

## МЕТОДЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛЯ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ ИОНОСФЕРЫ

М.А. Зверев, С.И. Книжин, М.В. Тинин

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия,  
mikhail.zverev.90@mail.ru

## METHODS OF SPATIAL FIELD PROCESSING FOR IONOSPHERIC DIAGNOSTICS PROBLEMS

M.A. Zverev, S.I. Knizhin, M.V. Tinin

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, mikhail.zverev.90@mail.ru

**Аннотация.** В данной работе исследуются возможности применения двукратной пространственной обработки поля на основе метода ДВФП для повышения разрешающей способности спутниковой диагностики неоднородной ионосферной плазмы. Рассматривается случай, когда линейка источников синтезируется низкоорбитальным спутником. Модель фоновой ионосферы выбрана в виде простого слоя Чепмена. В качестве модели вариации диэлектрической проницаемости используются горизонтально движущиеся неоднородности, имеющие гауссов профиль.

**Ключевые слова:** пространственная обработка поля, спутниковая диагностика, ионосферная плазма.

**Abstract.** We explore the possibilities of double spatial field processing based on DWFT to increase the resolution of satellite diagnostics of inhomogeneous ionospheric plasma. In this case, a line of sources is synthesized by a low-orbit satellite. The model of the background ionosphere is chosen in the form of a simple Chapman layer. Horizontally moving inhomogeneities with a Gaussian profile are used as a model of dielectric permittivity variation.

**Keywords:** spatial field processing, satellite diagnostics, ionospheric plasma.

### ВВЕДЕНИЕ

Для космической радиофизики одним из основных интересов является задача диагностики ионосферы Земли [Дэвис, 1973]. С развитием спутниковых технологий появились новые перспективные методы исследования ионосферы такие как спутниковая диагностика и радиозатменные измерения. С помощью радиозатменных измерений исследуются атмосфера и ионосфера планет. Спутниковую диагностику разделяют на лучевую и дифракционную [Куницын, Терещенко, 1991]. При помощи лучевой диагностики исследуются крупномасштабные ионосферные неоднородности. При этом в основном используется приближение геометрической оптики, поэтому в данном методе не учитываются дифракционные эффекты. Задача данного метода состоит в получении линейных интегралов, которые необходимы для восстановления физических характеристик среды [Куницын, Терещенко, 1991]. В дифракционной диагностике исследуют объекты, размеры которых не превышают радиуса Френеля, в рамках данного метода используют приближения фазового экрана, Борна, Рытова и двойного взвешенного Фурье преобразования (ДВФП). Значительную трудность при исследовании неоднородных объектов в плазме, масштабы которых не превосходят радиуса Френеля, представляют дифракция и многолучевость. Устранение влияния указанных эффектов на результаты измерений возможно при применении дополнительной пространственной обработки поля [Tinin, Kravtsov, 2008].

В данной работе мы исследуем возможности двукратной пространственной обработки поля на основе метода ДВФП для повышения разрешающей способности спутниковой дифракционной диагностики ионосферы с учетом горизонтальной скорости дрейфа плазменных неоднородностей.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть линейка источников синтезируется радиопередатчиком, расположенным на борту движущегося по орбите низкоорбитального спутника, а на земле располагается стационарная линейка приемников, регистрирующих поле радиоволн, прошедших через неоднородную среду. Будем считать, что спутник пролетает в зените над установкой, тогда можно рассматривать задачу в сечении плоскостью  $(x, z)$  (ось  $x$  направлена вдоль линейки приемников, а ось  $z$  — вертикально вверх).

Как известно, диэлектрическую проницаемость неоднородной ионосферной плазмы  $\varepsilon(r)$  можно представить в вид суммы ее невозмущенного (фонового) значения  $\underline{\varepsilon}(r)$  и флуктуаций (вариаций) относительно него  $\tilde{\varepsilon}(r)$ . Так как протяженность линейки источников и приемников невелика, то горизонтальный градиент в модели фоновой среды можно не учитывать, поэтому для нее используется выражение в виде простого слоя Чепмена [Дэвис, 1973].

В качестве модели вариации диэлектрической проницаемости возьмем две горизонтально движущиеся неоднородности, имеющие гауссов профиль:

$$\tilde{\varepsilon}(x, z, t) = \sum_{i=1}^2 \varepsilon_{mi} \exp \left[ - \left( \frac{(x - x_{mi}(t))^2}{2l_{1i}^2} + \frac{(z - z_{mi}(t))^2}{2l_{2i}^2} \right) \right], \quad (1)$$

здесь для  $i$ -ой неоднородности  $\varepsilon_{mi}$  — максимальное значение вариации диэлектрической проницаемости,  $l_{1i}$  и  $l_{2i}$  — характерные поперечные и продольные размеры, а положение центра  $x_{mi}(t) = x_{mi} + v_{xi}t$  и  $z_{mi}(t) = z_{mi}$ , где  $v_{xi}$  — скорость горизонтального дрейфа.

Для модели поля зондирующей радиоволны воспользуемся выражением в приближении

фазового экрана [Knizhin, 2020]. Фаза рассеянного поля без применения дополнительной пространственной обработки поля определяется как:

$$k\Phi(x(t), x_0) = \text{Arg}[U(x(t), x_0)]. \quad (2)$$

Для повышения разрешающей способности диагностики неоднородной плазмы, масштабы которой меньше радиуса Френеля, воспользуемся пространственной обработкой поля на основе метода ДВФП, выполненного относительно координат источников и приемников [Tinini, Kravtsov, 2008]:

$$U^*(x^*, x_0^*) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dx dx_0 U(x, x_0) \exp \left[ ik \left( \frac{2(x^*x_0 + x_0^*x)}{Z} - \frac{(x + x_0)^2}{2Z} - Z \right) \right]. \quad (3)$$

Тогда, изменение фазы волны рассеянного поля после применения двукратной пространственной обработки поля:

$$k\Phi^*(x^*, x_0^*) = \text{Arg} \left[ U^*(x^*, x_0^*) \exp \left( -\frac{2ikx^*x_0^*}{Z} \right) \right]. \quad (4)$$

### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

За время синтеза спутником линейки источников физические параметры неоднородной среды претерпевают изменения: в данном случае исследуемые неоднородности перемещаются со скоростью дрейфа. Поэтому, когда физические параметры среды превышают определенные значения, являющиеся предельными в этом смысле, двукратная пространственная обработка поля на основе метода ДВФП может оказаться неприменимой. В связи с чем, рассмотрим изменение фазы рассеянного поля без дополнительной обработки поля и после применения двукратной пространственной обработки поля на основе метода ДВФП для различных значений скорости горизонтального дрейфа плазменных неоднородностей.

При численных расчетах используются следующие параметры. Высота орбиты низкоорбитального спутника 860 км, рабочая частота 150 МГц и скорость движения 7.5 км/с. В модели фоновой среды критическая частота 5 МГц, высота максимума ионосферной ионизации 300 км и характерная полутолщина слоя 150 км. Параметры исследуемых неоднородностей:  $\tilde{\epsilon}_{m1} = \tilde{\epsilon}_{m2} = 0.002$ ,  $l_{11} = l_{21} = 0.04$  км,  $l_{12} = l_{22} = 0.04$  км,  $x_{m2} = -x_{m1} = 0.11$  км и  $z_{m1} = z_{m2} = 400$  км. Радиус Френеля  $a_F \approx 0.64$  км превышает размеры неоднородностей.

Так как протяженность линейки приемников конечна и ее элементы расположены не непрерывно, то интеграл, входящий в обработку (3), был рассчитан в дискретной форме, когда количество элементов в приемной и передающей системах составляет  $N_x = 200$  и  $N_{x_0} = 200$ , а расстояние между приемниками и источниками равняется  $\Delta x = 40$  м и  $\Delta x_0 = 40$  м. Для того чтобы синтезировать линейку источников, спутнику понадобится 1.1 с, при этом каждый отсчет должен вестись раз в 0.0055 с.

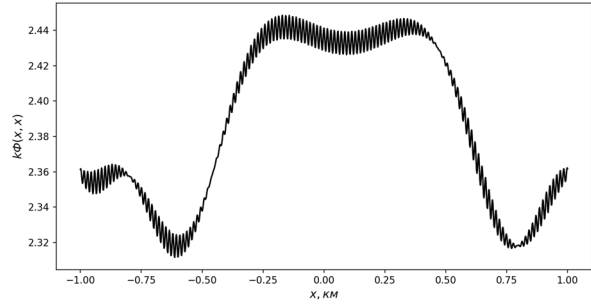


Рис. 1. Изменение фазы волны  $k\Phi(x, x_0)$  до обработки (3) при  $v_{x1} = v_{x2} = 170$  м/с

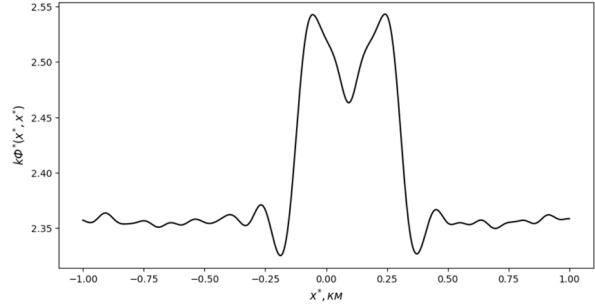


Рис. 2. Изменение фазы волны  $k\Phi^*(x^*, x_0^*)$  после обработки (3) при  $v_{x1} = v_{x2} = 170$  м/с

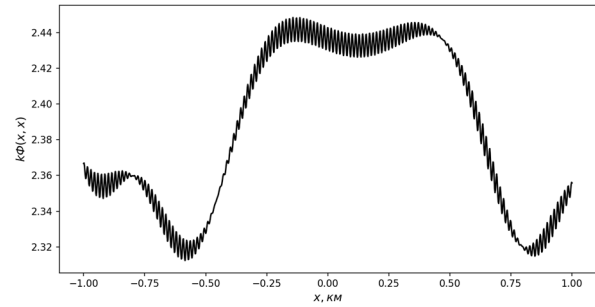


Рис. 3. Изменение фазы волны  $k\Phi(x, x_0)$  до обработки (3) при  $v_{x1} = v_{x2} = 230$  м/с

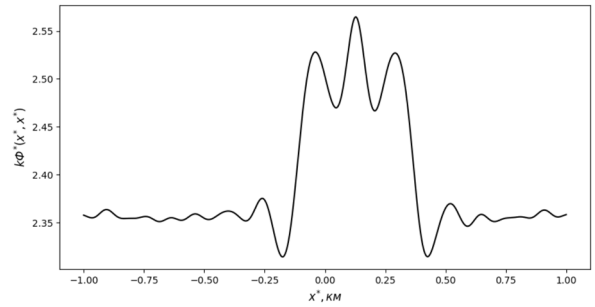


Рис. 4. Изменение фазы волны  $k\Phi^*(x^*, x_0^*)$  после обработки (3) при  $v_{x1} = v_{x2} = 230$  м/с

Из фазовых проекций  $k\Phi(x, x_0)$  необработанного поля  $U(x, x_0)$  при  $x = x_0$  (рис. 1 и 3) видно, что из-за влияния дифракционных эффектов извлечь какую-либо информацию об исследуемой среде не представляется возможным. Применение двукратной пространственной обработки поля на основе метода ДВФП при скорости горизонтального дрейфа 170 м/с позволило устранить влияние дифракционных эффектов и выделить две гауссовы кривые в фазовой проекции  $k\Phi^*(x^*, x_0^*)$  обработанного поля при  $x^* = x_0^*$  (рис. 2), которые предельно различимы по критерию Рэлея. При дальнейшем

увеличении скорости горизонтального дрейфа, как это видно из рис. 4, применение дополнительной обработки поля не приводит к повышению разрешающей способности диагностики.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численных расчетов для выбранных параметров показали, что двукратная пространственная обработка поля на основе метода ДВФП позволяет повышать разрешающую способность спутниковой диагностики с помощью низкоорбитального спутника для близкорасположенных плазменных неоднородностей с масштабами меньше радиуса Френеля,двигающихся со скоростью горизонтального дрейфа меньшей 170 м/с.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (Задание № FZZE-2023-0004).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 504 с.
- Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Томография ионосферы. М.: Наука, 1991. 176 с.
- Knizhin S.I. Using spatial radio wave field processing for diagnostics of inhomogeneous plasma // *Waves in Random and Complex Media*. 2020. P. 1–21.
- Tinin M.V., Kravtsov Y.A. Super – Fresnel resolution of plasma in homogeneities by electromagnetic sounding // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2008. V. 50. P. 1–12.