

О БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ СВЧ ДИАГНОСТИКЕ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Гайкович К.П.^{1,2}, Максимович Е.С.³, Бадеев В.А.³

¹ Институт физики микроструктур Российской академии наук, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

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

³ Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск

Анализируются возможности создания системы импульсной СВЧ диагностики трехмерных распределений комплексной диэлектрической проницаемости подповерхностных диэлектрических неоднородностей. Диагностика основана на решении обратной задачи ближнеполюсного рассеяния по данным двумерного сканирования приемо-передающей системой, созданной на основе импульсного генератора, передающего сигнал в форме моносинуса, осциллоскопа GZ20E и широкополосных диполей, расположенных в бистатической конфигурации. Исследуемый подход направлен на создание нового метода неинвазивной томографии субволнового разрешения для возможных приложений в медико-биологической диагностике и дефектоскопии. В работе предлагается алгоритм решения обратной задачи рассеяния, и приводятся результаты первых экспериментов по зондированию тестовых подповерхностных объектов в ближней зоне импульсного сигнала со средней частотой спектра 3,5 ГГц.

Введение

Ближнеполюсная СВЧ диагностика основана на решении обратной задачи рассеяния по данным СВЧ измерений поля, рассеянного диэлектрическими объектами на глубине порядка размеров ближнего поля для наибольшей длины волны частотного диапазона зондирующего сигнала. Диагностика включает возможности компьютерной томографии (получения трехмерного (3D) распределения) комплексной диэлектрической проницаемости распределенных подповерхностных неоднородностей и голографии (определения формы поверхности) сплошных диэлектрических объектов. Ближнеполюсные измерения привлекают возможностью выхода за релеевское ограничение разрешающей способности, что является единственным способом в случае, когда переход к более коротковолновому диапазону невозможен из-за сильного ослабления в среде. Эта возможность была бы особенно востребованной в медико-биологических приложениях. В работах [1-4] были развиты различные подходы к такой диагностике, основанные на измерениях рассеянного сигнала в двумерной области над областью среды с подповерхностными неоднородностями при ее зондировании непрерывным гармоническим сигналом. Также, до некоторой степени аналогичные подходы в настоящее время развиваются с целью получения двумерных радиологических изображений поверхности металлических неоднородностей [5]. Для диагностики трехмерных неоднородностей недостаточно данных двумерного сканирования, поэтому глубинную чувствительность обеспечивают измерения в зависимости от третьего параметра. В [1-4] были предложены методы, в которых в качестве такого параметра использовались частота сигнала, размер апертуры приемной антенны или расстояние от уровня сканирования до поверхности среды.

В данной работе развивается новый подход к ближнеполюсной сканирующей томографии, основанный на использовании импульсного зондирующего сигнала, где глубинную чувствительность определяет временная зависимость рассеянного импульса. В нем используется схема измерений, предложенная в [2], в которой измерения в двумерной области над неоднородностью выполняются с помощью жестко связанной системы “источник-приемник”. Такая схема, использованная в [2-4], приводила 3D уравнение для рассеянного сигнала в борновском приближении к уравнению типа свертки, редуцируемому к одномерному интегральному уравнению, которое решалось для каждой пары волновых чисел двумерного поперечного спектра. Это позволило преодолеть принципиальные ограничения численного решения на размерность, возникающие в трехмерных задачах. Было также показано, что этот подход позволяет получать и некоторую коррекцию к решению в борновском приближении. Поперечные спектры функций Грина, образующие ядро решаемых уравнений, были получены в [2] в явном виде. Там же был апробирован и метод решения таких уравнений Фредгольма

1-го рода для комплекснозначных функций в пространстве Соболева W_2^1 , основанный на принципе обобщенной невязки. Описанный метод томографии был реализован в эксперименте для метода многочастотной подповерхностной СВЧ томографии неоднородностей в грунте [3,4], где оказалось возможным получить томографические и голографические изображения субволнового разрешения диэлектрических объектов в слабо поглощающих средах до глубин около 10 см.

В данной работе выполнена постановка обратной задачи рассеяния для предлагаемой ближнеполюсной импульсной СВЧ диагностики, приводится соответствующая математическая теория, и предлагаются алгоритмы методов томографии и голографии. Приводятся также первые результаты экспериментов по зондированию подповерхностных неоднородностей. Среди возможных применений этой методики весьма важными представляются ее использование в дефектоскопии и медико-биологических приложениях.

Теория

Предлагаемая ближнеполюсная диагностика основана на решении обратной задачи рассеяния по данным измерений двумерного распределения связанных с неоднородностью вариаций комплексных амплитуд принимаемого сигнала $s(\mathbf{r}_r, t)$ по поперечным координатам x_r и y_r , измеряемого при сканировании на уровне z_r (\mathbf{r}_r – вектор, определяющий положение приемника). Эти вариации связаны с вариациями рассеянного поля, распределение которого в среде с неоднородностями можно определить с использованием формализма функций Грина, которые, к сожалению, известны лишь для монохроматического сигнала [2]. В этой связи, естественным представляется использовать в анализе разложение импульсного сигнала, заданного в интервале Δt , в частотный спектр:

$$s(\mathbf{r}_r, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Delta t} s_1(\mathbf{r}_r, t) \exp(-i\omega t) dt, \quad (1)$$

который имеет вид свертки по поперечным координатам рассеянного поля с передаточной функцией измерительной системы:

$$s(\mathbf{r}_r, \omega) = \int \mathbf{E}(\mathbf{r}', \omega) \mathbf{F}(x_r - x', y_r - y', z_r, z', \omega) dx' dy' dz' \quad (2)$$

Выполняя двумерное преобразование Фурье по поперечным координатам x_r и y_r , получаем интегральное соотношение для поперечного спектра трансформированного сигнала:

$$s(k_x, k_y, \omega) = \int \mathbf{E}(k_x, k_y, \omega, z') \mathbf{F}(k_x, k_y, \omega, z') dz' \quad (3)$$

Поперечный спектр рассеянного поля для рассматриваемого случая сканирования жестко связанной системой источник-приемник, взаимное положение которых определяется вектором $\delta \mathbf{r}$, был получен в [2]:

$$E_i(k_x, k_y, \omega, z, \delta \mathbf{r}) = -4\pi^3 i \omega \int_{z'} \varepsilon_1(k_x, k_y, z') \left\{ \iint e^{-ik_x \delta x - ik_y \delta y} \times \int_{z''} [j_i(\kappa_x, \kappa_y, z'' - z - \delta z, \omega) G_{ij}^{12}(\kappa_x, \kappa_y, z'', z', \omega)] G_{ji}^{21}(\kappa_x + k_x, \kappa_y + k_y, z', z, \omega) d\kappa_x d\kappa_y dz'' \right\} dz'. \quad (4)$$

Подставляя (4) в формулу (3), имеем интегральное уравнение:

$$s(k_x, k_y, \omega) = \int_{z'} \varepsilon_1(k_x, k_y, z') K(k_x, k_y, z', \omega) dz, \quad (5)$$

$$K(k_x, k_y, z', \omega) = -4\pi^3 i \omega \int_z \left\{ F_i(k_x, k_y, z, \omega) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik_x \delta x - ik_y \delta y} \times \int_{z''} [j_i(\kappa_x, \kappa_y, z'' - z - \delta z, \omega) G_{ij}^{12}(\kappa_x, \kappa_y, z'', z', \omega)] G_{ji}^{21}(\kappa_x + k_x, \kappa_y + k_y, z', z, \omega) d\kappa_x d\kappa_y dz'' \right\} dz, \quad (6)$$

ядро которого K выражается через компоненты поперечного спектра тока \mathbf{j} и функций Грина G_{ij}^{12}, G_{ij}^{21} для волн, распространяющихся из среды 1 в среду 2 и обратно [2]. Интегральное уравнение (6) формально совпадает с уравнением, которое лежит в основе метода многочастотного ближнеполюсного зондирования [2-4], однако в данном случае исходные данные для решения обратной задачи (6) получаются путем разложения импульсного сигнала в частотный спектр. При численном решении такой задачи параметрами становятся шаг разложения по частоте и ширина

спектрального интервала анализа $\Delta\omega$. Учитывая, что сигнал является действительной величиной, в решении (6) может использоваться только положительная часть спектра сигнала.

Для решения (5) может применяться алгоритм метода обобщенной невязки для комплекснозначных функций, развитый в [2]. В результате из решения в k -пространстве задачи (5) путем обратного фурье-преобразования получается решение задачи томографии – искомая трехмерная структура комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon_1(x, y, z) = \iint \varepsilon_1(k_x, k_y, z) \exp(ik_x x + ik_y y) dk_x dk_y. \quad (7)$$

Используя аналогию математического аппарата, так же, как в методе многочастотного СВЧ зондирования [3,4], можно предложить метод компьютерной голографии (восстановления формы поверхности) сплошных, внутренне однородных объектов, которые чаще всего встречаются на практике. Если *a priori* известно, что диэлектрическая проницаемость объекта ε_1^0 постоянна, то задача томографии может быть редуцирована к задаче восстановления числовой формы объекта, используя полученное из (5) решение задачи томографии $\varepsilon_1(k_x, k_y, z)$ в k -пространстве, в виде двух функций $y_1(x, z), y_2(x, z)$ из решения комплексного трансцендентного уравнения:

$$\varepsilon_1(k_y, x, z) = \frac{\varepsilon_1^0}{2\pi i k_y} (e^{-ik_y y_1(x, z)} - e^{-ik_y y_2(x, z)}) \quad (8)$$

$$\varepsilon_1(k_y, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon_1(k_x, k_y, z) \exp(ik_x y) dk_x,$$

которое эквивалентно системе двух реальных уравнений, что и позволяет получить из его решения обе функции, определяющие форму объекта.

Результаты эксперимента

В экспериментах использовалась та же сканирующая система, что и в экспериментах [3,4] для многочастотной подповерхностной СВЧ диагностики. В импульсном зондировании аппаратура включала в себя цифровой осциллоскоп GZ10E, генераторную головку с центральной рабочей частотой 3,5 ГГц спектра сигнала в форме моносинуса, а также приемо-передающие широкополосные bow-tie дипольные антенны, имеющие широкий пространственный спектр передаточной функции. Сканирование осуществлялось по сетке 39×51 точек с шагом 0,5 см. Измерения выполнялись для объекта из пенопласта размерами $3 \times 3 \times 1$ см³, на глубинах $z_t = -0,5, -1, -2, \dots, -10$ см в песчаной среде с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_0 = 3,0$.

На рис.1-3 представлены результаты измерений рассеянного сигнала $s(r, t)$, в котором вместо параметра временной зависимости t используется зависимость от параметра эффективной глубины рассеивающего элемента z_s согласно $s(x, y, z_s) = s(x_r = x, y_r = y, z_r = 0, t = -2z_s \text{Re}\sqrt{\varepsilon_0} / c)$. Нулевое значение параметра z_s соответствует уровню рассеяния от поверхности среды.

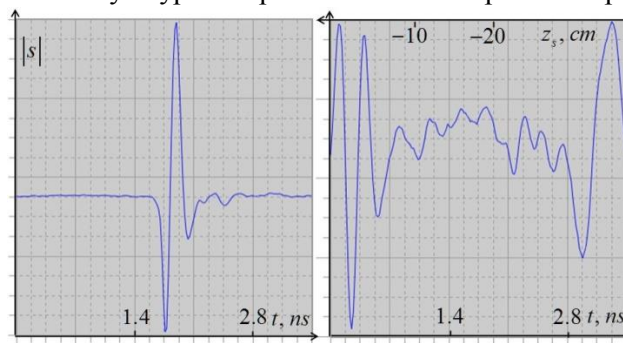


Рис.1. а) зондирующий импульс; б) импульс рассеянного сигнала при глубине объекта $z_t = -2$ см.

На рис.1 показаны зондирующий импульс генератора и импульс рассеянного сигнала от заглубленного на 2 см объекта (как во временном масштабе, так и в соответствующем масштабе

эффективной глубины рассеивающего элемента). Помимо отклика от зондируемого объекта виден также отклик от дна емкости (при $z_s \sim -30$ см).

На рис.2 представлены результаты измерений распределения амплитуды рассеянного импульса вдоль линии, проходящей над центром объекта при его положении на различных уровнях по глубине, в зависимости от параметра эффективной глубины рассеяния.

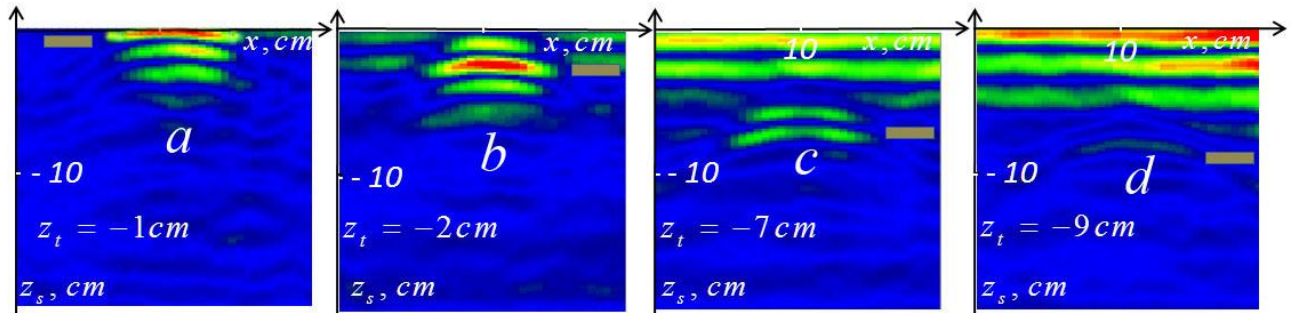


Рис.2. Амплитуда рассеянного импульса $|s(x, y=10 \text{ см}, z_s)|$ вдоль направления оси x при $y = 10$ см (над центром заглубленного объекта) в зависимости от эффективной глубины рассеивающего элемента z_s для объекта на различных глубинах z_t : а) $z_t = -1$ см; б) $z_t = -2$ см; в) $z_t = -7$ см; д) $z_t = -9$ см. Вставки показывают глубинное положение зондируемого объекта.

На рисунках отчетливо видны области отклика, соответствующие глубине объекта. Длинные полосы на рисунках соответствуют отражению от слоистой структуры плотности среды, возникающей при заглублении объекта путем последовательного досыпания грунта.

На рис.3 показаны распределения амплитуды рассеянного импульса в поперечном сечении для нескольких значений параметра эффективной глубины рассеяния вокруг истинной глубины объекта.

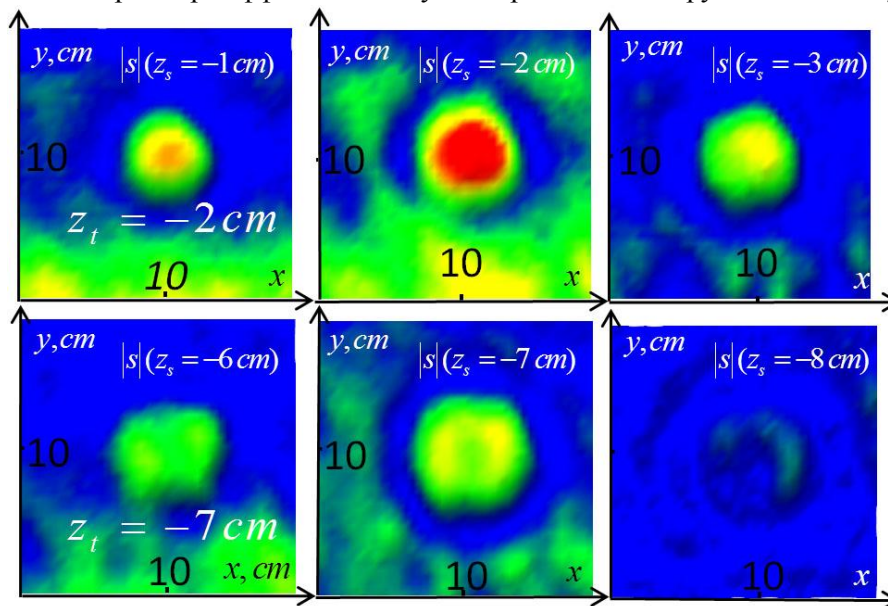


Рис.3. Амплитуда рассеянного импульса $|s(x, y, z_s)|$ для объектов на двух различных глубинах: Верхний ряд: объект на глубине $z_t = -2$ см; распределения показаны в трех сечениях при величине параметра эффективной глубины рассеяния: $z_s = -1$ см, $z_s = -2$ см, $z_s = -3$ см. Нижний ряд: объект на глубине $z_t = -7$ см; показаны распределения при $z_s = -6$ см, $z_s = -7$ см, $z_s = -8$ см.

Видно, что при значениях z_s , соответствующих глубинам объектов ($z_t = -2$ см, $z_t = -7$ см), эти объекты различимы наиболее отчетливо. Такая визуализация исходных данных весьма полезна для предварительной локализации положения объекта с целью последующего предложенного выше анализа.

На рис.4 показаны частотные спектры рассеянного сигнала для объектов на глубинах $z_t = -1$ см и $z_t = -9$ см вдоль линии, проходящей через центр неоднородностей, а также их распределения в k -пространстве, которые являются входными данными для решения обратной задачи томографии на основе интегрального уравнения (5).

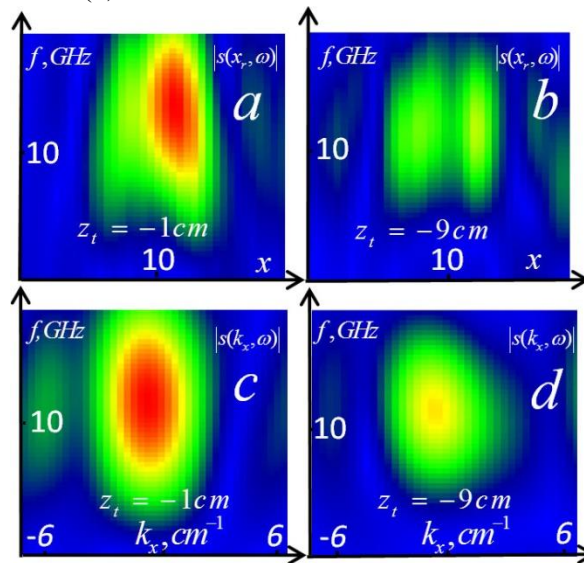


Рис.4. Верхний ряд: амплитуда частотного спектра рассеянного импульса $|s(x, y = 10 \text{ см}, \omega)|$ для объектов на двух различных глубинах: *a*) на глубине $z_t = -1$ см; *b*) на глубине $z_t = -9$ см. Нижний ряд: амплитуда частотного распределения поперечного спектра рассеянного импульса $|s(k_x, k_y = 0, \omega)|$ для объектов на тех же глубинах: *c*) на глубине $z_t = -1$ см; *d*) на глубине $z_t = -9$ см.

Можно видеть, что с ростом глубины объекта за пределы ближней зоны сужается пространственный спектр рассеянного сигнала, то есть в нем хуже представлены мелкомасштабные детали объекта.

В целом, результаты показывают, что импульсные измерения являются информативными, что создает необходимые условия для развития предложенных методов ближнепольной диагностики.

Благодарности

Исследования были выполнены при поддержке РФФИ, проекты №15-47-02294_р_поволжье, 16-52-00051-BeI, T12P-133 (БРФФИ-РФФИ), а также программы ОФН РАН IV.13, а также частично поддержаны грантом Минобрнауки РФ (соглашение от 27 августа 2013 г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Gaikovich K.P. Subsurface Near-Field Scanning Tomography // Physical Review Letters, vol. 98, no. 18, pp. 183902 (1-4), 2007.
2. Gaikovich K.P., Gaikovich P.K. Inverse problem of near-field scattering in multilayer media // Inverse Problems, vol. 26, no. 12, pp. 125013 (1-17 pp.), 2010.
3. Gaikovich K.P., Gaikovich P.K., Maksimovitch Ye.S., Badeev V.A. Pseudopulse near-field subsurface tomography // Physical Review Letters, vol. 108, no. 16, pp. 163902 (1-5 pp.), 2012.
4. Gaikovich K.P., Gaikovich P.K., Maksimovitch Ye.S., Badeev V.A. Subsurface near-field microwave holography // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing., vol. PP, issue 99, pp.1-9 (IEEE Early Access Articles), 2015.
5. Razevig V.V., Ivashov S.I., Sheyko A.P., Vasiliev I.A., Zhuravlev A.V. An example of holographic radar using at restoration works of historical building // Progress in Electromagnetic Research Letters., vol.1, pp. 173-179, 2008.