

**КВАЗИОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ  
УДАЛЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ**

**М.В. Тинин, С.И. Книжин**

**THE QUASI-OPTIMAL PROCESSING TO IMPROVE THE DIAGNOSTIC RESOLUTION  
OF THE REMOTE IRREGULARITY**

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

Рассматривается диагностика неоднородностей, расположенных на относительно большом расстоянии от источника и наблюдателя, с помощью двойного взвешенного преобразования Фурье для удаленной неоднородности и преобразования Френеля. Приводятся результаты численного моделирования пространственной обработки сигнала, повышающей разрешающую способность диагностики неоднородных сред. С помощью однократного взвешенного фурье-преобразования получены фазовые проекции при условии сильных флуктуаций фазы.

The diagnostics of irregularities situated on a relatively large distance from the source and the observer is considered using the double weighted Fourier transform for a remote irregularity and the Fresnel transform. The results of numerical modeling of the spatial signal processing that improves the resolution of the diagnostics of inhomogeneous media are demonstrated. Through the using of the single weighted Fourier transform are obtained the phase projections in the case of strong phase fluctuations.

**Введение**

Одна из основных задач космической радиофизики заключается в диагностике ионосферы и тропосферы Земли. Понимание физических процессов, протекающих в этих неоднородных средах, необходимо для создания более совершенных систем радиосвязи и решения разнообразных радиофизических задач, связанных с распространением радиоволн в неоднородных средах. На сегодня существует множество методов диагностики тропосферы и ионосферы Земли. Наиболее известными являются радиозондирование, спутниковая радиотомография, радиозатменные измерения и др. [Куницын, 2006; Павельев и др., 2008]. Эти методы позволяют получать объективные данные о структуре ионосферы и тропосферы Земли. Однако разрешающую способность диагностических систем можно увеличить с помощью дополнительной обработки поля. При решении томографических задач возникают проблемы, связанные со структурой неоднородной среды, в которой распространяется сигнал. Например, при распространении сигнала в мелкомасштабных средах (масштаб которых не превосходит радиуса Френеля) часто приходится сталкиваться с такими явлениями, как дифракция и многолучевость, затрудняющими поиск физических характеристик неоднородных сред.

В ранее выполненных исследованиях было показано, что при использовании пространственной обработки поля на основе двойного взвешенного фурье-преобразования (ДВФП) можно получать фазовые проекции, устранив дифракционные и многолучевые эффекты [Tinin и др., 2008; Кравцов и др., 2011]. Основным недостатком данного метода является необходимость обработки поля по двум плоскостям – приема и излучения. В связи с этим для удаленной неоднородности было предложено использовать пространственную обработку поля на основе преобразования Френеля и метода ДВФП, выполненную только по плоскости приема [Тинин, 2012].

В данной работе рассматривается, как пространственная обработка поля на основе преобразования Френеля и метода ДВФП для удаленной неоднородности влияет на результаты томографических изме-

рений при сильных флуктуациях фазы и дифракционных эффектах.

**Преобразование Френеля и ДВФП для удаленной неоднородности**

В качестве модели сигнала, рассеянного на мелкомасштабной неоднородности, используем поле в приближении ДВФП [Tinin, Kravtsov, 2008]:

$$U(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = -A_0 k^2 \exp\left[ik\left(Z + \frac{(\mathbf{r} + \mathbf{r}_0)^2}{2Z}\right)\right] \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2\xi d^2\xi_0 \exp\left\{ik\left[2(\xi\xi_0 - \xi_0\mathbf{r} - \xi_0\mathbf{r})/Z + \varphi(\xi, \xi_0)\right]/(4\pi^3 Z^3)\right\}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{r}_0 = (z_0, x_0, y_0) = (z_0, \mathbf{r}_0)$  и  $\mathbf{r} = (z_t, x, y) = (z_t, \mathbf{r})$  – координаты местонахождения приемника и источника,  $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0)$  и  $\mathbf{r} = (x, y)$  – двумерные векторы в плоскостях  $z = z_0$  и  $z = z_t$ , фаза волны

$$\varphi(\xi, \xi_0) = 1/2 \int_{z_0}^{z_t} \varepsilon\left[\xi(z' - z_0)/Z + \xi_0(z_t - z')/Z, z'\right] dz', \quad (2)$$

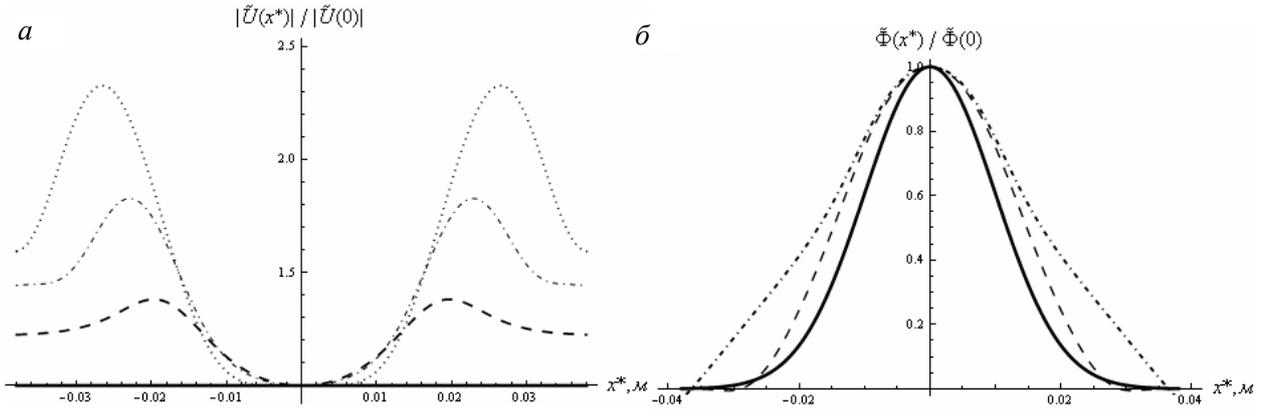
где  $Z = z_t - z_0$  – расстояние между плоскостями с источником и приемником,  $A_0$  – амплитуда падающей сферической волны,  $k = \omega/c$ ,  $\omega = 2\pi f$  – частота излучения,  $c$  – скорость света в свободном пространстве,  $\varepsilon(\mathbf{r}) = \varepsilon(\mathbf{r}) - 1$  – вариация диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(\mathbf{r})$ .

Допустим, что неоднородность находится в окрестности плоскости  $z = z_m$ . Перейдем в (1) к новым координатам  $\mathbf{r}_b, \mathbf{r}_s$ :

$$\begin{aligned} \xi_0 &= \mathbf{r}_b + \mathbf{r}_s(z_b - z_0), \\ \xi &= \mathbf{r}_b - \mathbf{r}_s(z_t - z_b), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $z = z_b$  – некоторая виртуальная плоскость в окрестности плоскости  $z = z_m$ . В переменных (3) выражение (1) переписывается как

$$U(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = \frac{-A_0 k^2}{4\pi^3 Z} \int_{-\infty}^{\infty} d^2\mathbf{r}_b \times \exp\left[ik\left(Z + \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_b)^2}{2(z_t - z_b)} + \frac{(\mathbf{r}_b - \mathbf{r}_0)^2}{2(z_b - z_0)}\right)\right] V_s(\mathbf{r}_b), \quad (4)$$



Нормализованные амплитуда (а) и фаза (б) рассеянной волны.

где

$$V_s(\mathbf{p}_b) = \int_{-\infty}^{\infty} d^2 p_s \exp[-ik2(\mathbf{p}_s - \mathbf{p}_{sc})^2 \times (z_t - z_b)(z_b - z_0) / Z + ik\varphi_b(\mathbf{p}_b, \mathbf{p}_s)], \quad (5)$$

$$\varphi_b(\mathbf{p}_b, \mathbf{p}_s) = 1/2 \int_{z_0}^{z_t} \tilde{\varepsilon}[\mathbf{p}_b + \mathbf{p}_s(z_b - z'), z'] dz', \quad (6)$$

$$\mathbf{p}_{sc} = [(\mathbf{p}_b - \mathbf{p}) / (z_t - z_b) - (\mathbf{p}_b - \mathbf{p}_0) / (z_b - z_0)] / 2. \quad (7)$$

Применив к выражению (4) преобразование Френеля

$$\hat{U}(\mathbf{p}^*, \mathbf{p}_0) = \hat{L}_b[U(\mathbf{p}, \mathbf{p}_0)] = C_0 \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \rho U(\mathbf{p}, \mathbf{p}_0) \exp\left[-ik \frac{(\mathbf{p}^* - \mathbf{p})^2}{2(z_t - z_b)} - ikZ\right], \quad (8)$$

получим

$$\hat{U}(\mathbf{p}^*, \mathbf{p}_0) = \frac{iC_0 A_0 k (z_t - z_b)}{2\pi^2 (z_b - z_0)} \times \exp[ik(\mathbf{p}^* + \mathbf{p}_0)^2 / (2(z_b - z_0))] \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \rho_b d^2 \rho_s \exp\left\{ik \left[2\rho_b^2 / (z_b - z_0) + 2\rho_s(\mathbf{p}_b - \mathbf{p}^*) - 2\rho_b(\mathbf{p}_0 + \mathbf{p}^*) / (z_b - z_0) + \varphi_b(\mathbf{p}_b, \mathbf{p}_s)\right]\right\}. \quad (9)$$

Выражение (8) позволяет получать сверхфренелевское разрешение [Тинин, 2012]. В отличие от обработки ДВФП, преобразование Френеля (8) выполняется только по плоскости приема. Однако выражение (8) содержит координату  $z_b$  виртуального экрана. Для того чтобы определить оптимальные значения  $z = z_b$ , при которых разрешение диагностической системы будет наилучшим, необходимо с помощью алгоритма (9) найти, при каких параметрах вариации амплитуды рассеянной волны минимальны [Тинин, 2012].

### Результаты численного моделирования

Пусть имеется источник радиосигнала и линейка приемников, регистрирующая рассеянное поле.

Между ними находится гауссова неоднородность, масштаб которой не превосходит радиуса Френеля:

$$\tilde{\varepsilon}(\mathbf{p}, z) = \varepsilon_m \exp\left\{-\left[(\mathbf{p} - \mathbf{p}_m)^2 + (z - z_m)^2\right] / 2l^2\right\}. \quad (10)$$

В качестве модели сигнала используем приближение ДВФП для удаленной неоднородности (4).

Обработав поле волны (4) с помощью преобразования Френеля (8) для различных параметров виртуального экрана, получим следующие результаты.

На панели *a* изображены нормализованные амплитуда и фаза рассеянной волны для различных значений  $z_b$  при следующих параметрах:  $x^* = x_0^*$ , в сечении  $y^* = y_0^* = 0$ ,  $x_m = z_m = 0$ ,  $\varepsilon_m = -0.15$ ,  $l = 1$  см,  $z_t = -5$  м,  $z_0 = 5$  м,  $\lambda = 2$  мм. В этом случае радиус Френеля  $a_F = 5.4$  см превышает размеры неоднородности. На панели *a* пунктирной линией показана амплитуда волны для случая, когда  $z_b = 3$  м, штрихпунктирная линия соответствует случаю  $z_b = 2$  м, штриховая линия –  $z_b = 1$  м и сплошная линия –  $z_b = 0$  м. Из рисунка видно, что при перемещении виртуального экрана  $z_b$  амплитудные вариации обработанного сигнала меняются. Чем ближе виртуальный экран  $z_b$  к месту локализации неоднородности  $z_m$ , тем меньше амплитудные вариации сигнала.

На панели *b* штрихпунктирной линией показана фаза рассеянной волны при  $z_b = 4$  м, штриховой линией – при  $z_b = 2$  м, сплошной – при  $z_b = 0$  м. При приближении виртуального экрана  $z_b$  к неоднородности  $z_m$  ширина фазовой проекции уменьшается, что соответствует увеличению разрешения.

### Заключение

Использование пространственной обработки поля на основе преобразования Френеля и метода ДВФП для удаленной неоднородности позволило получить сверхфренелевское разрешение. Результаты численного моделирования показали, что обработка поля дает увеличение разрешения в том случае, когда параметры виртуального экрана выбраны так, что амплитудные вариации рассеянной волны минимальны.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда «Династия», Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 8388 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры

инновационной России» на 2009–2013 годы), Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 12-02-00249 и № 12-05-31169), Совета по грантам Президента Российской Федерации (грант № СП-5862.2013.3) и Иркутского государственного университета (грант № 2012-02-02).

*СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

Кравцов Ю.А., Тинин М.В., Книжин С. И. Дифракционная томография неоднородной среды при сильных вариациях фазы // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56, № 7. С. 816–822.

Куницын В.Е. Дистанционное зондирование физических процессов в околоземной среде // Международная Байкальская молодежная школа по фундаментальной физике. Труды IX Конференции молодых ученых «Физические процессы в космосе и околоземной среде». Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2006. С. 3–9.

Павельев А.Г., Матюгов С.С., Яковлев О.И. Спутниковый глобальный мониторинг атмосферы и ионосферы // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53, № 9. С. 1081–1093.

Тинин М.В. Интегральное представление для поля волны, распространяющейся в крупномасштабной неоднородной среде // Известия вузов. Радиофизика. Т. 55, № 6. 2012. С. 431–439.

Tinin M.V., Kravtsov Yu.A. Super-Fresnel resolution of plasma in homogeneities by electromagnetic sounding // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2008. V. 50. doi:10.1088/0741-3335/50/3/035010.

*Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия*