

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОБРАБОТКА ПОЛЯ В ДИАГНОСТИКЕ ОКОЛОЗЕМНОЙ ПЛАЗМЫ

**С.И. Книжин, М.В. Тинин**

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия  
 sergeiknizhin@physdep.isu.ru

## SPATIAL FIELD PROCESSING FOR NEAR-EARTH PLASMA DIAGNOSTICS

**S.I. Knizhin, M.V. Tinin**

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia  
 sergeiknizhin@physdep.isu.ru

**Аннотация.** В работе исследуются возможности пространственной двукратной обработки поля, полученной с применением метода двойного взвешенного Фурье преобразования (ДВФП), для задач диагностики неоднородной плазмы. Выполнен анализ влияния дискретизации элементов и размеров приемо-передающей системы на результаты обработки поля.

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

**Abstract.** We explore the possibilities of double and single spatial field processings, obtained using the method of double weighted Fourier transform (DWFT), for inhomogeneous plasma diagnostics. We analyze the effect of discretization of elements and size of a transmitting and receiving system on field processing.

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

### ВВЕДЕНИЕ

С развитием спутниковых технологий появились новые методы диагностики околоземной плазмы, такие как спутниковая томография и радиозатменные исследования. Спутниковую диагностику можно разделить на два типа, лучевую и дифракционную. Лучевая диагностика ионосферы, основанная на геометрооптической (ГО) модели распространения сигнала, позволяет исследовать крупномасштабные неоднородности в ионосфере Земли. Для решения задачи диагностики с учетом дифракционных эффектов используют другие приближенные методы описания полей в неоднородных средах. Для неоднородных сред, вызывающих слабые флуктуации фазы, используют метод плавных возмущений и приближение Борна [Рытов и др., 1978; Татарский, 1967]. Для сред с сильными флуктуациями фазы обычно применяют модель фазового экрана, однако данная модель требует информации о местонахождении неоднородности [Исмару, 1981]. Все рассмотренные методы позволяют получать данные о структуре ионосферы Земли. Однако, исследования тонкой структуры околоземной плазмы с масштабами, не превышающими радиуса Френеля, остаются актуальными. В качестве метода позволяющего увеличить разрешающую способность диагностики неоднородной плазмы можно использовать пространственную обработку поля, основанную на представлении поля волны в виде двойного взвешенного Фурье преобразования (ДВФП), выполненного относительно координат источника и приемника [Kravtsov, Tinin, 2000; Kravtsov et al., 2011; Tinin, Kravtsov, 2008]. Отличительная особенность данного метода заключается в возможности диагностировать неоднородности с размерами меньше радиуса Френеля при слабых и сильных вариациях фазы и уровня в отсутствие информации о локализации исследуемой неоднородной среды.

В данной работе мы рассмотрим влияние дискретизации измерений и размеры областей обработки поля приемо-передающей системой на результаты

фазовых измерений при дифракционной диагностике неоднородной плазмы в условиях сильных вариаций фазы.

### ДВУКРАТНАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОБРАБОТКА ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ДВФП

Пусть измерения рассеянного поля радиоволн выполняются по схеме, где линейка источников на плоскости  $z=z_0$  излучает сигналы, а приемная система на плоскости  $z=z_t$  измеряет рассеянное поле  $U(\mathbf{p}, \mathbf{p}_0)$  для каждого источника. Между приемной и передающей системами располагаются неоднородности, физические характеристики которых необходимо найти. В отсутствие какой-либо информации о местонахождении неоднородностей, чтобы повысить разрешение при диагностике можно воспользоваться следующей пространственной обработкой поля  $U(\mathbf{p}, \mathbf{p}_0)$  на основе метода ДВФП [Kravtsov, Tinin, 2000; Kravtsov et al., 2011; Tinin, Kravtsov, 2008]

$$\tilde{U}_1(\mathbf{p}^*, \mathbf{p}_0^*) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \rho d^2 \rho_0 U(\mathbf{p}, \mathbf{p}_0) \times \exp \left\{ ik \left( \frac{2(\mathbf{p}^* \cdot \mathbf{p}_0 + \mathbf{p}_0^* \cdot \mathbf{p})}{Z} - \frac{(\mathbf{p} + \mathbf{p}_0)^2}{2Z} - Z \right) \right\}. \quad (1)$$

Рассмотрим задачу рассеяния радиоволн в неоднородностях с масштабами меньше радиуса Френеля при сильных вариациях фазы т. е., когда  $k|\varphi(\xi, \xi_0)| \geq 1$ . В качестве модели поля зондирующей радиоволны  $U(\mathbf{p}, \mathbf{p}_0)$  используем выражение в приближении фазового экрана [Kravtsov et al., 2008].

Модель неоднородностей имеет вид суммы гауссовых функций

$$\tilde{\epsilon}(\mathbf{p}, z) = \sum_{i=1}^3 \epsilon_{mi} \times \exp \left\{ - \left[ (\mathbf{p} - \mathbf{p}_{mi})^2 + (z - z_{mi})^2 \right] / 2l_i^2 \right\}. \quad (2)$$

В условиях, когда частота радиоизлучения высока, влияние фоновой среды по сравнению с влиянием

локальных мелкомасштабных структур на рассеяние и рефракцию волны незначительно. В связи с этим при численных расчётах модель фоновой среды не учитывалась. Здесь мы исследуем, как влияют дискретизация измерений и размеры областей обработки поля приемо-передающей системы на результаты фазовых измерений. Для численных расчетов используем следующие параметры для неоднородной среды:  $x_{m1}=-500$  м,  $x_{m2}=0$  м,  $x_{m3}=500$  м,  $z_{m1}=z_{m2}=z_{m3}=0$ ,  $\epsilon_{m1}=-0.001$ ,  $\epsilon_{m2}=-0.005$ ,  $\epsilon_{m3}=-0.005$ ,  $l_1=100$  м,  $l_2=50$  м,  $l_3=25$  м. Количество элементов приемо-передающей системы  $N_x=N_{x_0}=100$  и расстояние между ними  $\Delta x=\Delta x_0=40$  м.

На рис. 1 показаны изменения фазы волны  $k\Phi_1(x, x_0)$  и  $k\Phi_2(x^*, x_0^*)$  при  $x=x_0$ ,  $x^*=x_0^*$  в сечении  $y=y_0=0$ ,  $y^*=y_0^*=0$ , для следующих параметров:  $z_r=-200$  км,  $z_0=800$  км,  $z_b=0$ ,  $f=400$  МГц. В этом случае радиус Френеля  $a_F \approx 430$  м превышает размеры неоднородностей. Из рис. 1 видно, что двукратная пространственная обработка поля (1) позволила выйти за рамки френелевского разрешения. На рис. 1, б фазовая проекция содержит только три гауссовых кривых без дополнительных осцилляций, вызванных дифракционными эффектами. Данные параметры соответствуют масштабам задачи диагностики околоземной плазмы при помощи низкоорбитальных спутников. Для того чтобы спутнику синтезировать линейку источников понадобится порядка 0.54 с, причем каждый отсчет должен вестись раз в 0.0054 с.

Из этого следует, что в данных условиях применить двукратную обработку поля (1) возможно только тогда, когда скорость дрейфа неоднородностей не высокая, а время релаксации неоднородностей больше, чем время синтеза передающей решетки антенн. Также при данной схеме измерений наиболее важную роль играют размеры области и интервал

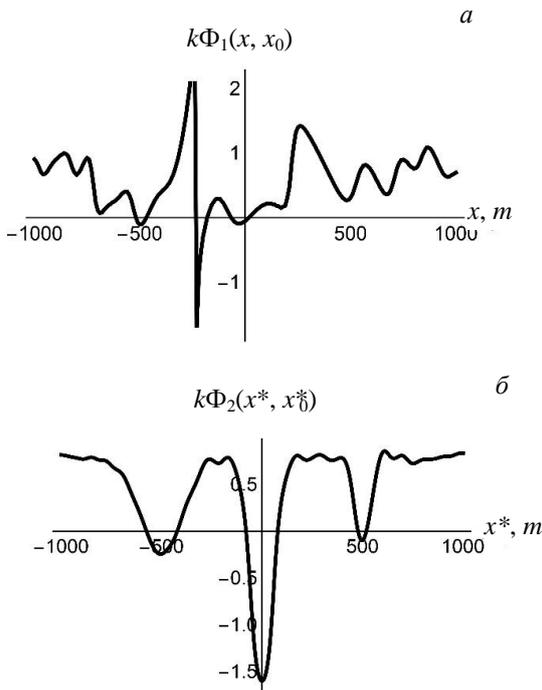


Рис. 1. а) изменение фазы волны  $k\Phi_1(x, x_0)$  до обработки (1) при  $f=400$  МГц; б) Поведение изменения фазы волны  $k\Phi_2(x^*, x_0^*)$  после обработки (1)

дискретизации при обработке поля. Для выхода за рамки сверхфренелевского разрешения при помощи двукратной обработки поля ДВФП (1) необходимо, чтобы расстояние между элементами приемо-передающей системы было менее или порядка масштабов исследуемых неоднородных структур.

На рис. 2 показаны изменения фазы волны  $k\Phi_1(x, x_0)$  и  $k\Phi_2(x^*, x_0^*)$  для другой частоты зондирования  $f=150$  МГц при  $x=x_0$ ,  $x^*=x_0^*$  в сечении  $y=y_0=0$ ,  $y^*=y_0^*=0$  с радиусом Френеля  $a_F \approx 700$  м. Из рис. 2 видно, что при увеличении радиуса Френеля обработка поля (1) дает разрешение хуже, чем при зондировании радиоволнами с частотой  $f=400$  МГц при тех же расстояниях между элементами приемо-передающей системы и области обработки рассеянного поля. Для того чтобы улучшить разрешение при данных условиях необходимо уменьшить расстояние между элементами приемо-передающей системы и увеличить область обработки.

На рис. 3 показаны изменения фазы волны  $k\Phi_1(x, x_0)$  и  $k\Phi_2(x^*, x_0^*)$  при  $x=x_0$ ,  $x^*=x_0^*$  в сечении  $y=y_0=0$ ,  $y^*=y_0^*=0$ , для следующих параметров:  $z_r=-200$  км,  $z_0=1980$  км,  $f=1575$  МГц,  $a_F \approx 1$  км. Из рис. 3 видно, что пространственная двукратная обработка поля (1) уменьшила влияние дифракционных эффектов, но не позволила выделить три гауссовых кривых в фазовой проекции рис. 3, б. Это вызвано не недостаточной областью обработки рассеянного поля и большим расстоянием между элементами приемо-передающей системы в данных условиях. Для того чтобы синтезировать такую линейку источников GPS спутнику понадобится порядка 1.03 с причем каждый отсчет должен вестись раз в 0.01 с, что практически

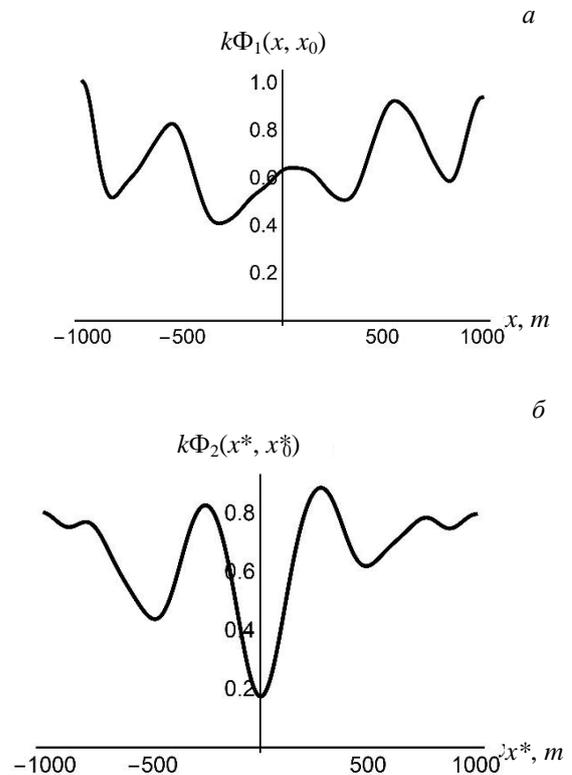


Рис. 2. а) изменение фазы рассеянной волны  $k\Phi_1(x, x_0)$  до обработки (1) при  $f=150$  МГц; б) поведение изменения фазы волны  $k\Phi_2(x^*, x_0^*)$  после обработки (1)

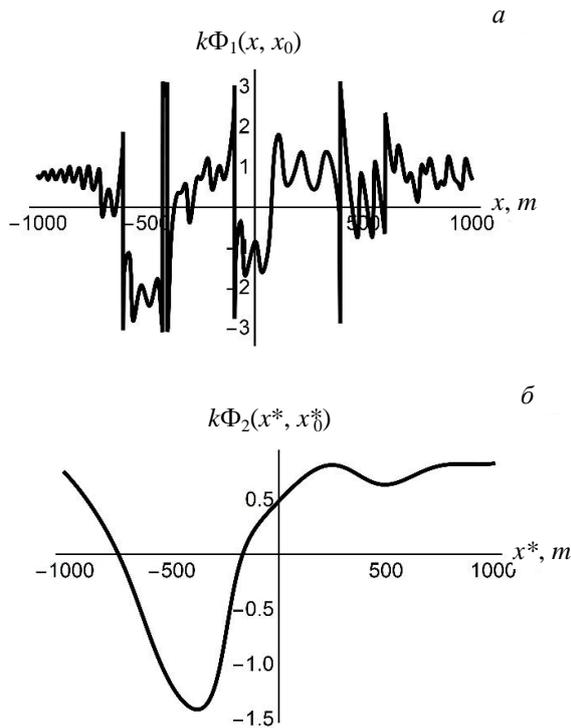


Рис. 3. а) изменение фазы рассеянной волны  $k\Phi_1(x, x_0)$  до обработки (1) при  $f=1575$  МГц; б) Поведение изменения фазы волны  $k\Phi_2(x^*, x^*_0)$  после обработки (1)

в два раза превышает время синтеза антенной решетки для низкоорбитальных спутников.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численных расчетов показали, что двукратная пространственная обработка поля на основе метода ДВФП позволяет выйти за рамки френелевского разрешения в фазовых измерениях при просвечивании радиоволнами неоднородных сред. При этом расстояния между элементами в приемопередающей системе должны быть меньше или порядка размеров исследуемых неоднородностей, а область обработки превышать размеры радиуса Френеля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Рыгов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля. М.: Наука, 1978.

Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967.

Исмару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 2. Многократное рассеяние, турбулентность, шероховатые поверхности и дистанционное зондирование. М.: Мир, 1981. 319 с.

Kravtsov Yu.A., Tinin M.V. Representation of wave field in a randomly inhomogeneous medium in the form of the double — weighted Fourier transform // Radio Sci. 2000. V. 35. P. 1315–1322.

Tinin M.V., Kravtsov Yu.A. Super — Fresnel resolution of plasma in homogeneities by electromagnetic sounding // Plasma Phys. Control. Fusion. 2008. V. 50. P. 12.

Kravtsov Yu.A., Tinin M.V., Knizhnin S.I. Diffraction tomography of inhomogeneous medium in the presence of strong phase variations // J. Communications Technology and Electronics. 2011. V. 56, N 7. P. 831–837(7).

Kravtsov Y.A., Tinin M.V., Makles K. Super Fresnel resolution of phase screen fine structure: tomography-like approach // Proc. of SPIE. 2008. V. 7141. P. 1–4.