

RETRIEVAL OF DEPTH STRUCTURE OF SKIN INHOMOGENEITIES BY MEANS OF RESONANCE NEAR-FIELD SHF SOUNDING DATA

Gaikovich K. P.^{1,3}, Smirnov A. I.^{2,3}, Sumin M. I.³, Yanin D. V.²

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

² Institute of Applied Physics RAS, GSP-120, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

³ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Gagarin ave., 23, Nizhny Novgorod, 603950, Russia
Ph.: (831) 4179468, e-mail: gai@ipmras.ru

Abstract — To develop the mathematical software for the remote computer diagnostics of skin diseases, a new method is proposed to retrieve the permittivity depth profiles of quasi-1D skin inhomogeneities. It is based on a new approach in the theory of nonlinear ill-posed problems.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГЛУБИННОЙ СТРУКТУРЫ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ КОЖИ ПО ДАННЫМ РЕЗОНАНСНОГО БЛИЖНЕПОЛЬНОГО СВЧ ЗОНДИРОВАНИЯ

Гайкович К. П.^{1,3}, Смирнов А. И.^{2,3}, Сумин М. И.³, Янин Д. В.²

¹ Институт физики микроструктур РАН, ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия

² Институт прикладной физики РАН, ГСП-120, Нижний Новгород, 603950, Россия

³ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия

тел.: (831) 4179468, e-mail: gai@ipmras.ru

Аннотация — С целью разработки математического обеспечения для компьютерной дистанционной диагностики кожных заболеваний предложен новый метод восстановления профилей диэлектрической проницаемости квазиодномерных неоднородностей кожи по данным СВЧ резонансных измерений. Он основан на новом подходе в теории некорректных нелинейных обратных задач.

I. Введение

Принципы, на которых базируется резонансная ближнеполюсная СВЧ-диагностика [1-4], состоят в следующем. Область среды, находящейся в ближнем поле зондирующей электрически малой антенны (измерительной емкости), оказывает влияние на ее импеданс. Если антенна включена в качестве нагрузки в резонансную систему, то по смещению резонансной частоты и изменению добротности можно судить об электродинамических характеристиках среды вблизи антенного устройства. Для целей подповерхностного зондирования профиля диэлектрической проницаемости система должна быть работать таким образом, чтобы можно было изменять эффективную глубину зондирования или характерный масштаб локализации квазистатического электрического поля в среде [2-5]. Для томографии трёхмерно неоднородной среды измерения должны быть дополнены двумерным сканированием вдоль поверхности [1]. Имеются различные возможности управления эффективной глубиной зондирования [1]. При решении обратных задач резонансной ближнеполюсной СВЧ-диагностики исходными данными являются результаты измерения резонансных характеристик датчиков, представляющих собой систему электрически малых антенн с разными глубинами зондирования. Ближнеполюсная СВЧ-диагностика, в отличие от волновых методов, позволяет восстанавливать субволновые детали неоднородностей параметров среды.

Решение соответствующих нелинейных некорректных обратных задач в рассматриваемых методах диагностики предполагает применение методов регуляризации. При этом, как правило, используются упрощающие модельные представления профиля диэлектрической проницаемости, что может приводить к ошибкам диагностики, если реальное распре-

деление нельзя описать в рамках принятой модели. В данной работе предлагается использовать новый метод двойственной регуляризации, основанный на лагранжевом подходе в теории некорректных задач [6], эффективность которого уже была продемонстрирована в решении задач восстановления одномерной диэлектрической структуры различных сред [5].

II. Метод

В качестве измерительных зондов в [1] использовались полосковые дипольные антенны, а для зондирования кожи – датчики на основе коаксиального кабеля [2-4]. На рис. 1 представлена структура амплитуды поля открытого конца коаксиальной линии, рассчитанная с помощью метода FDTD.

Измерительная система для исследования кожи представляет собой СВЧ-резонатор в виде отрезка коаксиальной линии с фторопластовым заполнением, на одном конце которого расположена магнитная рамка (для этого центральный проводник коаксиальной линии замыкается на экран, образуя индуктивную нагрузку). К противоположному концу резонатора, посредством выносного коаксиального кабеля длиной подключается аппликатор, содержащий на конце цилиндрический конденсатор длиной 1 см. Зондирование осуществляется краевой емкостью цилиндрического конденсатора аппликатора. Возбуждение резонатора и прием его отклика осуществляется при помощи петель магнитной связи, расположенных вблизи магнитной рамки резонатора.

Торец измерительной емкости прикладывается к поверхности исследуемой среды. Для глубинного зондирования тканей кожи изготовлены аппликаторы с радиусом внутренней обкладки цилиндрических емкостей (аппликаторов) 0,35 – 1,5 мм с глубинами зондирования $Z_{\text{eff}} = 0,2 - 1,1$ мм, определенными из

эксперимента. Собственные частоты датчиков 600-700 МГц. Наличие вещества в области краевого квазистатического поля измерительной емкости приводит к изменению резонансной частоты $\Delta\omega$ и добротности системы (вариации полуширины резонансной линии $\Delta\Omega$). Таким образом, восстановление одномерного распределения $\varepsilon_1(z)$ среды с комплексной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon(z) = \varepsilon_0 + \varepsilon_1(z)$ основано на анализе принимаемого сигнала, который можно представить комплексной величиной $s = \Delta\omega + i\Delta\Omega$.

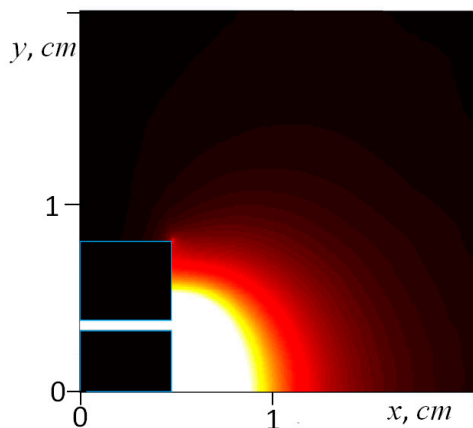


Рис. 1. Структура поля открытого конца коаксиального кабеля при толщине внешнего проводника $d_z = 0,2$ см.

Fig. 1. Field structure of the open waveguide end at the width of the external conductor $d_z = 0.2$ cm

Необходимым элементом постановки и решения обратной задачи является разработка алгоритма решения прямой задачи, т.е. вычисление сигнала s для произвольного профиля $\varepsilon_1(z)$, что само по себе является сложной, но решаемой, проблемой. Более того, решение задачи может осложняться из-за частотной зависимости диэлектрической проницаемости $\varepsilon(z, \omega)$. Однако в живых тканях диэлектрическая проницаемость в значительной степени определяется их объемным водосодержанием f_w , и для вычисления $\varepsilon(f_w)$ могут использоваться соответствующие эмпирические формулы смеси.

Тогда мы имеем задачу восстановления профиля $f(z, t)$, т.е. мы должны найти профиль, для которого вычисленные значения сигнала соответствуют измеренным:

$$s[f_w(z)](z_s) = s_0(z_s). \quad (1)$$

Предполагается разработать и продемонстрировать результаты применения алгоритма решения этой нелинейной некорректной задачи, основанного на новом методе двойственной регуляризации [5,6].

В рамках этого метода модифицированная функция Лагранжа для решаемой задачи записывается как

$$L_\mu[f_w](z_s) = \|f_w\|^2 + \int_{z_s} [\lambda_1(z_s)(\operatorname{Re} s[f_w](z_s) - \operatorname{Re} s_0(z_s)) + \lambda_2(\omega)(\operatorname{Im} s[f_w, z_s] - \operatorname{Im} s_0(z_s))] dz_s \quad (2) + \mu \left\{ \left(\int_{z_s} |s[f_w](z_s) - s_0(z_s)|^2 dz_s \right)^{1/2} + \left(\int_{z_s} |s[f_w](z_s) - s_0(z_s)|^2 dz_s \right) \right\}$$

а регуляризованная двойственная задача состоит в максимизации вогнутого функционала

$$V_\mu^\alpha(\lambda) = \min_{\sigma \in D} L_\mu[f_w](\lambda) - \alpha \|\lambda\|^2 \rightarrow \max_{\|\lambda\| \leq \mu}, \quad (3)$$

где $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2)$, $D = \{f_w \in L_2(z_n, 0) : 0 \leq f_w(z) \leq 1\}$. Седловая точка процесса минимизации (2) по f_w и максимизации (3) по двойственной переменной λ дает искомое решение.

В случаях, когда есть основания полагать, что искомая неоднородность принадлежит к компактному классу монотонных или выпуклых функций, соответствующую дополнительную априорную информацию можно ввести в алгоритм решения.

III. Заключение

Предложенный алгоритм метода двойственной регуляризации в задаче СВЧ резонансной диагностики подповерхностной структуры диэлектрической проницаемости неоднородностей кожи позволяет восстанавливать профиль диэлектрической проницаемости без использования подходов, основанных на применении модельных представлений или параметризации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 15-47-02294-р-Поволжье, Программы IV.13 ОФН РАН, а также Минобрнауки РФ в рамках проектной части государственного задания в 2014–2016 гг. (код проекта 1727) и соглашения от 27 августа 2013 г. №02.В.49.21.0003 между Минобрнауки РФ и Нижегородским госуниверситетом им. Н.И. Лобачевского).

IV. References

- [1] Gaikovich K. P. Subsurface near-field scanning tomography, *Physical Review Letters*, 2007, vol. 98, No. 18, pp.183902.
- [2] Д. В. Янин, А.Г. Галка, А. И. Смирнов, А. В. Костров, А. В. Стриковский. Резонансная ближнеполевая СВЧ-диагностика неоднородных сред. *Успехи прикладной физики*, 2014, т.2, № 6, с. 555-570.
- [3] Янин Д. В., Галка А. Г., Костров А. В., Смирнов А. И., Стриковский А. В., Кузнецов И. В. Подповерхностная диагностика квазиодномерных неоднородностей методом резонансного ближнеполевого СВЧ-зондирования. *Известия вузов. Радиофизика*, 2014, т.57, № 1, с. 35-47.
- [4] Д. В. Янин, А. Г. Галка, А. И. Смирнов, А. В. Костров, А. В. Стриковский, Н. Ю. Орлинская, А. А. Епишкина, Е. В. Гребенкин. Неинвазивная диагностика меланомы и других новообразований кожи методом резонансного ближнеполевого СВЧ-зондирования. *Журнал радиоэлектроники*, № 1, 2015.
- [5] Гайкович К. П., Максимович Е. С., Смирнов А. И., Сумин М. И. Двойственные алгоритмы в обратных задачах многочастотного подповерхностного зондирования. *Доклады 7-й Всероссийской научно-технической конф. «Радиолокация и радиосвязь»*, 2013, с. 47-51.
- [6] Sumin M. I. Parametric Dual Regularization in a Nonlinear Mathematical Programming, in *Advances in Mathematics Research*, Vol. 11, Chapter 5, New-York, Nova Science Publishers Inc., 2010. pp. 103-134.