

МИКРОВОЛНОВАЯ ПОДПОВЕРХНОСТНАЯ ТОМОГРАФИЯ И ГОЛОГРАФИЯ

¹Гайкович К. П., ²Максимович Е. С., ²Бадеев В. А.

¹Институт физики микроструктур Российской академии наук
г. Нижний Новгород, ГСП-105, 603950, Россия
тел.: +7 831-4327920, e-mail: gai@ipm.sci-nnov.ru

²Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси
г. Минск, Беларусь, тел.: +37 517-2842439, E-mail: makhel@iaph.bas-net.by

Аннотация — Исследуется метод ближнеполюсной многочастотной сканирующей томографии и голографии подповерхностных диэлектрических объектов, основанный на решении соответствующей обратной задачи ближнеполюсного рассеяния для псевдоимпульса, синтезированного по данным многочастотных измерений двумерного распределения рассеянного поля у поверхности среды над областью неоднородностей.

I. Введение

Рассматриваемый метод реализует идею ближнеполюсной сканирующей электромагнитной томографии [1], позволяющей реализовать субволновую разрешающую способность, в рамках подхода к решению соответствующей обратной задачи рассеяния [2]. Этот подход основан на разложении функций Грина, определяющих ядро интегрального уравнения для рассеянного поля, в спектр по поперечным координатам и способе сканирования жестко связанной системой источник-приемник. При этом структура зондирующего поля относительно приемника остается неизменной, все вариации сигнала связаны только с полем, рассеянным на неоднородности, а исходное трехмерное интегральное уравнение может быть сведено к решению одномерного уравнения для глубинного профиля поперечного спектра неоднородностей. Таким образом, рассматриваемая обратная задача, как и многие задачи дистанционного зондирования [3], состоит в решении интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода. Многочастотные измерения рассеяния когерентного сигнала в широкой полосе частот обеспечивают глубинную чувствительность. В [4] было предложено трансформировать частотную зависимость этого уравнения во временную область, чтобы существенно уменьшить влияние зашумленности данных, связанной с поверхностным рассеянием, и качественно улучшить глубинную чувствительность метода. В данной работе анализируются экспериментальные результаты его исследования.

II. Теория

Пусть имеется рассеивающая трехмерная неоднородность комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_1(\mathbf{r})$ в среде с ε_0 . Исходными данными для анализа является двумерное распределение вариаций сигнала у поверхности среды над неоднородностью, измеренное на ряде частот. Комплексные амплитуды электромагнитного поля на каждой из частот зондирования могут быть представлены суммой зондирующего и рассеянного полей $\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = \mathbf{E}_0(\mathbf{r}, \omega) + \mathbf{E}_1(\mathbf{r}, \omega)$. Для схемы измерений с фиксированным относительным положением приемной и передающей антенн, поперечный спектр принимаемого сигнала (двумерное фурье-преобразование по x и y) в борновском приближении может быть пред-

ставлен как интеграл от глубинного профиля поперечного спектра неоднородностей в виде [2, 4]:

$$s(k_x, k_y, \omega) = \int_{z'} \varepsilon_1(k_x, k_y, z') K(k_x, k_y, z', \omega) dz'. \quad (1)$$

Интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода (1) должно решаться для каждой пары спектральных компонент. Для искомым функций в комплексном гильбертовом пространстве был разработан регуляризирующий алгоритм решения [2], основанный на принципе обобщенной невязки Тихонова. Искомое трехмерное распределение (результат томографии) получается путем двумерного обратного фурье-преобразования полученного спектра. В [2] было показано, что в рамках решения уравнения типа (1) возможна и коррекция за пределами борновского приближения.

Практическая реализация этого метода оказалась невозможной из-за сильных искажений, вносимых в измерения рассеянием на поверхностных неоднородностях. Проблему решила трансформация (1) к эквивалентной задаче во временной области [4]:

$$s(x, y, t) = \int_0^\infty s(x, y, \omega) \exp(i\omega t) d\omega, \quad (2)$$

что позволило разделить вклад поверхностного рассеяния от рассеяния на зондируемом объекте в эквивалентном псевдоимпульсе, который с учетом замены $s(x, y, z_s) = s(x, y, t = z_s \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon} / c)$ временного аргумента на параметр эффективной глубины рассеяния z_s имеет вид:

$$s(k_x, k_y, z_s) = \int_{z'} \varepsilon_1(k_x, k_y, z') K(k_x, k_y, z', z_s) dz', \quad (3)$$

Оказалось, что это визуализация (3) позволяет получить отчетливое изображение рассеивающих объектов в грунте и определить область локализации неоднородности для последующего решения обратной задачи, что и было продемонстрировано в [4]. Для объектов с однородной внутренней структурой ($\varepsilon_1(\mathbf{r}) = \varepsilon_1^0$) решение (4) можно непосредственно использовать для определения формы объекта (компьютерной голографии) из решения трансцендентного комплексного уравнения, эквивалентного системе двух действительных уравнений в виде двух функций $x_1(y, z)$, $x_2(y, z)$:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(k_x, y', z) &= \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon_1(k_x, k_y, z) \exp(ik_y y') dk_y \\ &= \frac{\varepsilon_1^0}{2\pi i k_x} (e^{-ik_x x_1(y', z)} - e^{-ik_x x_2(y', z)}). \end{aligned} \quad (4)$$

III. Эксперимент

Метод исследовался на сплошных и распределенных тестовых объектах [4]. Измерения выполня-

лись с помощью приемно-передающей сканирующей системы, состоящей из двух идентичных жестко связанных антенн Вивальди и векторного анализатора цепей Agilent E5071B, который позволял излучать зондирующий сигнал на 801 частоте в диапазоне 1,7 – 7 ГГц и измерять комплексные амплитуды рассеянного на неоднородностях поля. Ядро интегрального уравнения (3) определялось из эксперимента с тонкими образцами из пенопласта, имеющих квадратное сечение, с шагом по глубине 0,5 – 1 см. На рис.1 можно видеть распределение функции ядра в зависимости от глубины и параметра эффективной глубина рассеяния для одной из пар поперечных волновых чисел, полученное из эксперимента, в сравнении с результатом аналитического расчета.

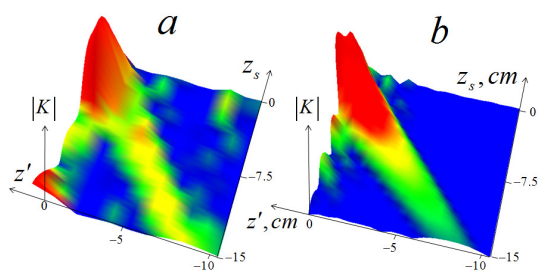


Рис. 1. Ядро (3). а) эксперимент; б) расчет.

Fig. 1. Kernel of Eq. (3). (a) experiment; (b) calculation

Можно видеть, что ядро (3), в отличие от ядра (1), обладает глубиной селективностью. Экспериментальное распределение имеет максимум вблизи поверхности при больших значениях z_s , который может объясняться влиянием многократного рассеяния на образцах, использованных для калибровки.

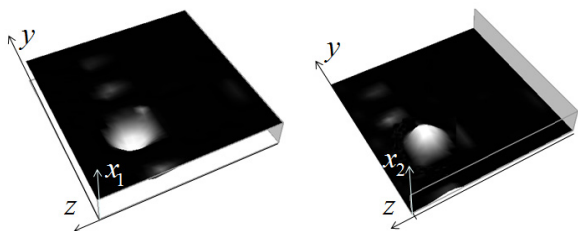


Рис. 2. Голографическое изображение эпоксидного шара в грунте, полученное из (4).

Fig. 2. The holography image of an epoxy sphere buried in the sandy ground obtained from Eq.(4)

На рис.2 представлены результаты голографии биллиардного (эпоксидного) шара в песчаном грунте на глубине $z = -4$ см в виде функций $x_1(y,z)$, $x_2(y,z)$, демонстрирующие эффективность метода.

IV. Заключение

Выполненные исследования показывают перспективность рассмотренного метода микроволновой диагностики подповерхностных диэлектрических объектов.

Работа выполнена при поддержке Программы ОФН РАН и гранта РФФИ-БРФФИ (№ 12-02-90028_Бел-а, № Т12Р-133).

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 near-field scattering in multilayer media // Inverse Problems. 2010. Vol. 26. No 12. P. 125013.
- [3] Gaikovich K. P. Inverse Problems in Physical Diagnostics. New York: Nova Science Publishers Inc., 2004. 372 p.
- [4] Gaikovich K. P., Gaikovich P. K., Maksimovitch Ye. S., Badeev V. A. Pseudopulse near-field subsurface tomography // Physical Review Letters. 2012. Vol.108. P.163902.

MICROWAVE SUBSURFACE TOMOGRAPHY AND HOLOGRAPHY

¹Gaikovich K. P., ²Maksimovitch Ye. S., ²Badeev V. A.

¹Institute for Physics of Microstructures RAS
GSP-105, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

Ph.: +7 831-4327920, e-mail: gai@ipm.sci-nnov.ru

²Institute of Applied Physics National Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Ph.: +37 517-2842439, e-mail: makhel@iaph.bas-net.by

Abstract — Method of scanning tomography and holography of subsurface dielectric objects based on inverse scattering problem solution for the pseudopulse synthesized by multifrequency measurements of scattered field is studied.

I. Introduction

The near-field scanning tomography [1] in frameworks of the approach [2] (scanning at the fixed source-receiver distance) to the inverse scattering problem is studied. At that, initial 3D integral equation is reduced to the one dimensional integral Fredholm equation of the 1st kind [3] relative to the depth profile of the transversal spectrum of the permittivity of inhomogeneities. Multifrequency measurements provide the depth sensitivity. To avoid the noise related to the surface scattering and improve the depth selectivity, it was proposed to transform multifrequency data in time domain [4]. In this paper results of the experimental study are given.

II, III. Main Part

The transversal spectrum of the measured signal (2D Fourier transform over x and y) can be expressed as the integral (1) of the depth profile of the transversal spectrum of permittivity perturbation [2,4]. The inverse scattering problem is based on the solution of (1) as an integral Fredholm equation of the 1-st kind. To overcome difficulties related to the noise introduced by surface scattering, the signal has been transformed in time domain (2) that leads to the new equation (3) that depends on the effective depth of scattering z_s . For targets with a homogeneous internal structure, the solution of (3) can be used directly to obtain their shapes (i.e., for computer holography) from the solution of (4) as functions $x_1(y,x)$, $x_2(y,z)$.

The method has been studied for various targets [4]. Measurements of signal complex amplitudes for 801 frequencies in the region of 1.7 – 7.0 GHz obtained by 2D lateral scanning have been used in the analysis. The source-receiver system based on the vector network analyzer Agilent E5071B includes two identical transmitting and receiving antennas. They were scanning in the rectangle x - y area above buried targets.

In fig.1 the kernel of (3) is given (both experimental and calculated) for a pair of k_x, k_y from its lateral spectrum..

In fig.2 results of tomography and holography are demonstrated for a billiard ball (epoxy sphere) buried in the sandy ground at the depth $z = -4$ cm.

IV. Conclusion

The feasibility of the considered method of the subsurface microwave diagnostics of dielectric targets has been shown.