

МИКРОВОЛНОВАЯ СКАНИРУЮЩАЯ ТОМОГРАФИЯ СЛАБОКОНТРАСТНЫХ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ

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

¹*Институт физики микроструктур Российской академии наук*

г. Нижний Новгород, ГСП-105, 603950, Россия

e-mail: gai@ipm.sci-nnov.ru

²*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,*

г. Минск, Беларусь, E-mail: makhel@iaph.bas-net.by

Представлены результаты экспериментального исследования метода сканирующей микроволновой томографии неоднородностей комплексной диэлектрической проницаемости в грунте, основанного на решении соответствующей обратной задачи рассеяния по данным многочастотных измерений двумерного распределения рассеянного поля у земной поверхности над областью неоднородностей.

Методы активного и пассивного электромагнитного зондирования подповерхностной структуры параметров различных сред получают все большее развитие, что, в свою очередь, предполагает развитие методов решения соответствующих обратных задач [1], которые, как правило, сводятся к решению интегральных уравнений. Среди этих задач наиболее сложными являются задачи томографии (восстановление трехмерных структур). В данной работе метод сканирующей электромагнитной томографии [2], развитый в [3] применительно к измерениям комплексных амплитуд поля, применен в многочастотной СВЧ томографии комплексной диэлектрической проницаемости подповерхностных неоднородностей в грунте. Исходные данные для анализа включают двумерное распределение рассеянного поля, измеренное вдоль поверхности над зондируемой неоднородностью на ряде частот. Зависимость эффективной глубины формирования сигнала от частоты, обусловленная частотной зависимостью как поглощения в среде, так и масштаба затухания ближнеполюсных компонент зондирующего сигнала, определяет глубинную чувствительность.

Соответствующая обратная задача рассеяния сводится к решению интегрального уравнения 1-го рода и решается методом, предложенным в [3]. Этот метод основан на разложении функций Грина, определяющих ядро уравнения, в спектр по поперечным координатам и способе сканирования жестко связанной системой источник-приемник. При этом структура зондирующего поля относительно приемника остается неизменной, поэтому все вариации сигнала связаны только с полем, рассеянным на неоднородности, а соответствующее трехмерное интегральное уравнение может быть сведено к решению одномерного уравнения для глубинного профиля поперечного спектра неоднородностей. Это позволяет преодолеть принципиальные ограничения разрешающей

способности, накладываемые многомерностью исходного уравнения. Первые результаты экспериментального исследования данного метода томографии неоднородностей в грунте были представлены в [4,5].

Пусть имеется рассеивающая трехмерная неоднородность комплексной диэлектрической проницаемости ε_1 в среде с ε_0 (среда может быть многослойной), т.е. $\varepsilon(\mathbf{r}) = \varepsilon_0 + \varepsilon_1(\mathbf{r})$. Электромагнитное поле может быть представлено как сумма зондирующего и рассеянного полей $\mathbf{E}(x, y, \omega) = \mathbf{E}_0(x, y, \omega) + \mathbf{E}_1(x, y, \omega)$. Вариации рассеянного сигнала s пропорциональны свертке передаточной функции приемника F и рассеянного поля $\mathbf{E}_1(x, y, \omega)$. Для предлагаемой схемы измерений с фиксированным вектором $\delta\mathbf{r}$, определяющим сдвиг между приемной и передающей антеннами (идентичные плоские bow-tie антенны), поперечный спектр измеренного сигнала (двумерное фурье-преобразование по x и y) в борновском приближении может быть представлен в виде [3]:

$$s(k_x, k_y, \omega) = 4\pi^2 F_i(k_x, k_y, \omega) E_{1i}(k_x, k_y, \omega),$$

$$E_{1i}(k_x, k_y, z, \delta\mathbf{r}) = -4\pi^3 i\omega \int_{z'} \varepsilon_1(k_x, k_y, z') \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik_x \delta x - ik_y \delta y} \right. \quad (1)$$

$$\left. \times \int_{z''} [j_i(\kappa_x, \kappa_y, z'' - z - \delta z) G_{ij}^{12}((\kappa_x, \kappa_y, z', z''))] G_{ji}^{21}(\kappa_x + k_x, \kappa_y + k_y, z, z') d\kappa_x d\kappa_y dz'' dz', \right.$$

где G_{ji}^{lk} - компоненты соответствующих функций Грина в k -пространстве, j_i - спектр распределения излучающего тока источника. Для его вычисления в положении антенны над поверхностью грунта использовался пакет CST Microwave Studio. Предполагалось, что из условия взаимности для идентичных приемной и передающей антенн передаточная функция приемника пропорциональна этому распределению ($F_i(k_x, k_y, \omega) = const j_i(k_x, k_y, \omega)$). Интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода (1) решалось для каждой пары спектральных компонент с помощью регуляризирующего алгоритма, основанного на принципе обобщенной невязки в комплексном гильбертовом пространстве W_2^1 , разработанном в [3]. Искомое трехмерное распределение (результат томографии) получалось путем обратного фурье-преобразования полученного спектра.

Измерения поля, рассеянного неоднородным инородным включением в песчаном грунте (куском тающего льда с размерами $10 \times 10 \times 4$), зарытым на глубину 9 см от поверхности, выполнялись с помощью векторного анализатора Agilent E5071B и приемно-передающей системы из двух идентичных жестко связанных широкополосных диполей типа «bow-tie», центры которых разнесены на 7,5 см, а расстояние между широкой частью плеча диполя – 2 см. Данные двумерного сканирования регистрировались на 801 частоте в диапазоне от 1,7 to 7,0 ГГц, что обеспечивало глубинную чувствительность измерений. В алгоритме восстановления трехмерного распределения комплексной диэлектрической проницаемости использовались данные на 6

выбранных частотах: 1,7; 2,76; 3,82; 4,88; 5,94 и 7,0 ГГц. Для уменьшения величины случайной составляющей погрешности измерений данные усреднялись по 20 ближайшим частотам вокруг каждой из 6 частот, выбранных для анализа. Результаты томографической визуализации, полученные на основе решения обратной задачи рассеяния, демонстрируют качественное согласие с ожидаемым распределением диэлектрических параметров.

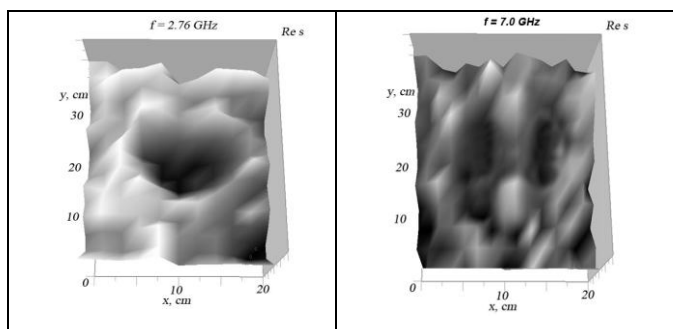


Рис. 1. Результаты двумерного сканирования для двух частот.

На рис. 1 показаны измеренные распределения вариаций сигнала над объектом на частотах 2,76 и 7 ГГц, из которых можно видеть, что измерения чувствительны к неоднородности. Видно также, что уровень случайной погрешности в данном случае достаточно велик, поэтому и была использована возможность усреднения сигнала по 20 частотам вокруг 6 частот, выбранных для анализа. Поскольку в диапазоне усреднения частота меняется незначительно, такое усреднение не приводит к необходимости учета этого изменения в ядре решаемого уравнения.

Полученные таким образом данные были использованы для решения интегрального уравнения (1) относительно глубинного профиля поперечного спектра вариаций комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_1(k_x, k_y, z)$ для каждой пары спектральных компонент. Далее, путем обратного преобразования Фурье восстанавливалось искомое трехмерное распределение вариаций диэлектрической проницаемости $\varepsilon_1(x, y, z)$ в зондируемой области. На рис. 2 показано распределение действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости в вертикальном сечении через центр неоднородной области, а на рис. 3 – горизонтальное сечение на глубине 9 см.

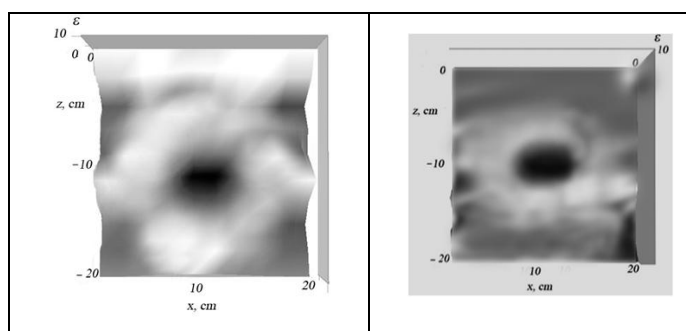


Рис. 2. Вертикальное сечение неоднородности (томограмма) при $y = 16$ см. Слева $\text{Re } \varepsilon_1(x, z)$; справа $\text{Im } \varepsilon_1(x, z)$.

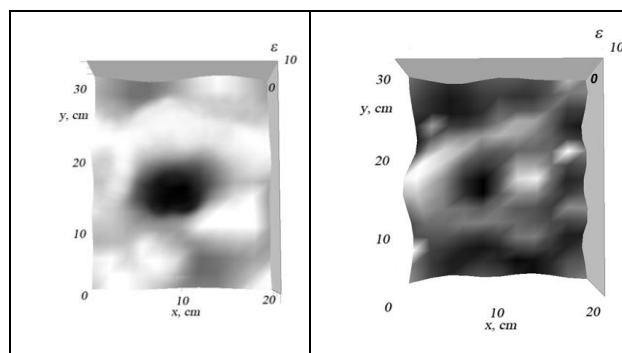


Рис. 3. Горизонтальное сечение неоднородности (томограмма) на глубине $z = -9$ см.

Слева – распределение $\text{Re } \varepsilon_1(x, y)$; справа – $\text{Im } \varepsilon_1(x, y)$.

Последовательное применение метода предполагает отлаженную процедуру калибровки по тестовым объектам. Поскольку такая процедура еще не была отработана, в данном случае для привязки минимальных и максимальных значений в восстановленном распределении использовались известные величины диэлектрических параметров льда и песка. Полученные таким образом результаты томографической визуализации (рис. 2, 3) позволяют видеть, что имеется качественное соответствие с ожидаемыми распределениями параметров. Действительно, на глубине расположения зондируемого объекта имеется область низких значений диэлектрических параметров, характерных для льда, а вокруг имеется кольцевая область повышенных значений, характерных для песка, увлажняемого водой, диффундирующей от тающего льда.

Результаты получены при поддержке РФФИ (проект № 09-02-00044) и программы ОФН РАН.

Литература

1. Gaikovich K. P. 2004, *Inverse Problems in Physical Diagnostics*, Nova Science Publishers Inc., New York.
2. Gaikovich K. P. 2007, *Phys. Rev. Lett.* **98**, p. 183902; *Phys. Rev. Lett.* **98**, p. 269902.
3. Gaikovich K.P., Gaikovich P.K. *Inverse Problems* 2010, **26**, No.12, p. 125013.
4. Gaikovich K. P., Gaikovich P. K., Maksimovitch Ye. S., Badeev V. A., Mikhnev V. A. in *Proc. of 7th Int. Conf. on Antenna Theory and Technique* (6-9 October, 2009 Lviv, Ukraine), Lviv, p. 262.
5. Gaikovich K.P., Gaikovich P.K., Maksimovitch Ye.S., Badeev V.A. in *Proc. of 5th Int. Conf. "Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals"* (6-10 September, 2010, Sevastopol, Ukraine), Sevastopol, p. 156.