмущением диэлектрической проницаемости. Нестационарность естественной ионосферы задана нелинейной функцией критической частоты слоя F_2 от времени. Хаотическое движение искусственных случайных неоднородностей учтено в рамках гипотезы о переносе замороженной турбулентности. Рассмотрены модели регулярно-случайного и полностью турбулизованного облака искусственной ионизации. Для данных моделей проведены расчеты средних и среднеквадратичных отклонений доплеровского смещения частоты нижних и Педерсеновских лучей на односкачковых радиотрассах различной прогяженности. Показана определяющая роль вида траектории сигнала и структурных особенностей облака ионизации при формировании девиаций частоты.

Ключевые слова: ионосфера, метод геометрической оптики, частота, доплеровское смещение частоты

THE MATHEMATICAL MODELLING OF FREQUENCY DEVIATION DECAMETER RADIO SIGNAL IN ARTIFICIALLY IONOSPHERIC DISTURBANCES

¹Ageeva E.T., ²Afanasiev N.T., ¹Kim D., ¹Mikhaylov N.I.

¹Bratsk State University, Bratsk, e-mail: nikita-oxford@mail.ru; ²Irkutsk State University, Irkutsk

The mathematical modeling of statistical Doppler decameter radio signal characteristics in the ionosphere with dielectric constant artificial perturbation by approximation of geometric optics and the small parameter method has performed. Nonstationarity natural ionosphere has given a nonlinear critical frequency function of the F2 layer in time. Chaotic motion of artificial random inhomogeneities under the hypothesis of frozen turbulence transfer has performed. Regular – random models and fully turbulized cloud of artificial ionization have reviewed. Average and standard deviation of Doppler frequency numerical calculations by Pedersen and lower beams on the one-hop radio paths of different length for these models have conducted. The defining role of the signal path form and the structural features of the clouds formation by ionization frequency deviation have shown.

Keywords: ionosphere, geometrical optics method, frequency, Doppler frequency shift

В настоящее время околоземное космическое пространство используется в качестве глобальной лаборатории, где изучаются свойства приземной плазмы. С помощью искусственных воздействий на ближний космос можно создавать условия, подобные природным [10]. Искусственная модификация ионосферы способствует изменению ее рефракционных и рассеивающих свойств, в результате чего характеристики распространения ионосферных радиоволн изменяются не только количественно, но и могут приобретать иное качественное содержание. В частности, при определенных местоположениях искусственных облаков ионизации относительно радиотрассы (рис. 1) в пункте приема могут возникать эффекты практически полного ослабления поля, интерференции, фокусировки и дефокусировки [7, 8]. Эти явления, ярко выраженные на фоне процессов, протекающих в неподвижной детерминированной среде, требуют дополнительного анализа. Дело в том, что тонкая турбулентная структура искусственных ионосферных облаков может в значительной мере сгладить резкие границы рассматриваемых явлений вследствие рассеяния радиоволн [3]. Более того, изменения со временем параметров естественной ионосферы и хаотическое движение неоднородностей облаков приводят к доплеровскому смещению рабочей частоты сигнала [4, 5]. Учитывая эти обстоятельства, для более адекватного расчета эффектов искусственных облаков ионизации на рабочих радиотрассах необходимо использовать теорию распространения радиоволн в случайно-неоднородных нестационарных средах [6].

Целью данной работы является математическое моделирование влияния облака искусственной ионосферной ионизации с тонкой турбулентной структурой на девиацию рабочей частоты декаметрового радиосигнала при односкачковом распространении.

Аналитические модели и метод расчета

В качестве детерминированной модели диэлектрической проницаемости ионосферы была выбрана зависимость:

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED AND FUNDAMENTAL RESEARCH № 8, 2015

$$\varepsilon_0(z, x, \tau) = \varepsilon_{is}(z, \tau) + \varepsilon_r(z, x, \tau), \qquad (1)$$

где диэлектрическая проницаемость фоновой ионосферы представлена в виде:

$$\varepsilon_{is}(z,\tau) = 1 - \frac{f_{\kappa p}^2(\tau)}{f^2} \exp\left(-\left(\frac{z-z_m}{h_m}\right)^2\right) - \frac{f_{\kappa pE}^2}{f^2} \exp\left(-\left(\frac{z-z_{mE}}{h_{mE}}\right)^2\right),\tag{2}$$

а диэлектрическая проницаемость детерминированной структуры облака искусственной ионосферной ионизации:

$$\varepsilon_r(z, x, \tau) = -\kappa \frac{f_{\kappa p}^2(\tau)}{f^2} \exp\left(-\left(\frac{z - z_m}{h_m}\right)^2 - \left(\frac{x - x_L}{L}\right)^2\right).$$
(3)

где z_m , $z_{mE'}$, h_m и h_{mE} – высоты максимумов ионизации и толщины слоев F и E; $f_{KP'}$, $f_{KPE'}$, f – критические частоты слоев F и E и рабочая частота, соответственно; L и x_L – горизонтальный размер и координата центра облака искусственной неоднородности относительно источника излучения (рис. 1), κ – интенсивность детерминированного облака.

Для численного расчета среднего $\langle \Delta f \rangle$ и среднеквадратичного отклонения $\sigma_f = \sqrt{\langle \Delta f^2 \rangle}$ доплеровского смещения частоты радиосигнала в искусственно-возмущенной ионосфере использована система уравнений, полученная в приближении гео-

уравнений, полученная в приближении геометрической оптики и метода малых возмущений:

$$\frac{d\langle\Delta f\rangle}{dt} = -\frac{f}{2} \cdot \left\langle\frac{\partial\varepsilon_0}{\partial\tau}\right\rangle,$$
$$\frac{d\sigma_f^2}{dt} = \frac{\sqrt{\pi}f^2 v^2 \cdot N_1}{2a} \frac{\sin^2\beta_0}{c\sqrt{\varepsilon_0}}.$$
(4)

где все функции в правых частях уравнений определены на траектории луча в детерминированной среде, $\langle \rangle$ – знак усреднения, τ – текущее время, β_0 – угол рефракции, c – скорость света; a, v – соответственно, размер и скорость движения случайных неоднородностей; dt – элемент времени группового запаздывания; $N_1 = \gamma^2 (1 - \varepsilon_0)^2 - \text{не-}$ однородная часть функции корреляции, характеризующая случайные неоднородности облака. Расчет траекторий лучей проводился с помощью алгоритма [2]. В качестве модели пространственно-временных флуктуаций диэлектрической проницаемости искусственного облака рассматривалось квазиоднородное поле случайных неоднородностей с функцией корреляции, однородная часть которой задавалась гауссовой зависимостью [6]. Хаотическое движение случайных неоднородностей учитывается в рамках гипотезы о переносе замороженной турбулентности [3]. Интенсивность ү случайных неоднородностей задавалась в виде:

$$\gamma = -\chi \frac{f_{\kappa p}^2}{f^2} \exp\left(-\left(\frac{z - z_m}{h_m}\right)^2 - \left(\frac{x - x_L}{L}\right)^2\right), \quad (5)$$

где χ – относительный параметр флуктуаций диэлектрической проницаемости.

В естественной нестационарной ионосфере с течением времени её параметры могут существенно изменяться. В частности, уменьшение критической частоты ионосферного слоя F приводит к тому, что размер зоны молчания при односкачковом распространении будет возрастать и может стать равным длине скачка между корреспондентами. В этих условиях важно рассмотреть временную зависимость доплеровского смещения частоты нижних и верхних (Педерсеновских) лучей. Нестационарность детерминированной ионосферы задавалась зависимостью от времени τ в виде:

$$f_{\kappa p}(\tau) = f_{\kappa p0} - b\tau^2 \tag{6}$$

где $f_{\kappa p0}$ – критическая частота в начальный момент времени $\tau = 0$, b – коэффициент пропорциональности.

При выполнении расчетов были заданы следующие значения параметров: a = 10 км, $z_{\rm m} = 300$ км, $z_{\rm mE} = 125$ км, $h_{\rm m} = 100$ км, $h_{\rm mE} = 25$ км, L = 500 км, $f_{\rm kp} = 6$ МГц, $f_{\rm kpE} = 3$ МГц, v = 100 м/с.

Динамика траекторных характеристик радиосигнала отслеживалась при изменении рабочей частоты в интервале: f = 10..25 МГц с шагом 5 МГц. При численном моделировании траекторных характеристик радиосигнала, распространяющегося в ионосфере использовался комплекс программ KANAL [1, 9].

671



Рис. 1. Модель облака искусственной ионизации



Рис. 2. Траектории верхних и нижних лучей для различных интенсивностей к и угла выхода β_{μ}

Обсуждение результатов моделирования

Для расчета девиаций частоты радиосигнала необходимо предварительно определить его траектории в искусственно-возмущенной ионосфере. На рис. 2 показаны эти траектории для верхних и нижних лучей, приходящие на дальности $x_k = 1500$ и 3000 км и рассчитанные для различных значений угла выхода $\beta_{\rm H}$ (отсчитывается от вертикали) и параметра к. При этом $f_{\rm kp} = 6,5$ МГц, f = 13 МГц, горизонтальная координата центра искусственного облака $x_L = 500$ км. Угол $\beta_{\rm H}$ выхода луча изменяется в интервале 30° -88° с шагом 1 градус.

Из рис. 2 видно, что при фиксированных значениях критической $f_{\rm kp}$ и рабочей f частот, а также координаты центра x_L облака искусственной ионизации, угол выхода $\beta_{\rm H}$ луча зависит от интенсивности к детерминированной искусственной неоднородности и дальности $x_{\rm k}$ распространения радиосигнала. Так, например, с увеличением κ и x_{ν} уменьшается угол β_{μ} для верхних (Педерсёновских) лучей. В то же время при $x_{\mu} = 1500$ км для нижних лучей с увеличением к происходит рост угла выхода β_{μ} луча, а для $x_{\mu} = 3000$ км – уменьшение β_{μ} и наблюдается значительная асимметрия траектории лучей. Такое поведение траекторий обусловлено влиянием облака искусственной ионизации и дисперсионным свойством диэлектрической проницаемости ионосферы. Вышесказанное находится в соответствии с результатами расчетов зависимости предельного угла выхода β_{np} радиосигнала (такой угол выхода, при котором сигнал ещё отражается от ионосферы) от рабочей частоты *f* и координаты *x*, центра облака искусственной ионизации. Численное моделирование показало, что с ростом рабочей частоты f и координаты x_{L} , угол β_{IP} растет. В частности, при f = 10 МГц, $\kappa = 1^{\circ}$,

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED AND FUNDAMENTAL RESEARCH № 8, 2015 $x_L = 250$ км предельный угол выхода составляет $\beta_{np} = 31^\circ$, а при $x_L = 750$ км – $\beta_{np} = 42^\circ$. При f = 25 МГц, $\kappa = 1$, $x_L = 250$ км предельный угол выхода равен $\beta_{np} = 70^\circ$ и при $x_L = 750$ км – $\beta_{np} = 71^\circ$.

Для исследования девиации доплеровского смещения частоты радиосигнала на фиксированной трассе использовались дистанционно-угловые характеристики, с помощью которых были определены критические частоты ионосферы в начальный и конечный моменты времени. Из графика зависимости дальности распространения x. от угла выхода β, определялся размер зоны молчания. Радиосигнал в ионосфере распространяется по двум траекториям с различными углами выхода; один из которых пологий (нижний), а другой более крутой (верхний – луч Педерсена). Критическая частота ионосферы, при которой длина трассы равна размеру зоны молчания, находится из условия слияния верхних и нижних лучей на дистанционно-угловой характеристике.

На рис. 3. показана зависимость дальности $x_{\rm k}$ распространения радиосигнала в нестационарной фоновой ионосфере от угла выхода $\beta_{\rm H}$ при фиксированной начальной критической частоте. Из рис. З видно, что минимальное расстояние (зона молчания) радиосигнала соответствует минимуму кривой, где сливаются верхний и нижний лучи (при $x_k = 1415$ км, $\beta_{\mu} = 64.1^{\circ}$ и $f_{\kappa p 0} = 6,5$ МГц). В дальнейшем с течением времени критическая частота уменьшается (см. формулу 6), а минимум кривой поднимается. При $x_{\kappa} = 1500$ км (заданное расстоянии между корреспондентами) критическая частота в конечный момент времени соответствует значению $f_{\kappa p} = 6,1$ МГц. Характерный интервал времени изменений ионосферы был положен порядка трех часов.

Анализ доплеровского смещения частоты радиосигнала на фиксированной трассе в присутствии облака искусственной ионизации проводился в два этапа. Вначале рассчитывались возмущенные дистанционно-угловые характеристики с помощью программного комплекса [1, 9], а затем было проведено численное моделирование девиаций частоты на основе уравнений (4). На рис 4, 5 приведены результаты расчетов среднего и среднеквадратичного доплеровского смещения частоты в искусственно-возмущенной ионосфере.



Рис. 3. Зависимость дальности распространения радиосигнала с частотой f = 13 МГц от угла выхода для двух критических частот

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ № 8, 2015



Рис. 4. Зависимость доплеровских характеристик радиосигнала от времени на трассе x_i = 1500 км для различных параметров облака ионизации при χ = 0,1



Рис. 5. Доплеровские характеристики радиосигнала на трассе $x_k = 3000$ км для различных параметров облака ионизации при $\chi = 0, 1$

Нетрудно заметить, что в случае полностью турбулизованного облака искусственной ионизации ($\kappa = 0$) с течением времени (уменьшением критической частоты) среднее значение $\langle \Delta f \rangle$ и среднеквадратичное отклонение σ_f доплеровского смещения частоты для верхних и нижних лучей изменяются нелинейно, причем девиации $\langle \Delta f \rangle$ и σ_f

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED AND FUNDAMENTAL RESEARCH № 8, 2015 для верхних лучей существенно больше, чем для нижних лучей. При увеличении интенсивности χ случайных неоднородностей среднеквадратичное отклонение σ_f увеличивается. Абсолютное значение σ_f зависит от дальности распространения x_k радиосигнала. Например, для верхних лучей при $\tau = 0$ для $x_k = 3000$ км $\sigma_f = 0,15$ Гц (рис. 5, а), а для $x_k = 1500$ км $\sigma_f = 0,11$ Гц (рис. 4, а).

Расчеты показа́ли, что в присутствии облака искусственной ионизации с детерминированной и случайной структурой $(\kappa \neq 0, \ \chi \neq 0)$ наблюдается существенный рост значений $\langle \Delta f \rangle$ и σ_f с увеличением $f_{\kappa p}$ и x_k (рис. 4, 5). Например, для верхних лучей для $x_k = 3000$ км при $\tau = 0$ и $\kappa = 0$, $\sigma_f = 0.15$ Гц (рис. 5, а), то при $\kappa = 1$ $\sigma_f = 0.24$ Гц (рис. 5, б).

Заключение

Выполнено моделирование траекторных характеристик, среднего значения и среднеквадратичного отклонения доплеровского смещения частоты радиосигнала в случайнонеоднородной ионосфере с искусственным возмущением. Для расчета средних и флуктуационных характеристик радиосигнала использована система дифференциальных уравнений, полученная в приближении геометрической оптики и метода возмущений. Численные расчеты показали, что:

1. В присутствии крупномасштабного облака искусственной ионосферной ионизации форма траекторий декаметрового радиосигнала существенно зависит от дальности радиотрассы x_k , и интенсивности детерминированной (к) структуры неоднородности.

2. Среднее значение $\langle \Delta f \rangle$ и среднеквадратичное отклонение σ_f доплеровского смещения частоты нижних и верхних лучей радиосигнала зависят от типа траектории лучей, критической частоты $f_{\rm кр}$, дальности радиотрассы x_k и интенсивностей детерминированной к и случайных χ неоднородностей. При увеличении x_k , к и χ растут σ_f и $\langle \Delta f \rangle$. 3. Предложенный аппарат математического моделирования статистических характеристик девиаций частоты радиосигнала при односкачковом распространении позволяет проводить оперативные оценки влияния крупномасштабных искусственных возмущений приземной плазмы на состояние ионосферных декаметровых радиоканалов

Список литературы

1. Агеева Е.Т. Комплекс программ КАNAL для расчёта характеристик сигнала в информационном канале с возмущенными параметрами / Д.Б. Ким, Е.Т. Агеева, Н.И. Михайлов // Сб. науч. тр./ Братский гос. ун-т. – 2013. – Т. 1. – С. 57–61.

2. Агеева Е.Т. Численно-аналитический алгоритм моделирования флуктуаций траекторных характеристик информационного сигнала в канале связи. / Е.Т. Агеева, Н.Т. Афанасьев, А.В. Багинов, Д.Б. Ким, Н.И. Михайлов // Системы Методы Технологии. – 2012. – № 3(15). – С. 61–66.

3. Барабаненков Ю.Н. Состояние теории распространения волн в случайно-неоднородной среде / Ю.Н. Барабаненков, Ю.А. Кравцов, С.М. Рытов, В.И. Татарский // Успехи физических наук. – 1970. – Т. 102, № 1. – С. 3–42.

4. Вологдин А.Г. Статистика доплеровского смещения частоты радиоволн, отраженных от параболического ионосферного слоя / А.Г. Вологдин, Л.И. Приходько, И.А. Широков // V Всероссийские Армандовские чтения «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». – Муром, 2012. – С. 159–163.

5. Иванов В.П. Исследование нестационарных характеристик и тонкой структуры КВ сигналов вблизи МПЧ / В.П. Иванов, В.Ю. Ким, В.С. Крашенинников, В.А. Панченко, В.П. Полиматиди// Тр. XXI Всерос. конф. по распространению радиоволн. – Йошкар-Ола, 2005. – Т. 2. – С. 83–87.

6. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. – М.: Мир, 1981. – Ч. 2. – 320 с.

7. Лукин Д.С. Применение метода характеристик для решения на ЭВМ задач распространения электромагнитных волн в неоднородных анизотропных средах / Д.С. Лукин, Ю.Г. Спиридонов // Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн. – М.: Наука, 1971. – С. 265.

 Кравцов Ю.А., Орлов Ю.Г. Геометрическая оптика неоднородных сред. – М.: Наука, 1980. – 304 с.

9. Программа для расчёта характеристик сигнала в информационном канале с возмущёнными параметрами (KANAL 1.13): а.с. 2013660637 / Е.Т. Агеева, А.В. Багинов, Н.И. Михайлов, Де Чан Ким. – заявл. 1.08.2013; опубл. 13.11.2013.

10. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. Распространение радиоволн. – М.: Ленанд, 2009. – 496 с.