

УДК 621.371

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-135-139

## Восстановление толщины слоя дермы по коэффициенту отражения электромагнитной волны

Е.В. Новикова

Необходимость определения внутренней структуры исследуемой среды и установление признаков, характеризующих ее состояния и свойства, часто возникает при проведении различных видов диагностики, одним из которых является восстановление профиля изучаемого объекта. Обратная электродинамическая задача заключается в определении геометрических и электродинамических параметров исследуемой диэлектрической среды по характеристикам рассеянного электромагнитного поля.

Рассмотрена обратная задача восстановления толщины слоя по значениям коэффициента отражения плоской электромагнитной волны от биологического слоя дермы. Среда, имеющие слоистый характер структуры, составляют особый класс. В этом случае задача восстановления профиля сводится к оцениванию количества слоев и их параметров, а именно, значений толщин и диэлектрических проницаемостей. Обратная задача решена методом минимизации сглаживающего функционала. В основе метода лежит алгоритм минимизации обобщенной невязки между частотной зависимостью коэффициента отражения и его теоретической моделью. Зависимость коэффициента отражения от частоты в СВЧ-диапазоне 1...5 ГГц была получена по результатам решения прямой задачи путем наложения на них случайных флуктуаций, моделирующих ошибки реальных экспериментальных измерений. Дальнейшее развитие и разработка математических и вычислительных методов решения обратных задач для усложненных моделей — одно из актуальных направлений в исследовании слоистых сред.

*Ключевые слова:* модель Дебая, электромагнитная волна, коэффициент отражения, обратная задача, диагностика.

*Для цитирования:* Новикова Е.В. Восстановление толщины слоя дермы по коэффициенту отражения электромагнитной волны // Вестник МЭИ. 2018. № 2. С. 135—139. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-135-139.

## Reconstructing the Derma Layer Thickness from the Electromagnetic Wave Reflection Coefficient

E.V. Novikova

The need to determine the internal structure of an investigated medium and to determine the indicators characterizing its states and properties is often faced in carrying out various kinds of diagnostics, e.g., the one aimed at reconstructing the profile of the investigated object. The inverse electrodynamic problem consists in determining the geometrical and electrodynamic parameters of the studied dielectric medium from the characteristics of scattered electromagnetic field.

The article considers the inverse problem of reconstructing the layer thickness from the coefficient characterizing the reflection of electromagnetic wave from the derma biological layer. Media having a layered structure form a special class. In this case, the profile reconstruction problem boils down to estimating the number of layers and their parameters, namely, their thicknesses and dielectric constants. The formulated inverse problem is solved using the smoothing functional minimization method, which is based on the algorithm for minimizing the generalized discrepancy between the reflection coefficient frequency dependence and its theoretical model. The reflection coefficient frequency dependence in the microwave band from 1 to 5 GHz was obtained from the results of solving the direct problem by superposing random fluctuations simulating the errors of real experimental measurements. Further development and elaboration of mathematical and numerical methods for solving the inverse problems with the use of more sophisticated models is one of important avenues in studying layered media.

*Key words:* Debye model, electromagnetic wave, reflection coefficient, inverse problem, diagnostics.

*For citation:* Novikova E.V. Reconstructing the Derma Layer Thickness from the Electromagnetic Wave Reflection Coefficient. MPEI Vestnik. 2018;2:135—139. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-135-139.

### Введение

В настоящее время частные решения общей задачи электромагнитной диагностики искусственных и естественных сред различной природы имеют большое теоретическое и практическое значение. Необходимость определения внутренней структуры исследуемой среды и установление признаков, характеризующих ее состояния и свойства, часто возникает при проведении различных видов диагностики. Одним из которых является восста-

новление профиля изучаемого объекта. Задача восстановления — одна из общих задач радиофизики, относится к обратным задачам электродинамики. Она заключается в определении геометрических и электродинамических параметров исследуемой диэлектрической среды по характеристикам рассеянного электромагнитного поля. Аналогичные задачи представлены в [1].

Важным этапом решения подобных задач считается построение интерпретационной модели исследуемого объекта. С одной стороны, она должна быть

достаточно содержательной, т. е. описывать основные особенности его структуры, с другой стороны, быть в определенной степени простой, т. е. характеризоваться небольшим числом свободных параметров для обеспечения практической устойчивости обратной задачи. Ввиду сложности закономерностей, описывающих распространение радиоволн в различных средах, обратная задача поддается аналитическому решению только в простейших случаях. В остальном такие задачи часто относятся к классу математически некорректных, что существенно затрудняет получение достоверного решения [2, 3].

### Постановка задачи

В настоящее время перспективными и важными задачами являются изучение и повышение эффективности методов восстановления профиля исследуемой среды, ориентированных на специальный класс объектов. Этот особый класс составляют среды, имеющие слоистый характер структуры [4]. Задача восстановления профиля сводится к оцениванию количества слоев и их параметров, а именно, значений толщин и диэлектрических проницаемостей.

Подобные задачи возникают в таких направлениях, как радиотехника (дистанционное зондирование земной атмосферы и земной поверхности) [5], электродинамика, лазерная физика, промышленность и космическая техника, физиологическая оптика и биомедицинские технологии (биотехнические и медицинские аппараты и комплексы диагностического назначения, приборы функциональной диагностики, медицинская томография) [6 — 8], геофизика [9], климатология и др.

Электромагнитные методы интроскопии классифицируют по диапазону частот, выделяют радиоволновые, оптические, тепловые, радиационные и др. Рассмотрен радиоволновый метод, основанный на взаимодействии исследуемой среды с электромагнитным полем. Он обеспечивает широкий диапазон контролируемых параметров и простые представления результатов. Используемый диапазон электромагнитных излучений выбирается, исходя из априорных данных о связи параметров среды с ее электромагнитными свойствами, а именно, из определения резонансных линий или областей поглощения электромагнитного излучения.

Таким образом, на примере восстановления толщины слоя по частотной зависимости коэффициента отражения электромагнитной волны от биологического слоя демонстрируется частное решение обратной задачи электромагнитной диагностики, что продолжает и развивает идеи, заложенные в [10].

Результаты работы могут быть использованы для разработки и оптимизации характеристик медико-биологической аппаратуры диагностического назначения, а также проведения моделирования и исследований в медицинской биофизике.

### Исследуемая модель и исходные данные

Интерпретационная модель исследуемого объекта представляет собой биологический слой дермы, помещенный в свободное пространство. Физическая модель слоя (рис. 1) — изотропная, линейная, немагнитная, дисперсионная и плоскостойкая среда, описанная моделью Дебая [11], в соответствии с которой относительная комплексная диэлектрическая проницаемость слоя равна

$$\hat{\epsilon}_r(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau};$$

где  $\omega$  — круговая частота, рад/с;  $\epsilon_s$  — статическая относительная диэлектрическая проницаемость слоя;  $\epsilon_\infty$  — относительная диэлектрическая проницаемость слоя при бесконечной частоте;  $\tau$  — постоянная времени релаксации слоя, с.



Рис. 1. Модель исследуемой среды

Параметры исследуемого слоя представлены в таблице [12].

### Параметры слоя

Параметр	Показатель
Слой	Дерма
$L$ , мм	4,0
$\epsilon_s$	45,0
$\epsilon_\infty$	4,0
$\tau$ , пс	8,0

Радиоволновый метод исследования среды использует данные частотного сканирования. Зависимость коэффициента отражения от частоты в СВЧ-диапазоне 1...5 ГГц (рис. 2) получена по результатам решения прямой задачи путем наложения на них случайных флуктуаций, моделирующих ошибки реальных экспериментальных измерений. При решении прямой задачи исследовали нормальное падение электромагнитной волны на однослойную систему. Предполагалось, что падающая волна — плоская и реакция источника зондирующего сигнала на свойства объекта отсутствует.

### Решение обратной задачи

При решении обратной задачи толщину слоя определяют по энергетическому коэффициенту отражения, который представляет собой вещественную функцию,

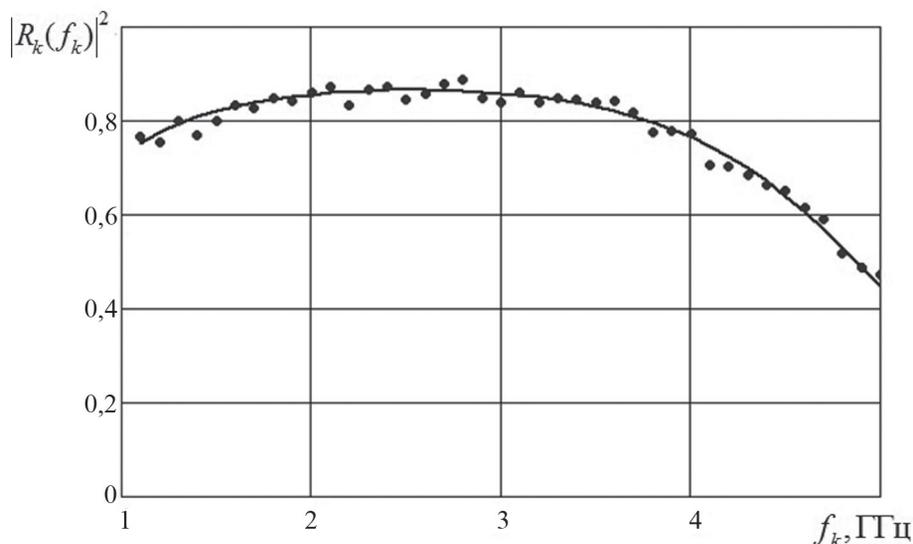


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения от частоты при падении электромагнитной волны на однослойную среду

равную квадрату модуля амплитудного коэффициента. Данная постановка задачи относится к классу так называемых бесфазовых обратных задач. Ее решение — первоначальный этап решения задачи о восстановлении профиля многослойной среды.

Чтобы восстановить параметры исследуемой среды по дискретным значениям коэффициента отражения, необходимо установить связь между ними. Для этого используем метод минимизации сглаживающего функционала. В его основе лежит алгоритм минимизации обобщенной невязки между частотной зависимостью коэффициента отражения и его теоретической моделью. Формула для невязки имеет следующий вид

$$\Delta(L) = \sum_{k=1}^n \left[ |R_k(f_k)|^2 - |R(f_k, L)|^2 \right]^2, \quad (1)$$

где  $k = 1, \dots, n$  — число дискретных отсчетов коэффициента отражения, моделирующих реальные экспериментальные измерения.

Для определения формулы, описывающей теоретическую модель коэффициента отражения, представим распространение электромагнитной волны в плоско-слоистой среде как распространение сигнала в отрезке регулярной линии передачи [13]. С помощью эквивалентной замены этого отрезка четырехполюсником, соответствующим исследуемому слою, представим модель плоскослоистой среды в виде функциональной схемы, изображенной на рис. 3.

Используя [8], коэффициент передачи четырехполюсника для линии с потерями может быть представлен в матричной форме (матрицей передачи)

$$\dot{A} = \begin{bmatrix} \cos(\dot{\beta}(\omega)L) & j\dot{Z}(\omega)\sin(\dot{\beta}(\omega)L) \\ \frac{j}{\dot{Z}(\omega)}\sin(\dot{\beta}(\omega)L) & \cos(\dot{\beta}(\omega)L) \end{bmatrix},$$

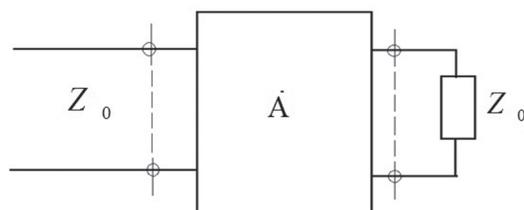


Рис. 3. Функциональная схема модели плоскослоистой среды

где  $\dot{\beta}(\omega) = \omega\sqrt{\epsilon_0\dot{\epsilon}_r(\omega)\mu_a}$  — коэффициент фазы, 1/м;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная, Ф/м;  $\mu_a$  — абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м;  $\dot{Z}(\omega) = \sqrt{\mu_a/\epsilon_0\dot{\epsilon}_r(\omega)}$  — волновое (характеристическое) сопротивление линии передачи, Ом.

С помощью матрицы передачи найдем волновое сопротивление линии передачи  $\dot{Z}(\omega)$ . Для регулярной линии передачи коэффициент отражения  $\dot{R}(\omega)$  от нагрузки, формула которого описывает теоретическую модель коэффициента отражения, целиком определяется свойствами двухполюсника нагрузки, равным характеристическому сопротивлению воздуха  $Z_0$ , и волновым сопротивлением линии передачи  $\dot{Z}(\omega)$  [14]

$$\dot{R}(\omega) = \frac{\dot{Z}(\omega) - Z_0}{\dot{Z}(\omega) + Z_0}.$$

При решении обратной задачи функция обобщенной невязки между частотной зависимостью коэффициента отражения и его теоретической моделью имеет вид, изображенный на рис. 4. В результате решения уравнения (1) и минимизации невязки толщина исследуемого слоя равна 4 мм, что соответствует исследуемой модели.

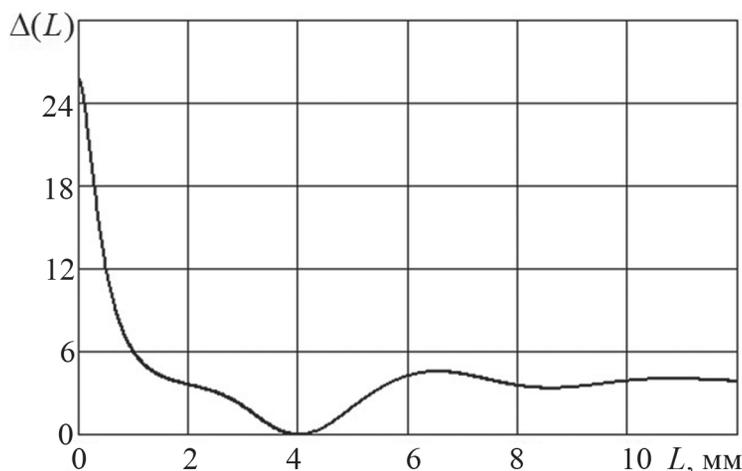


Рис. 4. График функции обобщенной невязки

## Заключение

Таким образом, исследован метод диагностики плоскостройной структуры и восстановлен параметр исследуемого объекта – его толщина – по дискретным значениям коэффициента отражения электромагнитной волны. Предполагается, что в дальнейшем работа в этом направлении будет продолжена: будет повышена эффективность метода, и будет исследована новая физическая и математическая многослойная модель объекта. При этом возрастет сложность решения как прямой, так и особенно обратной задачи. Дальнейшее развитие и разработка математических и вычислительных методов решения обратных задач в рамках таких усложненных моделей – одно из актуальных направлений в исследовании слоистых сред.

## Литература

1. **Гринев А.Ю., Темченко В.С., Зайкин А.Е.** Теоретико-экспериментальное определение параметров слоистых сред с учетом пространственно-временной импульсной характеристики приемно-передающей антенны // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 15 Междунар. Крымской конф. Севастополь: Вебер, 2005. С. 375—376.
2. **Авдоченко Б.И. и др.** Восстановление диэлектрической проницаемости слоистой среды по частотной зависимости коэффициента отражения методом минимизации регуляризирующего функционала // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Томск: Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники. 2007. Т. 1. С. 5—9.
3. **Алексин С.Г., Лебедев С.Г., Дробахин О.О.** Восстановление профиля диэлектрической проницаемости слоистых структур с использованием метода Гельфранда–Левитана–Марченко // Радиофизика, информатика, управление. 2009. № 2 (21). С. 5—11.
4. **Бреховских Л.М.** Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
5. **Хилькевич В.В.** Использование нейронной сети для восстановления профилей диэлектрической проницаемости // Радиотехнические тетради. 2000. № 21. С. 76—78.
6. **Алехнович В.И., Зайцев К.И., Карасик В.Е.** Восстановление профиля диэлектрической проницаемости среды с помощью терагерцовой спектроскопии // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки». 2013. № 2. С. 50—66.
7. **Zaytsev K.I. et al.** Accuracy of Sample Material Parameters Reconstruction Using Terahertz Pulsed Spectroscopy // J. Appl. Phys. 2014. V. 115 (19). P. 193105.
8. **Reid C.** Spectroscopic Methods for Medical Diagnosis at Terahertz Wavelengths // PhD thesis. London, 2009. P. 194.
9. **Авдоченко Б.И. и др.** Восстановление диэлектрической проницаемости слоистой среды по частотной зависимости коэффициента отражения методом минимизации сглаживающего функционала // Доклады ТУСУРа. 2007. № 1 (5). С. 5—9.
10. **Кальщикова А.А., Новикова Е.В., Штыков В.В.** Расчет коэффициента отражения кожи человека // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Материалы XX Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. М.: Изд. дом МЭИ, 2014.
11. **Гусев Ю.А.** Основы диэлектрической спектроскопии. Казань: Изд-во Казанского гос. ун-та, 2008.
12. **Физиология человека.** М.: Мир, 1996.
13. **Баскаков С.И.** Радиотехнические цепи с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 1980.
14. **Баскаков С.И.** Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Книжный дом Либроком, 2012.

## References

1. **Grinev A.Yu., Temchenko V.S., Zaykin A.E.** Teoretiko-eksperimental'noe Opredelenie Parametrov

Sloistyxh Sred s Uchetom Prostranstvenno-vremennoy Impul'snoy Kharakteristiki Priemo-peredayushchey Antenny. SVCH-tekhnika i Telekommunikatsionnye Tekhnologii: Materialy 15 Mezhdunar. Krymskoy Konf. Sevastopol': Veber, 2005:375—376. (in Russian).

2. **Avdochenko B.I. i dr.** Vosstanovlenie Dielektricheskoy Pronitsaemosti Sloistoy Sredy po Chastotnoy Zavisimosti Koeffitsienta Otrazheniya Metodod Minimizatsii Regulariziruyushchego Funktsionala. Doklady Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta Sistem Upravleniya i Radioelektroniki. Tomsk: Tomskiy Gos. Un-t Sistem Upravleniya i Radioelektroniki. 2007;1:5—9. (in Russian).

3. **Aleksin S.G., Lebedev S.G., Drobakhin O.O.** Vosstanovlenie Profilya Dielektricheskoy Pronitsaemosti Sloistyxh Struktur s Ispol'zovaniem Metoda Gel'franda-Levitana–Marchenko. Radiofizika, Informatika, Upravlenie. 2009;2 (21):5—11. (in Russian).

4. **Brekhovskikh L.M.** Volny v Sloistyxh Sredakh. M.: Nauka, 1973. (in Russian).

5. **Khil'kevich V.V.** Ispol'zovanie Neyronnoy Seti dlya Vosstanovleniya Profilya Dielektricheskoy Pronitsaemosti. Radiotekhnicheskie Tetradi. 2000;21:76—78. (in Russian).

6. **Alekhovich V.I., Zaytsev K.I., Karasik V.E.** Vosstanovlenie Profilya Dielektricheskoy Pronitsaemosti Sredy s Pomoshch'yu Teragertsovoy Spektroskopii. Vestnik MG TU im. N.E. Baumana. Seriya «Estestvennye nauki». 2013;2:50—66. (in Russian).

7. **Zaytsev K.I. e. a.** Accuracy of Sample Material Parameters Reconstruction Using Terahertz Pulsed Spectroscopy. J. Appl. Phys. 2014;115 (19):193105.

8. **Reid C.** Spectroscopic Methods for Medical Diagnosis at Terahertz Wavelengths. PhD thesis. London, 2009. P. 194.

9. **Avdochenko B.I. i dr.** Vosstanovlenie Dielektricheskoy Pronitsaemosti Sloistoy Sredy po Chastotnoy Zavisimosti Koeffitsienta Otrazheniya Metodod Minimizatsii Sglazhivayushchego Funktsionala. Doklady TUSURA. 2007;1 (5):5—9. (in Russian).

10. **Kal'shchikov A.A., Novikova E.V., Shtykov V.V.** Raschet Koeffitsienta Otrazheniya Kozhi Cheloveka. Radioelektronika, Elektrotehnika i Energetika: Materialy KHKH Mezhdunar. Nauch.-tekh. Konf. Studentov i Aspirantov. M.: Izd. Dom MPEI, 2014. (in Russian).

11. **Gusev Yu.A.** Osnovy Dielektricheskoy Spektroskopii. Kazan': Izd-vo Kazanskogo Gos. Un-ta, 2008. (in Russian).

12. **Fiziologiya** Cheloveka. M.: Mir, 1996. (in Russian).

13. **Baskakov S.I.** Radiotekhnicheskie Tsepi s Raspredelemnymi Parametrami. M.: Vysshaya Shkola, 1980. (in Russian).

14. **Baskakov S.I.** Elektrodinamika i Rasprostranenie Radiovoln. M.: Knizhnyy Dom Librokom, 2012. (in Russian).

---

#### Сведения об авторе

---

**Новикова Елена Васильевна** — аспирантка кафедры основ радиотехники НИУ «МЭИ», e-mail: leksinev@mail.ru

---

#### Information about author

---

**Novikova Elena V.** — Ph.D.-student of Fundamentals of Radio Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: leksinev@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 23.05.2017*