

УДК 621.396

О ВОССТАНОВЛЕНИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ  
В ИОНОСФЕРНОМ СЛОЕ

В. С. Белей, А. В. Колосков

В приближении геометрической оптики решена задача об отражении КВ радиосигнала от параболического ионосферного слоя с перемещающимися ионосферными возмущениями (ПИБ) в виде волн плотности. В рамках метода малых возмущений для эйконала получены выражения, связывающие вариации углов прихода (УП) и доплеровского смещения частоты (ДСЧ) радиосигнала с параметрами ПИБ. Решена обратная задача об определении спектральных характеристик ПИБ. Восстанавливается амплитуда, закон дисперсии и направление распространения ионосферных неоднородностей.

Основной режим работы радиотехнических систем КВ диапазона, использующих ретранслирующие свойства ионосферы, состоит в излучении сигналов на частотах  $f_0$  ниже максимально применимой  $f_{мпч}$ . Вследствие нестабильности ионосферной плазмы траекторные характеристики сигнала в точке приема испытывают постоянные изменения. В то время как морфология поведения регулярной компоненты вариаций (например, суточные и сезонные зависимости) в основном известна [1], их флуктуационная часть изучена не столь полно. Спектр таких вариаций имеет дискретные максимумы в области низких флуктуационных частот, которые обычно связываются с перемещающимися ионосферными возмущениями (ПИБ) [2]. ПИБ представляют собой волны плотности в ионосфере, порождаемые распространяющимися в атмосферном газе акустико-гравитационными волнами (АГВ). Несмотря на непредсказуемость моментов появления и интенсивностей ПИБ, тем не менее, обладают рядом признаков детерминированного процесса: большим временем жизни, выделенными направлениями движения.

Современные методы радиофизических исследований ионосферы, использующие принципы когерентного приема и обработки сигналов, позволяют с высоким временным и пространственным разрешением

измерять траекторные параметры радиосигналов. Получаемые при этом данные могут быть использованы для постановки и решения обратных задач по восстановлению характеристик как регулярной части профиля  $N_e(\vec{r}, t)$ , так и их вариаций. Зачастую в качестве модели ПИВ выбирается взволнованная отражающая поверхность, движущаяся на ионосферных высотах [2, 3, 4]. В рамках подобной модели по наблюдаемым флуктуациям углов прихода (УП) и доплеровского смещения частоты (ДСЧ) сигнала удается восстанавливать ряд характеристик ПИВ [5]. Использование такой модели обусловлено сравнительной простотой выражений, описывающих вариации траекторных параметров зондирующих сигналов. В то же время приближение, в котором ПИВ задается в виде волны плотности, искажающей регулярный профиль ионосферного слоя, позволяет более адекватно описать реальные ионосферные процессы. Сегодня известен ряд работ (см., например, [6]), в которых в такой модели решены прямые задачи ионосферного распространения КВ сигналов. Однако решение обратной задачи (восстановление параметров возмущений) практически не исследовано.

В настоящей работе для описания наблюдаемых изменений во времени траекторных характеристик: УП (угла места  $\varepsilon(t)$  и азимута  $\varphi(t)$ ) и ДСЧ ( $F_d(t)$ ) использована следующая модель. Квадрат показателя преломления невозмущенного ионосферного слоя описывается параболическим законом:

$$n_0^2 = 1 - \alpha^2 \left( 1 - \left[ \frac{z - z_m}{y_m} \right]^2 \right).$$

Здесь  $\alpha = f_c/f_0$ ,  $f_c$  - критическая частота слоя,  $f_0$  - рабочая частота,  $z_m$  - высота максимума,  $y_m$  - полутолщина слоя. Возмущенный квадрат коэффициента преломления для ионосферного слоя с ПИВ определяется функцией  $\nu(\vec{r})$  и задается в виде:

$$n^2 = 1 - \alpha^2 \left( 1 - \left[ \frac{z - z_m}{y_m} \right]^2 \right) \left( 1 + \nu(\vec{r}) \right).$$

В качестве опорной рассмотрим решение прямой задачи распространения радиоволн на наклонной односкачковой радиотрассе. При заданной функции  $\nu(\vec{r})$ , описывающей форму неоднородностей в слое, искомыми параметрами сигнала являются:  $\varepsilon(t)$ ,  $\varphi(t)$  и  $F_d(t)$ . Поле в точке наблюдения  $O$  (см. рис. 1) рассчитывается в соответствии с принципом Гюйгенса - Френеля. Расчет фазы зондирующего сигнала на нижней границе ионосферы ( $z = z_H$ ) осуществляется в

геометрооптическом приближении в предположении о малости амплитуды возмущения  $|\max \nu| \ll 1$  и больших по сравнению с зоной Френеля размеров неоднородностей. Кроме того, предполагалось, что рабочая частота  $f_0$  далека от  $f_{мпч}$ . В этом случае набег фаз вдоль лучевых траекторий может быть вычислен в первом приближении метода малых возмущений для эйконала [7]. Значения УП в точке приема восстанавливаются из уравнения стационарной фазы:

$$\nabla_{\perp}(L_0 + L_1 + R_0 + R) = 0. \quad (1)$$

Здесь  $L_0$  - эйконал при отсутствии возмущений,  $L_1$  - добавка за счет неоднородностей,  $R_0$  и  $R$  - расстояния вдоль лучевых траекторий от нижней границы ионосферного слоя до передатчика и приемника соответственно (см. рис. 1). Введенные ограничения на класс рассматриваемых неоднородностей позволяют линеаризовать уравнение (1) и получить в явном виде выражения для вариаций УП -  $\Delta \epsilon$ ,  $\Delta \varphi$  и ДСЧ  $\Delta F_d$ :

$$\Delta \epsilon = - \frac{\sin^2 \epsilon_0 \partial R_1 / \partial \epsilon}{z_H (\partial^2 L_0 / \partial \epsilon^2 + \partial^2 R_0 / \partial \epsilon^2 + \partial^2 R / \partial \epsilon^2)} \frac{\partial L_1}{\partial \epsilon}, \quad (2)$$

$$\Delta \varphi = \frac{R_1}{R_0 \cos \epsilon_0 \partial^2 R / \partial \varphi^2} \frac{\partial L_1}{\partial \varphi}, \quad (3)$$

$$\Delta F_d = - \frac{1}{\lambda} \frac{\partial L_1}{\partial t}, \quad (4)$$

где  $\epsilon_0$  - угол места невозмущенного луча,  $R_1 = \cos \epsilon_0 (2\tau_H + R_0)$  - расстояние от передатчика до проекции точки выхода луча на ось  $Ox$  (см. рис. 1),  $\tau_H = y_m / \alpha \operatorname{arch}(\alpha / (\alpha^2 - \sin^2 \epsilon_0)^{1/2})$  - лучевые координаты точек входа и выхода луча из ионосферы. Добавка к эйконалу  $L_1$  в соответствии с [7] рассчитывается по формуле:

$$L_1 = - \frac{\alpha^2}{2} \int_{-\tau_H}^{\tau_H} \left( 1 - \left[ \frac{z(\tau) - z_m}{y_m} \right]^2 \right) \nu(\vec{r}(\tau)) d\tau, \quad (5)$$

здесь  $\tau$  - лучевая координата, отсчитываемая от точки поворота.

Выражения (2) - (5) были использованы в задаче численного

моделирования. Рассматривалось возмущение вида  $\nu = \delta \cos(\vec{k}\vec{r} - \Omega t - \Psi_0)$  ( $\vec{k}$  - волновой вектор ПИВ). При вычислении интеграла (5) возмущение  $\nu(\vec{r})$  линеаризовывалось по  $z$ . Такое разложение допустимо при больших, по сравнению с глубиной проникновения радиоволн в слой, вертикальных масштабах неоднородностей (например при незначительных отклонениях направления распространения возмущения от горизонтального). Выходными данными моделирования являлись зависимости амплитуд и фаз вариаций  $\Delta\epsilon$ ,  $\Delta\phi$ ,  $\Delta F_d$  от регулярных параметров ионосферы ( $z_m$ ,  $y_m$ ,  $f_c$ ) и возмущения  $\nu(\vec{r})$ . Анализ полученных результатов показал, что ПИВ с амплитудами в 5 - 10% вызывает флуктуации УП в единицы градусов и ДСЧ в десятые доли Герца, что соответствует экспериментально наблюдаемым данным [2, 3].

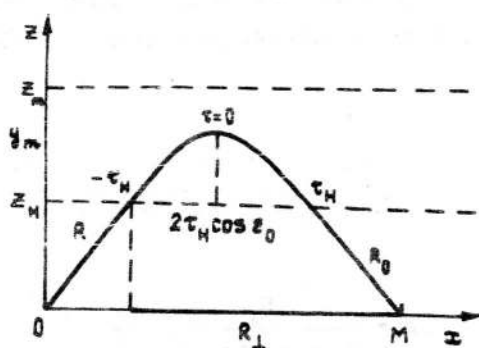


Рис. 1.

Рассмотрим возможность решения обратной задачи по восстановлению параметров возмущения  $\nu$ . Задача решалась в спектральной постановке  $\nu = \sum_{i=1}^N \nu_i$ . Предполагалось, что каждой частоте  $\Omega_i$  соответствует одна плоская волна, характеристики которой подлежат восстановлению. Подставляя возмущение вида  $\nu_i = \delta_i \cos(\vec{k}_i \vec{r} - \Omega_i t - \Psi_{\Omega_i})$  в (5) и производя интегрирование, получаем выражение для  $L_1$ . Используя его в формулах (2) - (4), после некоторых преобразований можно выписать систему алгебраических уравнений, которую в случае  $k_z = 0$  удастся разрешить относительно искомых параметров возмущения - азимута ПИВ  $\theta$ , длины волны  $\lambda$ , скорости перемещения  $V$  и амплитуды возмущений  $\delta$ :

$$\theta = \text{ArcTg} \frac{A_{\varphi} |\partial R^2 / \partial \varphi^2|}{A_{\varepsilon} |\partial^2 L_0 / \partial \varepsilon^2 + \partial^2 R_0 / \partial \varepsilon^2 + \partial^2 R / \partial \varepsilon^2|} \frac{\cos(\Phi_f - \Phi_{\varphi}) C_1}{\cos(\Phi_f - \Phi_{\varepsilon}) C_2} + \quad (6)$$

$$+ \begin{cases} 0 & \text{при } \cos(\Phi_f - \Phi_{\varepsilon}) C_2 \geq 0 \\ \pi & \text{при } \cos(\Phi_f - \Phi_{\varepsilon}) C_2 < 0 \end{cases};$$

$$V = \quad (7)$$

$$= \left[ \frac{A_f^2 \lambda^2}{\left( A_{\varepsilon} \left( \frac{\partial^2 L_0}{\partial \varepsilon^2} + \frac{\partial^2 R_0}{\partial \varepsilon^2} + \frac{\partial^2 R}{\partial \varepsilon^2} \right) \cos(\Phi_f - \Phi_{\varepsilon}) / C_1 \right)^2 + \left( A_{\varphi} \left( \frac{\partial^2 R}{\partial \varphi^2} \right) \cos(\Phi_f - \Phi_{\varphi}) / C_2 \right)^2} \right]^{1/2};$$

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\Omega} V; \quad (8)$$

$$\delta = \frac{A_f \lambda}{kV|F|}. \quad (9)$$

Здесь  $A_{\varepsilon}$ ,  $A_{\varphi}$ ,  $A_f$ ,  $\Phi_{\varepsilon}$ ,  $\Phi_{\varphi}$ ,  $\Phi_f$  - амплитуды и фазы гармоник вариаций УП и ДСЧ на частоте  $\Omega$ ,  $\lambda$  - длина радиоволны;

$$C_1 = \text{sinc}_{\varepsilon_0}(R_0 + \tau_H) - \text{cos}_{\varepsilon_0}(\partial R_0 / \partial \varepsilon + \partial \tau_H / \partial \varepsilon),$$

$$C_2 = -\text{cos}_{\varepsilon_0}(R_0 + \tau_H),$$

$$F = \frac{2(\alpha/y_{\square})^2}{4(\alpha/y_{\square})^2 + (k_x \text{cos}_{\varepsilon_0})^2} \left[ \frac{\sin(k_x \text{cos}_{\varepsilon_0} \tau_H)}{k_x \text{cos}_{\varepsilon_0}} (\alpha^2 + \sin^2 \varepsilon_0) - \right. \\ \left. - y_{\square} \text{sinc}_{\varepsilon_0} \cos(k_x \text{cos}_{\varepsilon_0} \tau_H) \right].$$

Для проверки устойчивости решения были найдены соотношения между дисперсиями ошибок входных (вариаций УП и ДСЧ) и искомым параметром ПИБ ( $\sigma_{\theta}^2$ ,  $\sigma_{\Lambda}^2$ ,  $\sigma_v^2$ ,  $\sigma_{\delta}^2$ ). Получены оценки среднеквадратичных отклонений ошибок восстанавливаемых параметров возмущения в

зависимости от направления распространения и длины волны возмущения. Численные расчеты погрешностей показали удовлетворительную устойчивость решения по отношению к флуктуациям входных параметров. При среднеквадратичных отклонениях (СКО) азимута и угла места -  $\sigma_\varphi = \sigma_\epsilon = 0,5^\circ$  и СКО ДСЧ -  $\sigma_f = 0,05$  Гц (что соответствует разрешающей способности современных пеленгационных и спектральных устройств) ошибка в восстановлении характеристик ПИВ не превышает 30% их истинных значений. Неточность в восстановлении параметров возрастает с уменьшением длины волны ПИВ -  $\lambda$  и с приближением азимута возмущения -  $\theta$  к  $0$  и к  $180^\circ$  (когда ПИВ движется параллельно радиотрассе). При  $\lambda/\cos \theta < 2\tau_H \cos \epsilon_0$  решение становится неустойчивым ( $2\tau_H \cos \epsilon_0$  - горизонтальная составляющая пути, проходимого радиоволной в слое (см. рис. 1)).

Рассмотренная выше методика расчета характеристик ПИВ была использована для восстановления параметров ионосферных возмущений по результатам наблюдений, проводившихся в РИ АН УССР. Экспериментальные данные представляли собой синхронные многочасовые записи вариаций  $\epsilon(t)$ ,  $\varphi(t)$ ,  $F_2(t)$  коротковолновых сигналов на наклонных, односкачковых, среднеширотных радиотрассах (см. рис. 2). Результаты измерений подвергались корреляционному и спектральному анализу. Из всей совокупности наблюдений были выбраны записи, характеризующиеся квазипериодическим характером поведения измеряемых величин и их высокой взаимной корреляцией. Для таких сеансов проводились численные расчеты характеристик ПИВ. Параметры регулярного ионосферного слоя для решения обратной задачи задавались в соответствии с литературными данными и прогнозами МПЧ [1]. Результаты обработки одного из таких сеансов наблюдений приведены в табл. 1. Анализ численных значений параметров ПИВ, восстановленных предложенным методом (скорость движения неоднородностей -  $V \approx 50 - 200$  м/с, длина волны ПИВ -  $\lambda \approx 100 - 500$  км, степень возмущения  $\delta \approx 5 - 20\%$ ) показал их соответствие литературе (см., например,

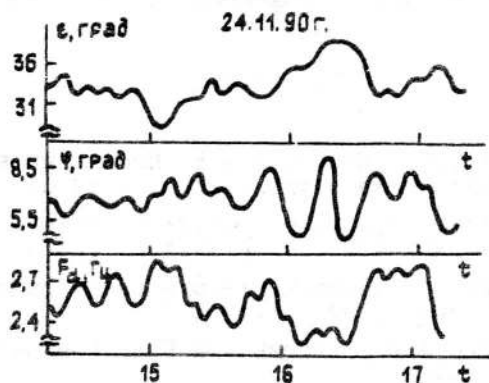


Рис. 2.

Таблица 1

Дата	24.11.90				
Время начала	14ч 35м				
Длительность реализации	202 м				
Рабочая частота ( $f_o$ )	9,555 МГц				
Критическая частота ( $f_c$ )	8,950 МГц				
Высота максимума ( $z_m$ )	306,0 км				
Полуширина слоя ( $y_m$ )	100,0 км				
Восстановленные спектральные характеристики ПИБ					
N (гарм)	T (мин)	θ (град)	V (м/с)	Δ (км)	δ (%)
4	50,5	-169	56	171	20
7	22,4	-127	87	117	9

Таким образом, в данной работе рассмотрена методика расчета вариаций траекторных параметров КВ радиосигналов в модели параболического ионосферного слоя с неоднородностями в виде волн плотности. Для случая возмущения, распространяющегося параллельно поверхности земли, решена задача о вычислении спектральных характеристик ПИБ. Соответствие параметров ионосферных возмущений, восстанавливаемых данным методом, известным из литературы, свидетельствует о непротиворечивости предложенной модели. Недостатком рассматриваемого метода является его неприменимость для восстановления параметров ПИБ большой амплитуды, когда наблюдается многолучевой характер отраженного от ионосферы сигнала. К

достоинствам предложенной методики бистатистического ионосферного зондирования следует отнести возможность использования сигналов не специальных типов (например, широковещательных станций).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов - Холодный Г. С., Михайлов А. В. Прогнозирование состояния ионосферы. - Л.: Гидрометеиздат, 1980. - 192 с.
2. Троицкий Б. В. Отклик сигнала радиозондирования на ионосферные неоднородности. - Алма-Ата: Наука, 1983. - 164 с.
3. Афраймович Э. Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. - М.: Наука, 1982. - 200 с.
4. Белей В. С., Галушко В. Г., Ямпольский Ю. М. Препринт ИРЭ АН УССР N 231. - Харьков, 1983.
5. Белей В. С., Галушко В. Г., Ямпольский Ю. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29. N 4. С. 494.
6. Ковалевская Е. М., Ишкова Л. М., Белей В. С. и др. // Геоманетизм и аэрономия. 1987. Т. 27. N 6. С. 929.
7. Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И. Геометрическая оптика неоднородных сред. - М.: Наука, 1980. - 304 с.

Радиоастрономический институт  
АН Украины

Поступила в редакцию  
23 апреля 1991 г.

#### ON RESTORATION OF TID'S SPECTRAL CHARACTERISTICS IN AN IONOSPHERIC LAYER

*V. S. Beley, A. V. Koloskov*

By means of geometrical optics, the problem is solved of SW radio signal reflection from the parabolic ionospheric layer with TIDs described as the waves of density. The equations connecting azimuth, elevation angle and doppler shift of radio waves with TID's parameters have been obtained using the perturbation method for solving eikonal equation. The inverse problem of TID's spectral characteristics calculation is solved. The amplitude, dispersion relation and propagation direction of ionospheric irregularities are restored.