

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ТРАЕКТОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕКАМЕТРОВОГО РАДИОСИГНАЛА ПРИ НАКЛОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ

¹С.О. Чудаев, ²Н.Т. Афанасьев

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
ch45st@gmail.com

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

MODELLING THE FLUCTUATIONS OF TRAJECTORY CHARACTERISTICS OF A DECAMETRIC RADIO SIGNAL DURING OBLIQUE IONOSPHERIC SOUNDING

¹S.O Chudaev, ²N.T. Afanasiev

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
ch45st@gmail.com

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Аннотация. Для интерпретации данных частотно-углового зондирования ионосферы предложен аппарат математического моделирования флуктуационных характеристик декаметрового радиосигнала при односкачковом распространении с учетом граничных условий в пункте наблюдения. Получена система дифференциальных уравнений для численного расчета статистических моментов вертикального угла прихода и доплеровского смещения частоты радиосигнала на различных частотах зондирования. Приведены примеры реализации предложенного аппарата для оценки частотной зависимости среднеквадратичного отклонения доплеровского смещения частоты декаметрового радиосигнала, отраженного от двухслойной ионосферы с крупномасштабным облаком интенсивных хаотических неоднородностей электронной плотности.

Ключевые слова: ионозонд, ионосфера, флуктуации, неоднородности, радиосигнал, корреляция, трасса.

Abstract. To interpret the data of the frequency-angular sounding of the ionosphere, an instrument has been suggested for mathematical modelling of the fluctuation characteristics of a decameter radio signal with single-probe propagation with the boundary conditions at the observation point. A system of differential equations is obtained for both Doppler shift of the radio signal frequency and the numerical calculation of the statistical moments of the arrival's vertical angle at different probing frequencies. The examples of realization are given for proposed instrument for estimating the frequency dependence of the root-mean-square deviation of the Doppler frequency shift of a decameter radio signal reflected from a bilayer ionosphere with a large-scale cloud of intense chaotic electron density irregularities.

Keywords: ionosonde, ionosphere, fluctuations, irregularities, radio signal, correlation, track.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно [Гершман и др., 1984], флуктуации декаметровых радиосигналов, отраженных от ионосферы, несут в себе информацию о тонкой структуре околосредней плазмы. При планировании экспериментов на трассах наклонного зондирования для восстановления ионосферных неоднородностей по флуктуациям радиосигналов необходимы предварительные теоретические оценки этих флуктуаций на различных рабочих частотах. Одним из вариантов расчета воздействий хаотических неоднородностей на характеристики радиосигналов является имитационное моделирование, основанное на методе Монте-Карло [Ермаков, 1975]. Однако на пути использования метода статистических испытаний для расчета ожидаемых флуктуаций декаметровых радиосигналов на фиксированной трассе возникает большая проблема, связанная с решением стохастической краевой задачи электродинамики. Для каждой реализации пространственно-временного распределения неоднородностей среды необходимо выполнение граничного условия для характеристик поля в пункте наблюдения радиосигналов. Последнее не только требует больших вычислительных ресурсов для проведения расчетов, но и может сопровождаться потерей устойчивости самой схемы

расчета. Другим вариантом расчета флуктуаций радиосигнала является применение приближенных аналитических методов теории случайных полей [Кляцкин, 2008], использующих физические представления о корреляционных свойствах тонкой структуры ионосферы.

В докладе на основе лучевого приближения и метода малого параметра предложен аппарат математического моделирования статистических траекторных характеристик декаметрового радиосигнала для интерпретации данных многочастотного доплеровского и углового зондирования ионосферы.

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ

Для расчета частотных зависимостей угловых и доплеровских флуктуаций радиосигнала на трассе наклонного зондирования ионосферы использовалась система стохастических дифференциальных уравнений [Кляцкин, 2008]:

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= c\sqrt{\varepsilon} \cos \beta, & \frac{dx}{dt} &= c\sqrt{\varepsilon} \sin \beta, \\ \frac{d\beta}{dt} &= c \frac{\partial \sqrt{\varepsilon}}{\partial x} \cos \beta - c \frac{\partial \sqrt{\varepsilon}}{\partial z} \sin \beta, & \frac{d\Delta f}{dt} &= -\frac{f}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где x, z — переменные, характеризующие траекторию луча, f — частота зондирования, Δf — доплеровский сдвиг частоты, dt — элемент времени группового запаздывания, β — текущий угол отклонения луча от вертикали, $\varepsilon(x, z, f, \tau)$ — случайная функция, описывающая диэлектрическую проницаемость ионосферы, τ — время, c — скорость света.

Система уравнений (1) была решена методом малого параметра. Диэлектрическая проницаемость ионосферы представлялась в виде суммы невозмущенной регулярной составляющей ε_0 и случайного воздействия ε_1 , при условии $|\varepsilon_1| \ll \varepsilon_0$. Решение системы уравнений (1) определялось в виде: $z=z_0+z_1$, $x=x_0+x_1$, $\beta=\beta_0+\beta_1$, $\Delta f=\Delta f_0+\delta f$, где $z_0, x_0, \beta_0, \Delta f_0$ — характеристики невозмущенного сигнала; $z_1, x_1, \beta_1, \delta f$ — малые флуктуации этих характеристик. В первом приближении метода возмущений на основе (1) была получена система дифференциальных уравнений для расчета частотных зависимостей флуктуаций вертикального угла прихода и доплеровского смещения частоты декаметрового радиосигнала на односторонней трассе:

$$\frac{dz_0}{dt} = c\sqrt{\varepsilon_0} \cos \beta_0, \quad \frac{dx_0}{dt} = c\sqrt{\varepsilon_0} \sin \beta_0, \quad \frac{d\beta_0}{dt} = -c \frac{\partial \sqrt{\varepsilon_0}}{\partial z} \sin \beta_0, \quad \frac{d\Delta f_0}{dt} = -\frac{f}{2} \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial \tau} \quad (2)$$

$$\frac{dz_1}{dt} = -c\sqrt{\varepsilon_0} \beta_1 \sin \beta_0 + c \cos \beta_0 \frac{1}{2\sqrt{\varepsilon_0}} \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial z_0} z_1 + c \cos \beta_0 \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_1}{\sqrt{\varepsilon_0}}, \quad \frac{d\delta f}{dt} = -\frac{f}{2} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \tau} \quad (3)$$

$$\frac{dx_1}{dt} = c\sqrt{\varepsilon_0} \beta_1 \cos \beta_0 + c \sin \beta_0 \frac{1}{2\sqrt{\varepsilon_0}} \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial z_0} z_1 + c \sin \beta_0 \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_1}{\sqrt{\varepsilon_0}} \quad (4)$$

$$\frac{d\beta_1}{dt} = -c \frac{\partial \sqrt{\varepsilon_0}}{\partial z_0} \beta_1 \cos \beta_0 - c \sin \beta_0 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2\sqrt{\varepsilon_0}} \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial z_0} \right) z_1 - c \sin \beta_0 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2} \frac{\varepsilon_1}{\sqrt{\varepsilon_0}} \right) + c \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \frac{\varepsilon_1}{\sqrt{\varepsilon_0}} \right) \cos \beta_0. \quad (5)$$

Система уравнений (2)–(5) была решена с крайними условиями: $\Delta f_0(0)=\delta f(0)=0$, $z_0(0, f)=z_0(t_k, f)=0$, $x_0(0, f)=0$, $x_0(t_k, f)=x_k$, $z_1(0, f)=z_1(0, f)=x_1(t_k, f)=0$. где: t_k — групповая задержка радиосигнала в пункте приема x_k . В предположении квазиоднородного случайного поля неоднородностей ионосферы и в рамках гипотезы о переносе замороженной турбулентности [Гершман и др., 1984], были получены интегральные формулы для дисперсий и функции взаимной корреляции вертикального угла прихода и

доплеровского сдвига частоты радиосигнала. Интегральные формулы для статистических моментов были преобразованы к обыкновенным дифференциальным уравнениям первого порядка. Совместное решение этих уравнений с расширенной системой невозмущенных лучевых уравнений (система (1) при $\varepsilon=\varepsilon_0$), позволяет рассчитать средние и флуктуационные характеристики радиосигнала на различных рабочих частотах. В частном случае слоистых стратифицированных неоднородностей диэлектрической проницаемости с гауссовой функцией корреляции, система имеет простой вид:

$$\begin{aligned} \frac{dz_0}{dt} &= c\sqrt{\varepsilon_0} \cos \beta_0, \quad \frac{dx_0}{dt} = c\sqrt{\varepsilon_0} \sin \beta_0, \\ \frac{d\beta_0}{dt} &= -c \frac{\partial \sqrt{\varepsilon_0}}{\partial z} \sin \beta_0, \quad \frac{d\Delta f_0}{dt} = -\frac{f}{2} \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial \tau}, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial z_0}{\partial \beta_n} \right) &= \frac{\partial}{\partial \beta_n} \left(c\sqrt{\varepsilon_0} \cos \beta_0 \right), \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_0}{\partial \beta_n} \right) &= \frac{\partial}{\partial \beta_n} \left(-\frac{c \sin \beta_0}{2\sqrt{\varepsilon_0}(z_0)} \frac{\partial \varepsilon_0(z_0)}{\partial z_0} \right), \\ \frac{dD_\beta}{dt} &= \frac{N_1}{a\sqrt{\varepsilon_0^3}} \left(\frac{\partial z_0}{\partial \beta_n} \right)^2, \quad \frac{dD_f}{dt} = \frac{v^2 N_1 \sin^2 \beta_0}{ac\sqrt{\varepsilon_0}}, \\ \frac{dD_{\beta f}}{dt} &= \frac{v N_1}{a\sqrt{\varepsilon_0^3}} \frac{\partial z_0}{\partial \beta_n}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $D_\beta = \frac{2}{\sqrt{\pi c}} \sigma_\beta^2 \left(\frac{\partial z_0}{\partial \beta_n}(t_k) \right)^2$, $D_f = \frac{2\sigma_f^2}{f^2 \sqrt{\pi}}$,

$D_{\beta f} = \frac{2}{\sqrt{\pi f \sin \beta_n}} \frac{\partial z_0}{\partial \beta_n}(t_k) \Gamma_{\beta f}$, $\sigma_\beta^2, \sigma_f^2$ — дисперсии

вертикального угла прихода и доплеровского сдвига частоты радиосигнала, $\Gamma_{\beta f}$ — функция взаимной корреляции угловых и доплеровских флуктуаций, N_1 — характеризует пространственные изменения интенсивности неоднородностей диэлектрической проницаемости ионосферы, a — радиус пространственной корреляции случайных неоднородностей, β_n — начальный угол падения луча на ионосферу, v — скорость движения случайного поля неоднородностей.

Заметим, что решения невозмущенных лучевых уравнений, входящих в систему (6), находятся путем пристрелки траекторий в пункт наблюдения для каждой рабочей частоты зондирования. Все другие уравнения этой системы решаются с начальными условиями. Таким образом, решение краевой стохастической траекторной задачи для интерпретации данных многочастотного доплеровского и углового зондирования ионосферы существенно упрощается.

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ ПОЛУЧЕННЫХ ФОРМУЛ

В качестве примера для демонстрации работы предложенного аппарата моделирования, на рис.1 приведены результаты расчетов на основе системы (6) частотной зависимости среднеквадратичных от-

клонений доплеровского смещения частоты нижних и верхних (Педерсеновских) лучей при наклонном декаметровом зондировании двухслойной ионосферы с крупномасштабным облаком интенсивных хаотических неоднородностей электронной плотности. Рассмотрены рабочие частоты, близкие к максимально применимой частоте (МПЧ) односкачковой радиотрассы. Регулярная модель диэлектрической проницаемости ионосферы представлялась зависимостью:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{f_{крE}^2}{f^2} \exp\left(-\left(\frac{z - z_{mE}}{h_{mE}}\right)^2\right) - \frac{f_{кр}^2}{f^2} \exp\left(-\left(\frac{z - z_m}{h_m}\right)^2\right) \quad (7)$$

где: $z_m, z_{mE}, h_m, h_{mE}, f_{кр}, f_{крE}$ — высоты максимумов, полутолщины и критические частоты слоев F и E , соответственно; f — рабочая частота.

Модель облака хаотических неоднородностей была задана в виде:

$$N_1 = \chi \frac{f_{кр}^2}{f^2} \exp\left(-\left(\frac{z - z_m}{h_m}\right)^2 - \left(\frac{x - x_L}{L}\right)^2\right) \quad (8)$$

где: L, χ, x_L — размер, интенсивность и координата центра облака, соответственно.

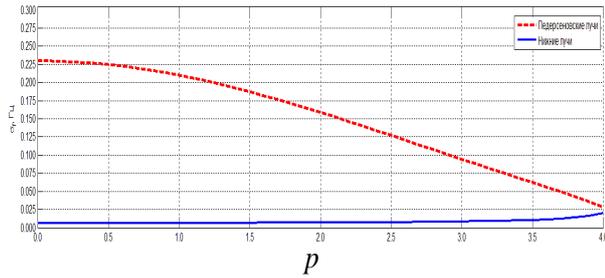


Рис. Среднеквадратичное смещение доплеровского сдвига частоты радиосигнала на различных частотах зондирования $f(p)f_0+bp^2$, $b=0.025$, $f_0=13$ МГц, $z_m=300$ км, $z_{mE}=125$ км, $h_m=100$ км, $h_{mE}=25$ км, $f_{кр}=6$ МГц, $f_{крE}=3$ МГц, $L=500$ км, $\chi=0.1$, $x_L=500$ км, $a=10$ км, $v=100$ м/с, $x_k=1500$ км

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получена система дифференциальных уравнений для численного расчета среднеквадратичных отклонений и функции взаимной корреляции вертикального угла прихода и доплеровского смещения частоты декаметрового радиосигнала на трассе наклонного зондирования. В качестве модели хаотических ионосферных неоднородностей использована эффективная модель пространственно-временного корреляционного эллипсоида, характеризующего квазиоднородное по пространству и по времени поле неоднородностей. Движение хаотических неоднородностей учтено в рамках гипотезы о переносе замороженной турбулентности. Предложенный аппарат математического моделирования позволяет проводить количественные оценки статистических характеристик декаметровых радиосигналов при многочастотном угловом и доплеровском зондировании ионосферы на односкачковых трассах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.А. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука, 1984. 392 с.
- Ермаков С.М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. М.: Физматлит, 1975. 472 с.
- Кляцкин В.И. Стохастические уравнения: теория и ее приложения к акустике, гидродинамике и радиофизике. М.: Физматлит, 2008. Т. 1. 317 с.