

# ИССЛЕДОВАНИЕ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОВОЛНОВОЙ ТОМОГРАФИИ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ

<sup>1</sup>Гайкович К. П., <sup>1</sup>Гайкович П. К., <sup>2</sup>Максимович Е. С., <sup>2</sup>Бадеев В. А.

<sup>1</sup>Институт физики микроструктур Российской академии наук  
г. Нижний Новгород, ГСП-105, 603950, Россия  
тел.: +78314327920, e-mail: gai@ipm.sci-nnov.ru

<sup>2</sup>Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,  
г. Минск, Беларусь, E-mail: makhel@iaph.bas-net.by

**Аннотация** — Представлены результаты численного моделирования сканирующей микроволновой томографии диэлектрических объектов в грунте, основанной на решении соответствующей обратной задачи рассеяния по данным многочастотных измерений двумерного приповерхностного распределения рассеянного поля. Моделировалась томография как непрерывно распределенных неоднородностей комплексной диэлектрической проницаемости, так и однородных объектов прямоугольной формы. Результаты показали работоспособность алгоритма решения обратной задачи и позволили установить достижимую точность и качество рассматриваемой томографии на базе существующей измерительной аппаратуры.

## I. Введение

Рассматриваемый метод основан на теории сканирующей электромагнитной томографии, развитой в [1-4], а его моделирование нацелено на исследование возможностей и перспектив практической реализации подповерхностной томографии в СВЧ диапазоне, где уже были получены первые результаты [4].

## II. Теория

Ключевой особенностью в схеме измерений рассеянного поля (рис.1) является двумерное сканирование вдоль поверхности грунта над областью, содержащей неоднородности, при условии сохранения взаимного положения источника когерентного зондирующего сигнала и приемника (приемной и передающей антенн). При этом все наблюдаемые вариации измеряемой комплексной амплитуды сигнала связаны с полем, рассеянным подповерхностными неоднородностями.

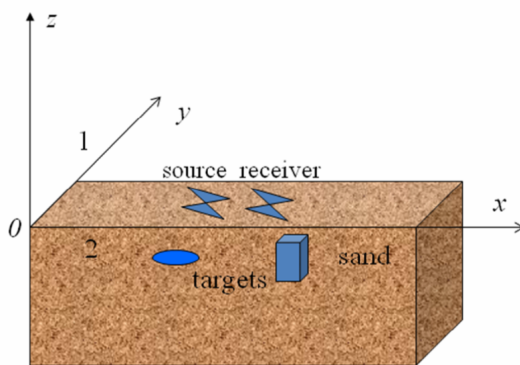


Рис. 1. Схема измерений.

Fig. 1. Scheme of measurements

Пусть рассеивающая неоднородность погружена в среду с комплексной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{0i}$ , так что с учетом трехмерной неоднородности ее распределение имеет вид  $\varepsilon(\mathbf{r}) = \varepsilon_{0i} + \varepsilon_1(\mathbf{r})$ . Принимаемый сигнал  $s$  представляет собой свертку аппаратной функции приемной системы  $F$  (плоская антенна) и распределения рас-

сеянного поля  $\mathbf{E}_1(x, y, \omega)$ . Его поперечный спектр (двумерное фурье-преобразование по  $x$  и  $y$ ) в рамках борновского приближения может быть представлен согласно [2-4] в виде:

$$\Delta s(k_x, k_y, \omega) = F_i(k_x, k_y, \omega) E_{li}(k_x, k_y, \omega) = \int_{z'} \varepsilon_1(k_x, k_y, z') \cdot \times i\pi\omega F_i(k_x, k_y, \omega) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_x + \kappa_x)\delta x + i(k_y + \kappa_y)\delta y} d\kappa_x d\kappa_y \cdot \times \left\{ \int_{z''} [j_i(-k_x - \kappa_x, -k_y - \kappa_y, z'' - z - \delta z) \cdot \times g_{ij}^{12}(k_x + \kappa_x, k_y + \kappa_y, z', z'')] g_{ji}^{21}(\kappa_x, \kappa_y, z, z') dz'' \right\} dz',$$

$g_{ji}^{lk}$ ,  $j_i$ -компоненты поперечного спектра функции (тензора) Грина и распределения излучающего тока. Уравнение Фредгольма 1-го рода (1) решается методом [3] обобщенной невязки в комплексном пространстве Соболева  $W_2^1$  для каждой пары спектральных компонент. Искомая трехмерная структура неоднородностей – результат томографии – определяется обратным преобразованием Фурье:

$$\varepsilon_1(x, y, z) = \iint \varepsilon_1(\kappa_x, \kappa_y, z) \exp(i\kappa_x x + i\kappa_y y) d\kappa_x d\kappa_y. \quad (2)$$

Глубинная чувствительность определяется как частотной зависимостью затухания поля в среде, связанной как с поглощением, так и с изменением масштаба проникновения ближнего поля. Если неоднородности расположены в ближней зоне антенн, возможно достижение субволнового разрешения.

## III. Численное моделирование

Моделировалась схема измерений, близкая к реализованной в эксперименте [4], где для восстановления неоднородностей в песке использовался набор измерений на 6 частотах в диапазоне  $\Delta f = 1,7 - 7$  ГГц. Для приема и передачи использовались две идентичные bow-tie антенны. В моделировании использовалось близкое по размерам распределение плотности излучающего тока (прямоугольное 3X4 см однокомпонентное) и идентичная по размерам приемная антенна на расстоянии  $\Delta x = 4$  см, так что ее передаточная функция полагалась равной поперечному спектру излучающего тока  $F_i(k_x, k_y, \omega) = j_i(k_x, k_y, \omega)$ . Неоднородности диэлектрической проницаемости моделировались непрерывным распределением (реальная часть – гауссовой формы; мнимая – кольцевое распределением

вокруг области максимума реальной части) и однородным распределением (с одинаковой действительной и мнимой частью) внутри прямоугольника 6x12x8 см. Максимальная величина гауссовой неоднородности и величина действительной и мнимой части полагались равными 1. На рис.2 представлено распределение рассеянного поля по оси  $x$  через центр неоднородностей в зависимости от частоты.

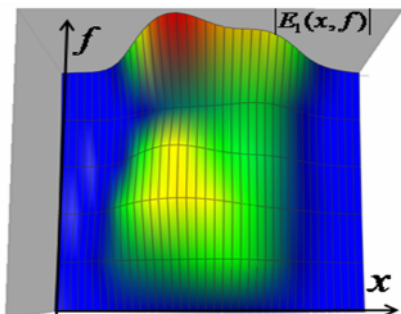


Рис. 2. Распределение рассеянного поля в интервале 8 см по оси  $x$  и от 1,7 до 7 ГГц по частоте.

Fig. 2. Scattered field distribution in range  $\Delta x = 40$  cm,  $\Delta f = 1,7 - 7$  GHz

На рис.3-4 представлены результаты томографии при интегральной точности данных 5% - горизонтальный разрез на глубине 6 см.

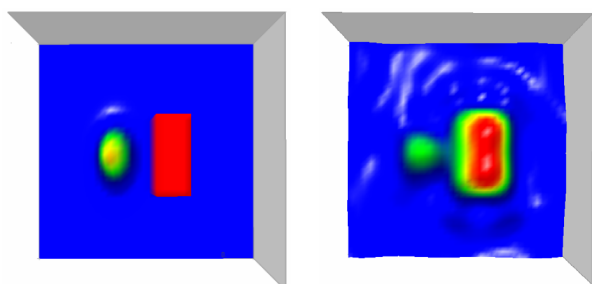


Рис. 3.  $\varepsilon'(x, y, z = -6$  см). Слева – начальное распределение в области 40x40 см.; справа – результат томографии.

Fig. 3.  $\varepsilon'(x, y, z = -6$  см). Right, initial distribution in range 40x40 cm ; left, result of tomography

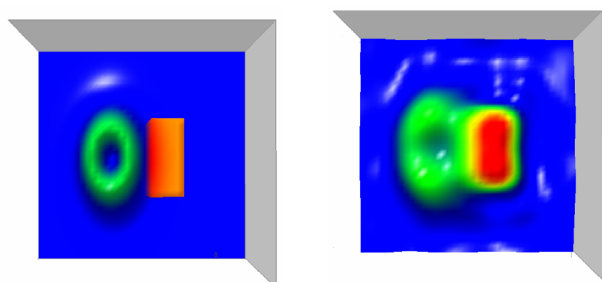


Рис. 4.  $\varepsilon''(x, y, z = -6$  см). Слева – начальное распределение в области 40x40 см.; справа – результат томографии.

Fig. 4.  $\varepsilon''(x, y, z = -6$  см). Right, initial distribution in range 40x40 cm; left, result of tomography

#### IV. Заключение

Численное моделирование алгоритма решения обратной задачи рассеяния в методе микроволновой

томографии подповерхностных неоднородностей диэлектрической проницаемости продемонстрировало возможность восстановления различных по форме и локализации трехмерных структур.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 08-02-00117 и Программы ОФН РАН.

#### V. Список литературы

- [1] Gaikovich K. P. Subsurface near-field scanning tomography // Physical Review Letters, 2007, Vol.98. P.183902.
- [2] Gaikovich K. P., Gaikovich P. K. Inverse problem of scattering for inhomogeneous layered media (invited) // in Proc. ICTON 2008, Athens, Greece, 22-26 June 2008, IEEE, 2008, P. 246-249.
- [3] Gaikovich K. P. Inverse scattering problem in Hilbert space (invited) // in Proc. ICTON 2010, Munich, Germany, 27 June – 1 July 2010, IEEE, 2010.
- [4] Gaikovich K. P., Gaikovich P. K., Maksimovitch Ye. S., Badeev V. A., Mikhnev V. A. Near-field microwave tomography // in Proc. of 7th International Conference on Antenna Theory and Technique (6-9 October, 2009 Lviv, Ukraine), Publishing House of Lviv Politechnic, pp. 262-264.

### STUDY OF SCANNING MICROWAVE TOMOGRAPHY OF SUBSURFACE TARGETS

<sup>1</sup> Gaikovich K. P., Gaikovich P.K.,  
<sup>2</sup> Maksimovitch Ye. S., Badeev V.A.

<sup>1</sup> Institute for Physics of Microstructures RAS  
GSP-105, Nizhny Novgorod, 603950, Russia  
Ph.: +78314327920, e-mail: gai@ipm.sci-nnov.ru

<sup>2</sup> Institute of Applied Physics National Academy of  
Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
E-mail: makhel@iaph.bas-net.by

**Abstract** — Results of numerical simulation of the scanning microwave tomography of dielectric objects based on the inverse scattering problem solution by 2D data of multi-frequency near-surface microwave measurements are presented. Modeling has been carried out both for continuously distributed inhomogeneities of the complex permittivity and for homogeneous rectangular objects. Results demonstrate the reliability of the algorithm of the inverse problem solution and make it possible to determine the achievable accuracy and quality of the considered tomography with the available equipment.

#### I. Introduction

The considered method of electromagnetic scanning tomography is based on the theory [1-4] and experiment [4]. The presented study determines possibilities of applications.

#### II, III. Main Part

The key point of the measurement scheme (Fig.1) is the 2D scanning along the surface above the region of subsurface inhomogeneities at the fixed source-receiver position. Multi-frequency measurements in the region 1.7 – 7 GHz determine the depth sensitivity. The lateral spectrum of the received signal is expressed as a Fredholm integral equation of the 1-st kind (1) relative to the lateral spectrum of permittivity perturbation  $\varepsilon_1(\kappa_x, \kappa_y, z)$ , where  $g_{ji}^{lk}$ ; and  $j_i$  are components of the Green function and source current components,  $F$  is the transfer function. It is solved using the method of generalized discrepancy developed in [3]. The scattered field distribution and results of the tomography simulation (with parameters, similar to those used in [4]) are shown in Figs. 2-4.

#### IV. Conclusion

The numerical simulation of the algorithm of the inverse problem solution in the method of microwave tomography of subsurface inhomogeneities of permittivity demonstrates the possibility to retrieve 3D structures of various forms and localization.