

## Декаметровая радиодиагностика тонкой структуры ионосферы с высокоорбитальных ИСЗ

Н. Т. Афанасьев<sup>1</sup>, Д. С. Лукьянцев<sup>1</sup>, А. Б. Танаев<sup>1</sup>, С. О. Чудаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет, Иркутск, 664003, Россия  
E-mail: spacemaklay@gmail.com

<sup>2</sup> Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия

Для восстановления тонкой структуры ионосферы по данным многочастотного радиопросвечивания с борта высокоорбитального искусственного спутника Земли получена система интегральных соотношений для вторых статистических моментов групповых и фазовых задержек декаметровых радиосигналов. Расчёт статистических моментов выполнен в приближении геометрической оптики с использованием математического аппарата теории возмущений. В соотношениях учтены сильные вариации траекторий между пунктами приёма и излучения. Для решения обратной задачи рассмотрена обобщённая модель тонкой структуры ионосферы в виде корреляционного эллипсоида неоднородностей с эффективными параметрами. Модель согласована с изменениями средней ионосферы, заданной составным гауссово-экспоненциальным высотным профилем диэлектрической проницаемости и учитывает возможную пространственную локализацию поля случайных неоднородностей. Система интегральных соотношений решена относительно неизвестных параметров корреляционного эллипсоида. Для восстановления эллипсоида вычислены интегральные коэффициенты, выраженные через фундаментальные решения и средние лучевые траектории двухточечной траекторной задачи для различных рабочих частот просвечивания. Расчёт средних траекторий проводится методом пристрелки в пункт приёма для каждой рабочей частоты. Пространственная динамика параметров тонкой структуры ионосферы определяется с помощью данных измерений статистических моментов групповых и фазовых задержек спутниковых декаметровых радиосигналов, принимаемых на сети приёмников, расположенных на земной поверхности.

**Ключевые слова:** диагностика, декаметровый диапазон, ионосфера, многочастотное радиопросвечивание, сигналы, флуктуации, неоднородности, космические аппараты

Одобрена к печати: 29.06.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-299-307

### Введение

Как известно, флуктуации характеристик спутниковых радиосигналов, прошедших через ионосферу, содержат информацию о случайных неоднородностях электронной плотности (Гершман и др., 1984). Особенно чувствительными к воздействию неоднородностей становятся сигналы на рабочих частотах вблизи порога радиопрозрачности ионосферы (Данилкин, 1985). Перспективным в этом направлении представляется метод, основанный на многочастотном просвечивании ионосферы сигналами декаметрового диапазона с борта геостационарного или высокоапогейного искусственного спутника Земли (ИСЗ) (Гивишвили, 1994, 2016; Гивишвили и др., 2016). Развитие теоретических вопросов метода декаметрового просвечивания ионосферы с высокоорбитальных ИСЗ для повышения его информативности и оперативности представляется важным.

Расчёт статистических характеристик сигналов при просвечивании среды возможен с помощью имитационного моделирования, основанного на методе Монте-Карло. Однако использование метода статистических испытаний требует решения краевой задачи электродинамики в диапазоне рабочих частот для каждой реализации случайной функции диэлектрической проницаемости. Последнее требует больших вычислительных ресурсов для проведения расчётов. Более того, метод Монте-Карло не позволяет установить функциональные связи между статистическими характеристиками сигнала и параметрами ионосферных неоднородностей, что затрудняет решение обратной задачи. Оптимальным вариантом решения обратной

задачи радиопросвечивания ионосферы представляется применение математического аппарата аналитических методов теории случайных полей (Гершман и др., 1984). Для расчёта статистических характеристик сигналов просвечивания в работе использовано лучевое приближение и аппарат теории возмущений (Kravtsov, Orlov, 1990).

### Исходные аналитические соотношения

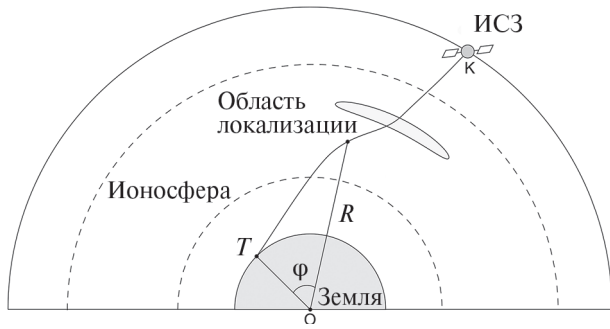


Схема радиопросвечивания ионосферы

Для решения обратной задачи радиопросвечивания случайно-неоднородной ионосферы необходимы функциональные соотношения, связывающие статистические моменты характеристик принятых сигналов и параметры тонкой структуры среды. В качестве исходных рассмотрим геометрические выражения для групповых и фазовых задержек сигналов просвечивания ионосферы с борта высокоорбитального ИСЗ (Kravtsov, Orlov, 1990):

$$\tau(f) = \frac{1}{c} \int^S \frac{dS(f)}{\sqrt{\varepsilon(R, \varphi, \theta, f)}}, \quad (1)$$

$$\delta(f) = \frac{2\pi f}{c} \int^S \sqrt{\varepsilon(R, \varphi, \theta, f)} \cdot dS(f), \quad (2)$$

где интегрирование проводится по траекториям, соединяющим пункты приёма и излучения (рисунок);  $\varepsilon(R, \varphi, \theta, f)$  — случайная функция диэлектрической проницаемости изотропной ионосферы;  $R, \varphi, \theta$  — текущие сферические координаты луча;

$$dS(f) = dR \sqrt{1 + \left( \frac{R(f)d\varphi}{dR} \right)^2 + \left( \frac{R(f)d\theta}{dR} \right)^2}$$

— элемент дуги траектории;  $f$  — рабочая частота;  $c$  — скорость света. Траекторию луча для каждой рабочей частоты  $f$  будем определять, решая краевую задачу для системы стохастических дифференциальных уравнений с независимой переменной элемента угловой дальности  $d\varphi$  (Kravtsov, Orlov, 1990):

$$\left. \begin{aligned} \frac{dR}{d\varphi} &= R \cot \beta, \\ \frac{d\alpha}{d\varphi} &= (1 + \cos^2 \alpha \cdot \cot^2 \beta) \frac{1}{2\varepsilon} \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta} - \tan \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi} \right), \\ \frac{d\theta}{d\varphi} &= \tan \alpha, \\ \frac{d\beta}{d\varphi} &= (1 + \sin^2 \beta \cdot \tan^2 \alpha) \cdot \left( \frac{1}{2\varepsilon} \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi} \cot \beta - R \frac{\partial \varepsilon}{\partial R} \right) - 1 \right), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\beta, \alpha$  — угол рефракции луча соответственно в плоскости падения и в нормальной к ней плоскости, который образуется проекцией траектории луча на эту плоскость.

## Статистические моменты групповых и фазовых задержек декаметровых радиосигналов при многочастотном просвечивании ионосферы

Флуктуации групповой и фазовой задержек сигнала просвечивания найдём в первом приближении метода возмущений (Гершман и др., 1984). Для функции  $\varepsilon(R, \varphi, \theta, f)$ , входящей в уравнения (1)–(3), используем разложение  $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1$ , где  $\varepsilon_0(R, \varphi, \theta, f)$  — средняя составляющая диэлектрической проницаемости; случайная функция  $\varepsilon_1(R, \varphi, \theta, f)$  характеризует тонкую структуру ионосферы. Будем полагать, что  $|\varepsilon_1| \ll \varepsilon_0$ ,  $|\partial\varepsilon_0/\partial\varphi| \ll |\partial\varepsilon_1/\partial\varphi|$ ,  $|\partial\varepsilon_0/\partial\theta| \ll |\partial\varepsilon_1/\partial\theta|$ . Траекторные характеристики сигнала определим в виде разложений:  $R = R_0 + R_1$ ,  $\theta = \theta_0 + \theta_1$ ,  $\tau = \tau_0 + \Delta\tau$ ,  $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$ ,  $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1$ ,  $\beta = \beta_0 + \beta_1$ . В дальнейшем будем полагать, что средняя траектория луча  $R_0(\varphi, f)$  лежит в плоскости дуги большого круга, когда  $\alpha_0 = 0$ ,  $\theta_0 = 0$  (см. рисунок).

Подставляя эти разложения в формулы (1)–(3), проводя линеаризацию и учитывая крайние условия в пунктах излучения и приёма, получаем интегралы для средних и флуктуационных составляющих групповых и фазовых задержек сигналов на различных рабочих частотах:

$$\tau_0(f) = \frac{1}{c} \int_0^{\varphi_k} \frac{R_0 d\varphi}{\sqrt{\varepsilon_0} \sin \beta_0}, \quad (4)$$

$$\delta_0(f) = \frac{2\pi f}{c} \int_0^{\varphi_k} \sqrt{\varepsilon_0} \frac{R_0 d\varphi}{\sin \beta_0}, \quad (5)$$

$$\Delta\tau(f) = \frac{1}{c} \int_0^{\varphi_k} \left[ \frac{2 \sin \beta_0}{\sqrt{\varepsilon_0}} R_1(\varphi, f) \left( 1 + \frac{d\beta_0}{d\varphi} \right) - \frac{R_0}{2 \sin \beta_0} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0 \sqrt{\varepsilon_0}} \right] d\varphi, \quad (6)$$

$$\Delta\delta(f) = \frac{\pi f}{c} \int_0^{\varphi_k} \frac{\varepsilon_1 R_0}{\sqrt{\varepsilon_0} \sin \beta_0} d\varphi, \quad (7)$$

где интегрирование проводится по средней траектории  $R_0(\varphi, f)$ .

Отметим, что в формуле (7) при расчётах флуктуаций фазы в первом приближении метода возмущений отсутствуют вариации траектории. Между тем, при вычислении флуктуации групповой задержки в уравнение (6) входит текущая вариация траектории  $R_1(\varphi, f)$ , которая становится решением стохастической краевой задачи и удовлетворяет граничным условиям:

$$R_1(0, A, f) = R_1(\varphi_k, R_k, f) = 0, \quad (8)$$

где  $\varphi_k, R_k$  — координаты ИСЗ;  $A$  — радиус Земли. На высоких частотах эта вариация несущественна, и формула (6) переходит в известное решение (Гершман и др., 1984):

$$\Delta\tau(f) = -\frac{1}{c} \int_0^{\varphi_k} \frac{R_0}{2 \sin \beta_0} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0 \sqrt{\varepsilon_0}} d\varphi. \quad (9)$$

Для радиоволн декаметрового диапазона вариации траектории могут быть значительными и их необходимо принимать во внимание. Решая систему уравнений (3) методом возмущений, для текущей вариации траектории  $R_1(\varphi, f)$  с учётом граничных условий (8) имеем:

$$R_1(\varphi, f) = -\frac{1}{Y_1(\varphi_k)} \left[ Y_1(\varphi) \int_{\varphi}^{\varphi_k} D_1 Y_2 \frac{R_k}{R_0} d\varphi + Y_2(\varphi) \int_0^{\varphi} D_1 Y_1 \frac{R_k}{R_0} d\varphi \right], \quad (10)$$

где  $Y_1 = \frac{\partial R_0}{\partial \beta_H}(\varphi, f)$ ,  $Y_2 = \frac{\partial R_0}{\partial \beta_H}(\varphi_k - \varphi, f)$  — фундаментальные решения краевой задачи просвечивания для каждой рабочей частоты;  $D_1(f) = \frac{1}{2} \left[ \cot \beta_0 \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} \right) - R_0 \frac{\partial}{\partial R_0} \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} \right) \right]$ ;  $\beta_H(f)$  — начальный угол падения радиоволны из источника на ионосферу.

Подставляя формулу (10) в уравнение (6) и проводя аналитические преобразования, для флуктуации групповой задержки сигнала получаем:

$$\Delta\tau(f) = \frac{1}{c} \int_0^{\varphi_k} \left[ D_1(\varphi) F(\varphi) - \frac{R_0 \varepsilon_1}{2 \sin \beta_0 \cdot \varepsilon_0 \sqrt{\varepsilon_0}} \right] d\varphi, \quad (11)$$

где 
$$F(\varphi) = -\frac{R_k}{Y_1(\varphi_k) R_0(\varphi)} \left[ Y_2(\varphi) \int_0^{\varphi} \Gamma_1(\varphi') d\varphi' + Y_1(\varphi) \int_{\varphi}^{\varphi_k} \Gamma_2(\varphi') d\varphi' \right], \quad \Gamma_1 = Y_1 F_1, \quad \Gamma_2 = Y_2 F_1,$$

$$F_1 = \frac{2 \sin \beta_0}{c \sqrt{\varepsilon_0}} \left( 1 + \frac{d\beta_0}{d\varphi} \right).$$

Интегрирование в формуле (11), как и в формуле (9), проводится по средней траектории  $R_0(\varphi, f)$ , являющейся решением системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dR_0}{d\varphi} = R_0 \cot \beta_0, \\ \frac{d\beta_0}{d\varphi} = -\frac{R_0}{2\varepsilon_0} \cdot \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial R_0} - 1. \end{cases} \quad (12)$$

На основе соотношений (4), (5), (7), (11) получим выражения для дисперсий фазовых и групповых задержек сигналов многочастотного радиопросвечивания ионосферы. Для построения моментов необходимо задать модель корреляционной функции или спектра ионосферных неоднородностей. Хорошо известно (Гершман и др., 1984), что ионосфера представляется многомасштабной случайно-неоднородной средой и характеризуется степенным спектром неоднородностей. Между тем, для решения ряда практических задач важно знать динамику интегрального состояния случайной изменчивости ионосферы. Поэтому для восстановления интегральных свойств тонкой структуры ионосферы будем использовать модель обобщённого корреляционного эллипсоида неоднородностей с эффективными параметрами (Алимов и др., 1997; Афанасьев и др., 2009; Вологдин и др., 2007; Гусев, Овчинникова, 1980; Afanasiev et al., 2010). Функцию корреляции флуктуаций диэлектрической проницаемости ионосферы представим в виде (Гершман и др., 1984):

$$N = \langle \varepsilon_1(R_1, \varphi_1, \theta_1) \cdot \varepsilon_1(R_2, \varphi_2, \theta_2) \rangle = N_1 N_0, \quad (13)$$

где  $N_0$  — гауссова однородная часть корреляционной функции с масштабом  $a$ ; функция  $N_1$  характеризует статистическую неоднородность случайного поля неоднородностей и самосогласована с пространственной изменчивостью средней ионосферы. В качестве эффективного масштаба пространственной корреляционной функции флуктуаций диэлектрической проницаемости будем рассматривать размер неоднородностей, превосходящий радиус первой зоны Френеля. В случае радиопросвечивания ионосферы с орбиты геостационарного ИСЗ радиус френелевской зоны на некоторой заданной высоте можно оценить из соотношения (Kravtsov, Orlov, 1990):

$$a_{\Phi} = \sqrt{\frac{\lambda P_1 P_2}{P_1 + P_2}},$$

где  $\lambda$  — длина волны;  $P_1, P_2$  — расстояние от высоты рассматриваемого сечения до ИСЗ и до пункта наблюдения на поверхности Земли соответственно. В частности, на высотах максимума ионосферной ионизации ( $P_2 \approx 300$  км) для радиоволн декаметрового диапазона ( $\lambda \approx 10-30$  м) радиус первой зоны Френеля сигналов, излучённых с орбиты ИСЗ ( $P_1 \approx 35\,700$  км), составляет  $a_{\Phi} \approx 1,5-3$  км.

Полагая, что функция  $N_1$  изменяется медленнее, чем  $N_0$ , зададим её в виде:

$$N_1 = \mu^2 \exp \left( -\left( \frac{x - x_L}{H} \right)^2 \right) (1 - \varepsilon_0)^2, \quad (14)$$

где  $\mu^2$  — интенсивность случайных неоднородностей электронной концентрации ионосферы;  $H, x_L$  — горизонтальный масштаб локализации и координата центра области с неоднородностями. Проводя в формулах (7), (11) замену переменных:  $dx = A \cdot d\varphi$ ,  $z_0 = R_0 - A$  — и возводя их в квадрат, после усреднения по всем реализациям случайной изменчивости ионосферы с учетом формул (13), (14) и аналитических преобразований для дисперсий фазовой и групповой задержек сигналов на различных рабочих частотах получаем:

$$\sigma_{\delta}^2(f) = \frac{\pi^2 f^2}{c^2} \int_0^{x_k} \frac{(1 + z_0/A)^2 a \mu^2 E \sqrt{\pi} (1 - \epsilon_0)^2}{\epsilon_0 \sin \beta_0} dx, \quad (15)$$

$$\sigma_{\Delta\tau}^2(f) = \frac{1}{2c^2} \int_0^{x_k} \left[ \Phi^2(x) \frac{\mu^2 E \sqrt{\pi} (1 - \epsilon_0)^2}{a \epsilon_0^2} \left(1 + \frac{z_k}{A}\right)^2 S(x) + \frac{a \mu^2 E \sqrt{\pi} (1 - \epsilon_0)^2}{2 \epsilon_0^3 \sin \beta_0} \left(1 + \frac{z_0}{A}\right)^2 \right] dx, \quad (16)$$

где

$$\Phi(x) = -\frac{Y_2(x)}{Y_1(x_k)} \int_0^x Y_1(x') \frac{\sin \beta_0}{\epsilon_0 \sqrt{\epsilon_0}} \cdot \frac{\partial \epsilon_0}{\partial z_0} \left(1 + \frac{z_0}{A}\right) dx' - \frac{Y_1(x)}{Y_1(x_k)} \int_x^{x_k} Y_2(x') \frac{\sin \beta_0}{\epsilon_0 \sqrt{\epsilon_0}} \cdot \frac{\partial \epsilon_0}{\partial z_0} \left(1 + \frac{z_0}{A}\right) dx',$$

$$S(x) = \sin \beta_0 \left[ \cot^2 \beta_0 + \left(1 + \frac{z_0}{A}\right)^2 \right], \quad E = \exp \left[ -\left(\frac{x - x_L}{H}\right)^2 \right].$$

Для расчётов статистических характеристик сигналов в задаче просвечивания ионосферы с высокоорбитальных ИСЗ в формулах (15), (16) целесообразно использовать составной гауссово-экспоненциальный высотный профиль, обеспечивающий непрерывность и дифференцируемость функции диэлектрической проницаемости:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_0(z_0) &= 1 - \frac{f_{кр}^2}{f^2} \exp \left[ -\left(\frac{z_0 - z_m}{y_m}\right)^2 \right] && \text{при } z_0 \leq z_v, \\ \epsilon_0(z_0) &= 1 - \frac{f_{кр_v}^2}{f^2} \exp \left[ -\frac{z_0 - z_v}{y_v} \right] && \text{при } z_0 \geq z_v, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где  $f_{кр_v}^2 = f_{кр}^2 \exp \left[ -\frac{y_m^2}{4y_v^2} \right]$ ,  $z_v = z_m + \frac{y_m^2}{2y_v}$ ;  $z_m, y_m, f_{кр}$  — высота максимума ионизации, полутолщина и критическая частота нижней ионосферы;  $y_v$  — характерный масштаб верхней ионосферы; параметр  $f_{кр_v}$  характеризует критическую частоту на уровне  $z_v$  — высоте перехода внутренней ионосферы во внешнюю. Параметры  $f_{кр_v}, z_v$  определяются из условий равенства составных функций диэлектрической проницаемости и их высотных градиентов в точке  $z_v$ . Также возможно применение современных глобальных моделей ионосферы в виде дискретных данных с использованием сплайн-интерполяции для обеспечения непрерывности производных первого и второго порядка.

### Диагностика тонкой структуры ионосферы

При радиопросвечивании ионосферы с высокоорбитальных ИСЗ применяют различные виды сигналов (Гивишвили и др., 2016). В простейшем варианте используются гладкие узкополосные импульсные сигналы. В другом случае применяют широкополосные сложные сигналы с различными видами модуляции, что позволяет существенно уменьшить мощность источника излучения. Необходимо отметить, что при распространении радиоволн в ионосфере наземный пункт наблюдения и слой с неоднородностями разделены областью свободного пространства. Для определения параметров ионосферных неоднородностей в условиях реального эксперимента прежде всего требуется восстановить статистические характеристики

сигнала на выходе из ионосферы из данных наземных измерений временных флуктуаций амплитудных и фазовых характеристик принятого трансionoсферного сигнала. Как известно (Алимов и др., 1997), пространственно-временная структура волнового поля в пункте приёма на Земле существенно зависит от соотношения размера зоны Френеля и масштабов неоднородностей. Поскольку размер френелевской зоны и величина флуктуаций характеристик сигнала являются функциями рабочей частоты, то для диагностики ионосферных неоднородностей используют измерения временных флуктуаций сигнала на различных частотах. Для определения параметров неоднородностей обычно измеряется частотная корреляция флуктуаций амплитуды или квадрата амплитуды на поверхности Земли. Измерения фазовых флуктуаций трансionoсферного сигнала требуют более сложной и чувствительной приёмной аппаратуры и проблематичны в условиях даже медленных перемещений высокоапогейных ИСЗ. Функциональная зависимость между амплитудными флуктуациями принятого сигнала и флуктуациями фазы волны на выходе из ионосферного слоя определяется на основе дифракционных формул связи (Гершман и др., 1984). Это позволяет оценить дисперсию фазы ионосферного сигнала. При распространении импульса в свободном пространстве после прохождения слоя с неоднородностями будет изменяться корреляция между флуктуациями разных спектральных составляющих сигнала, что, в свою очередь, приведёт к изменению статистических характеристик импульса, и в частности к его уширению. Эти изменения в ряде случаев могут существенно превышать аналогичные изменения формы импульса и его корреляционных характеристик в самом ионосферном слое. Поэтому для восстановления дисперсии групповой задержки сигнала на выходе из ионосферы необходимо учитывать эффекты, возникающие при распространении волн в свободном пространстве, разделяющем ионосферу и земную поверхность.

Для определения эффективных параметров обобщённого корреляционного эллипсоида тонкой структуры ионосферы по данным наземных измерений статистических характеристик принятых импульсных сигналов на различных рабочих частотах необходимо восстановить с помощью дифракционных формул связи (Гершман и др., 1984) дисперсии фазовых и групповых задержек спутниковых сигналов на выходе из ионосферы. Дальнейшее совместное решение уравнений (15), (16) позволяет определить неизвестные параметры корреляционного эллипсоида:

$$\mu^2 = \sqrt{\frac{(J_1\sigma_{\Delta t}^2 - J_3\sigma_{\delta}^2)\sigma_{\delta}^2}{J_2J_1^2}}, \quad (18)$$

$$a = \frac{\sqrt{J_2\sigma_{\delta}^2}}{\sqrt{J_1\sigma_{\Delta t}^2 - J_3\sigma_{\delta}^2}}, \quad (19)$$

где

$$\left. \begin{aligned} J_1(f) &= \int_0^{x_k} \frac{\pi^2 f^2 \left(1 + \frac{z_0}{A}\right)^2 E \sqrt{\pi(1-\epsilon_0)^2}}{c^2 \epsilon_0 \sin \beta_0} dx, \\ J_2(f) &= \int_0^{x_k} \left[ \frac{\Phi^2(x) E \sqrt{\pi(1-\epsilon_0)^2} \left(1 + \frac{z_k}{A}\right)^2}{2c^2 \epsilon_0^2} S(x) \right] dx, \\ J_3(f) &= \int_0^{x_k} \left[ \frac{E \sqrt{\pi(1-\epsilon_0)^2} \left(1 + \frac{z_0}{A}\right)^2}{2c^2 \epsilon_0^3 \sin \beta_0} \right] dx. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Заметим, что в случае равномерного распределения случайных неоднородностей в ионосфере на частотных зависимостях дисперсий фазовых и групповых задержек сигналов нет выделенных участков повышенных флуктуаций, поэтому в формулах (20)  $E \rightarrow 1$ .

Как следует из (18), (19), для расчёта  $a$  и  $\mu^2$  необходимо вычислить интегральные коэффициенты  $J_1, J_2, J_3$ . Непосредственный численный расчёт этих коэффициентов достаточно сложен, поскольку для каждой рабочей частоты сигналов необходимо знать изменения всех подынтегральных функций, включая фундаментальные решения, вдоль средних лучевых траекторий с космического аппарата, приходящих в пункт наблюдения. Используя схему оптимизации вычислений подобных интегралов, предложенную в работе (Afanasiev, Chudaev, 2020), можно получить систему дифференциальных уравнений для совместного расчёта интегральных коэффициентов, фундаментальных решений и средних лучевых траекторий  $z_0(x, f)$ . Важно заметить, что при многочастотном просвечивании ионосферы расчёт средних траекторий  $z_0(x, f)$  проводится методом пристрелки в пункт приёма для каждой рабочей частоты. В то же время дифференциальные уравнения для коэффициентов  $J_1, J_2, J_3$  интегрируются с начальными условиями. Тем самым решение исходных краевых стохастических задач при многочастотном просвечивании ионосферы значительно упрощается.

Для определения области горизонтальной локализации случайных ионосферных неоднородностей по данным многочастотного просвечивания можно использовать сеть приёмников, расположенных на поверхности Земли. В каждом наземном приёмном пункте регистрируются временные флуктуаций амплитудных характеристик принятого трансionoсферного сигнала и выявляются пункты, где повышены флуктуации измеряемых характеристик. Затем, как и в случае равномерного распределения неоднородностей в ионосфере, на основе дифракционных формул связи (Гершман и др., 1984) восстанавливаются дисперсии фазовых и групповых задержек спутниковых сигналов на выходе из ионосферы. Далее, в пространстве между Землёй и ИСЗ моделируется потенциальная область, где могут быть сосредоточены случайные неоднородности. Горизонтальные границы этой области образуются лучевыми траекториями, рассчитанными в средней ионосфере (17) с помощью системы (12) для пунктов, где отсутствуют сильные флуктуации задержек сигналов.

Таким образом, восстановление частотных зависимостей флуктуаций групповых и фазовых задержек спутниковых радиосигналов на выходе из ионосферы по данным измерений временных флуктуаций амплитудных характеристик импульсных сигналов на различных рабочих частотах на сети наземных приёмных пунктов и математическое моделирование интегральных параметров тонкой структуры плазменной среды могут повысить информативность метода многочастотного декаметрового просвечивания ионосферы с высокоорбитальных ИСЗ.

## Заключение

Для диагностики случайной изменчивости ионосферы по данным декаметрового радиопросвечивания с борта высокоорбитального ИСЗ рассмотрена обобщённая модель корреляционного эллипсоида неоднородностей с эффективными параметрами, учитывающая возможную локализацию неоднородностей в ограниченной области пространства. Получены аналитические соотношения для дисперсий групповых и фазовых задержек сигналов просвечивания на различных рабочих частотах в сферическом случае. При выводе соотношений учтены сильные вариации траекторий между пунктами приёма и излучения. Система интегральных соотношений решена относительно неизвестных параметров корреляционного эллипсоида для различных рабочих частот просвечивания. Пространственная динамика параметров тонкой структуры ионосферы определяется с помощью данных измерений, полученных на сети приёмников, расположенных на земной поверхности. Выполнена алгоритмизация полученных формул для оперативного расчёта параметров корреляционного эллипсоида неоднородностей. Для реализации методики диагностики использована составная дифференцируемая модель диэлектрической проницаемости средней ионосферы.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FZZE-2020-0024, FZZE-2023-0004, соглашение № 075-15-2021-675).

## Литература

1. Алимов В. А., Рахлин А. В., Выборнов Ф. И. Модель взаимодействия ДКМВ-ДМВ радиоволн с сильно неоднородной среднеширотной ионосферой // Изв. вузов. Радиофизика. 1997. Т. 40. № 11. С. 1323–1341.
2. Афанасьев Н. Т., Ларюнин О. А., Марков В. П. Флуктуации фазы радиоволны при полном внутреннем отражении от случайно-неоднородной ионосферы // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 10. С. 779–784.
3. Вологдин А. Г., Власова О. К., Приходько Л. И. Флуктуации группового пути и времени группового запаздывания сигнала при наклонном отражении волн от плоскостлой среды // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 10. С. 1194–1198.
4. Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука, 1984. 392 с.
5. Гвишвили Г. В. Многочастотное просвечивание ионосферы — новый метод глобальной диагностики ионосферы в реальном времени // Косм. исслед. 1994. Т. 32. № 4–5. С. 142–149.
6. Гвишвили Г. В. Метод МРПИ — основа дистанционного мониторинга ионосферы полярной зоны РФ в оперативном режиме // Гелиогеофиз. исслед. 2016. Спец. вып. 14. С. 69–81.
7. Гвишвили Г. В., Крашенинников И. В., Гарбацевич В. А. Многочастотное радиопросвечивание арктической ионосферы // Гелиогеофиз. исслед. 2016. Вып. 15. С. 71–78.
8. Гусев В. Д., Овчинникова Н. П. Модельное определение объемных характеристик неоднородностей ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1980. Т. 20. № 4. С. 626–631.
9. Данилкин Н. П. Просвечивание ионосферы на границе диапазона ее радиопрозрачности // Радиотехника. 1985. № 9. С. 3–12.
10. Afanasiev N. T., Chudaev S. O. Diagnostics of the stochastic ionospheric channel in the decameter band of radio waves // Solar-Terrestrial Physics. 2020. V. 6. Iss. 4. P. 77–85. DOI: 10.12737/stp-64202010.
11. Afanasiev N. T., Afanasiev A. N., Larunin O. A., Markov V. P. Phase fluctuations of radio waves experiencing total reflection from a randomly inhomogeneous plasma layer // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2010. V. 72. Iss. 7–8. P. 583–587. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.02.014>.
12. Kravtsov Yu. A., Orlov Yu. I. Geometrical Optics of Inhomogeneous Medium. Berlin: Springer-Verlag, 1990. 312 p.

## Decametric radio diagnostics of fine structure of ionosphere from high-orbit artificial satellites

N. T. Afanasiev<sup>1</sup>, D. S. Lukyantsev<sup>1</sup>, A. B. Tanaev<sup>1</sup>, S. O. Chudaev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk State University, Irkutsk 664003, Russia  
E-mail: spacemaklay@gmail.com

<sup>2</sup> Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia

To restore the fine structure of the ionosphere according to the data of multi-frequency radio transluence from a high-orbit satellite, a system of integral relations for the second statistical moments of group and phase delays of decameter radio signals was obtained. The calculation of statistical moments is carried out in the approximation of geometric optics using the mathematical apparatus of perturbation theory. The relations take into account strong variations in the trajectories between the receiving and emitting points. The generalized model of the fine structure of the ionosphere is considered in the form of a correlation ellipsoid of irregularities with effective parameters to solve the inverse problem. The model is consistent with changes in the average ionosphere, given by the composite Gaussian-exponential height profile of the permittivity, and takes into account the possible spatial localization of the field of random irregularities. The system of integral relations is solved for unknown parameters of the correlation ellipsoid. The integral coefficients, expressed in terms of fundamental solutions and average ray trajectories of the two-point trajectory problem for various operating transmission frequencies, are calculated to restore the ellipsoid. The calculation of the average trajectories is carried out by the method of shooting at the receiving point for each operating frequency. The spatial dynamics of the parameters of the ionosphere fine structure is determined by using the measurement data of the group



and phase delays statistical moments of satellite decameter radio signals received by a network of receivers located on the Earth's surface.

**Keywords:** diagnostics, decameter band, ionosphere, multi-frequency radio translucence, signals, fluctuations, irregularities, spacecrafts

Accepted: 29.06.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-299-307

## References

1. Alimov V. A., Rakhlin A. V., Vybornov F. I., A model of interaction between decameter-decimetric radio waves and strongly inhomogeneous mid-latitude ionosphere, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 1997, Vol. 40, No. 11, pp. 1323–1341 (in Russian).
2. Afanasiev N. T., Laryunin O. A., Markov V. P., Phase fluctuations of a radio wave in the case of total internal reflection from a randomly inhomogeneous ionosphere, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2009, Vol. 52, No. 10, pp. 699–704, DOI: 10.1007/s11141-010-9177-0.
3. Vologdin A. G., Vlasova O. K., Prikhodko L. I., Fluctuations of a group way and time of a group delay of signal at oblique reflection of waves from a flat-layered medium, *Radio Engineering and Electronics*, 2007, Vol. 52, No. 10, pp. 1194–1198 (in Russian).
4. Gershman B. N., Erukhimov L. M., Yashin Yu. Ya., *Volnovye yavleniya v ionosfere i kosmicheskoi plazme* (Wave phenomena in the ionosphere and in the cosmic plasma), Moscow: Science, 1984, 392 p. (in Russian).
5. Givishvili G. V., Multi-frequency radio-sounding of ionosphere — new method of global diagnostics of the ionosphere at real time, *Cosmic Research*, 1994, Vol. 32, No. 4–5, pp. 142–149 (in Russian).
6. Givishvili G. V., MFRT Method — the basis for remote monitoring the ionosphere of the RF polar zone in operative mode, *Heliogeophysical Research*, 2016, Spec. Iss. 14, pp. 69–81 (in Russian).
7. Givishvili G. V., Krashenninikov I. V., Garbatsevich V. A., Multi-frequency radio sounding of the arctic ionosphere, *Heliogeophysical Research*, 2016, Issue 15, pp. 71–78 (in Russian).
8. Gusev V. D., Ovchinnikova N. P., Model definition of volume characteristics of ionospheric irregularities, *Geomagnetism and Aeronomy*, 1980, Vol. 20, No. 4, pp. 626–631 (in Russian).
9. Danilkin N. P., Translucence of ionosphere at the boundary of range its radio-translucence, *Radioengineering*, 1985, No. 9, pp. 3–12 (in Russian).
10. Afanasiev N. T., Chudaev S. O., Diagnostics of the stochastic ionospheric channel in the decameter band of radio waves, *Solar-Terrestrial Physics*, 2020, Vol. 6, Issue 4, pp. 77–85, DOI: 10.12737/stp-64202010.
11. Afanasiev N. T., Afanasiev A. N., Larunin O. A., Markov V. P., Phase fluctuations of radio waves experiencing total reflection from a randomly inhomogeneous plasma layer, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2010, Vol. 72, Issue 7–8, pp. 583–587, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.02.014>.
12. Kravtsov Yu. A., Orlov Yu. I., *Geometrical Optics of Inhomogeneous Medium*, Berlin: Springer-Verlag, 1990, 312 p.