

УДК 530.1: 537.86÷621.39.96

Б.И. Авдоченко, А.С. Задорин, В.А. Замотринский, А.А. Ильиных,  
Р.С. Круглов, Р.В. Литвинов, А.А. Шибельгут

## Восстановление диэлектрической проницаемости слоистой среды по частотной зависимости коэффициента отражения методом минимизации регуляризирующего функционала

Для восстановления одномерного непрерывного профиля диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности и верхнего слоя грунта с характерным масштабом неоднородности 1 см рассмотрен метод обработки данных отражения радиоволн от полубесконечной среды с неоднородной по глубине диэлектрической проницаемостью. В основе метода лежит регуляризирующий алгоритм минимизации обобщенной невязки между частотной зависимостью коэффициента отражения и его теоретической моделью. Зависимость коэффициента отражения от частоты в диапазоне 0,4–2 ГГц была получена по результатам решения прямой задачи путем наложения на них случайных флуктуаций, моделирующих ошибки реальных экспериментальных измерений.

### Введение

В настоящее время интенсивно развиваются радиоволновые методы исследования верхнего слоя грунта и подстилающей поверхности [1–4]. В подповерхностной радиолокации широкое распространение получили методы сверхширокополосной радиолокации, в основе которых лежит обработка данных отражения от земной поверхности радиосигналов с относительной шириной спектра, близкой к единице [2–7]. Информативность эхосигналов сверхширокополосной радиолокации содержится в характере изменения их параметров в реальном масштабе времени [1–11].

Другой способ подповерхностной радиолокации основан на обработке данных частотного сканирования [3, 4, 12–21]. В этом случае информация о подповерхностной структуре содержится в частотной зависимости комплексного коэффициента отражения гармонического радиосигнала от зондируемой среды. Один из методов обработки такой зависимости состоит в ее преобразовании во временную область, что позволяет использовать способы извлечения информации о подповерхностной структуре, традиционные для импульсной радиолокации [3, 10, 21].

Существует альтернативный метод получения информации о структуре верхнего слоя грунта и подстилающей поверхности непосредственно из данных частотного сканирования без их преобразования во временную область [4, 12–20]. Возможности этого метода продемонстрированы в работах на примере восстановления одномерного профиля проводимости [12, 20] и комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  [13–16, 21] по частотной зависимости коэффициента отражения плоских радиоволн. Авторы работ [13, 15, 16] использовали итеративную процедуру решения обратной задачи восстановления зависимости  $\epsilon$  от координаты  $z$  вдоль глубины зондируемой среды. В соответствии с этой процедурой следующее приближение для  $\epsilon(z)$  является решением интегрального уравнения Фредгольма с ядром, линейным по  $\epsilon(z)$  и зависящим от решения прямой задачи рассеяния электромагнитного поля для среды, профиль диэлектрической проницаемости которой описывается предыдущим приближением  $\epsilon(z)$ . Некорректная обратная задача на каждом шаге итерации решалась методом минимизации регуляризирующего функционала невязки А.Н. Тихонова [20, 22, 23].

В данном сообщении представлены результаты решения обратной задачи восстановления профиля относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon(z)$  по частотной зависимости коэффициента отражения  $R(\omega)$  в диапазоне  $\omega = 0,4 \div 2$  ГГц. В качестве модели экспериментальных данных использовалась частотная зависимость  $R(\omega)$ , полученная по результатам решения прямой задачи путем наложения на них случайных флуктуаций. Профиль  $\epsilon(z)$  был получен путем прямого измерения диэлектрической проницаемости реального образца грунта. При расчетах среда с непрерывной зависимостью  $\epsilon(z)$  моделировалась слоистой средой с одинаковой толщиной слоев 1 см.

## Прямая задача

При решении прямой задачи использовалась известная формула для коэффициента отражения плоской электромагнитной волны от слоистой среды [24], которую для случая нормального падения волны с  $TE$ -поляризацией можно представить в виде

$$R(\omega) = \frac{(M_{11}(\omega) + M_{12}(\omega) \cdot \sqrt{\varepsilon_N}) - (M_{21}(\omega) + M_{22}(\omega) \cdot \sqrt{\varepsilon_N})}{(M_{11}(\omega) + M_{12}(\omega) \cdot \sqrt{\varepsilon_N}) + (M_{21}(\omega) + M_{22}(\omega) \cdot \sqrt{\varepsilon_N})}, \quad (1)$$

где

$$M(\omega) = \begin{pmatrix} M_{11}(\omega) & M_{12}(\omega) \\ M_{21}(\omega) & M_{22}(\omega) \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^N \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\varepsilon_j} \cdot d_j\right) & -\frac{i}{\sqrt{\varepsilon_j}} \cdot \sin\left(\frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\varepsilon_j} \cdot d_j\right) \\ -i \cdot \sqrt{\varepsilon_j} \cdot \sin\left(\frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\varepsilon_j} \cdot d_j\right) & \cos\left(\frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\varepsilon_j} \cdot d_j\right) \end{pmatrix};$$

$\omega = 2\pi f$ ;  $f$  — частота;  $c$  — скорость света;  $\varepsilon_j$  — диэлектрическая проницаемость  $j$ -го слоя;  $d_j$  — толщина  $j$ -го слоя;  $N$  — число слоев.

Для расчетов  $R(\omega)$  в качестве кусочно-постоянной зависимости  $\varepsilon(z)$  диэлектрической проницаемости использовалось распределение по глубине диэлектрической проницаемости реального грунта. Это распределение, изображенное на рис. 1 квадратами, было измерено в лабораторных условиях с шагом 1 см после изъятия образца грунта из места его залегания. Сплошной кривой показано распределение, интерполированное кубическими сплайнами. Результаты измерений  $\varepsilon(z)$  показали, что ее мнимая часть пренебрежимо мала.

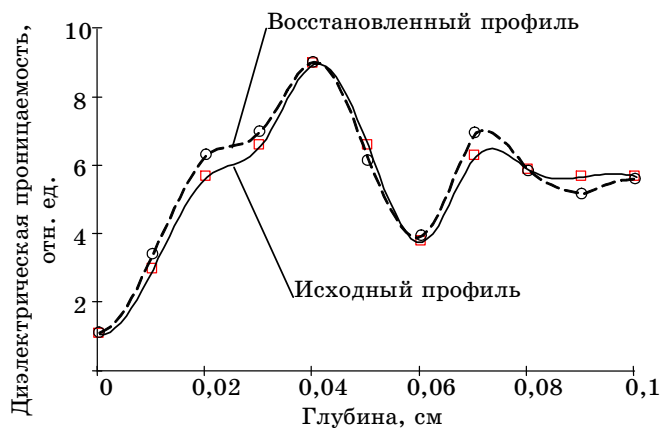


Рис. 1. Профиль диэлектрической проницаемости

На рис. 2 сплошными кривыми показана рассчитанная зависимость  $R_{ther}(\omega)$ . Построение этой зависимости завершает решение прямой задачи отражения плоской электромагнитной волны от полубесконечной слоистой среды.

## Обратная задача

Для моделирования реальной экспериментальной ситуации, когда результат измерения  $R_{ex}(\omega)$  отличается от  $R_{ther}(\omega)$  вследствие случайных и систематических ошибок, на зависимость  $R_{ther}(\omega)$  при помощи генератора псевдослучайных чисел накладывался шум. Зависимость  $R_{ex}(\omega)$  показана на рис. 2 точками. Таким образом формировалась обратная задача, в соответствии с которой необходимо было определить  $\varepsilon(z)$  по данным отражения  $R_{ex}(\omega)$ . Как

известно, подобные задачи являются некорректными [20, 22, 23]. Устойчивое решение этих задач может быть получено при помощи одного из регуляризирующих алгоритмов [22, 23]. Мы использовали минимизацию функционала А.Н. Тихонова

$$T^\alpha(\varepsilon) = \sum_s \left| R[\omega_s, \varepsilon(z)] - R_{ex}(\omega_s) \right|^2 + \alpha \Omega[\varepsilon(z)], \quad (2)$$

где  $\omega_s$  — сетка частот от  $0,4 \div 2$  ГГц с шагом 12,5 МГц;  $\alpha$  — параметр регуляризации. Стабилизирующий функционал  $\Omega[\varepsilon(z)]$  имеет вид

$$\Omega[\varepsilon(z)] = \sum_{j=1}^{10} p_j \left| R(\varepsilon_{j-1}, \varepsilon_j) - R(\varepsilon_{0j-1}, \varepsilon_{0j}) \right|^2 + r_j \varepsilon_j^2, \quad (3)$$

где  $R(\varepsilon_{j-1}, \varepsilon_j)$  — хорошо известные формулы Френеля для коэффициента отражения [24] от границы раздела однородных сред; числа  $p_j \sim 10^{-3}$  и  $r_j \sim 10$  — специально подобранные весовые коэффициенты;  $\varepsilon_{0j}$  — начальные приближения для проницаемостей слоев, которые генерировались случайным образом.

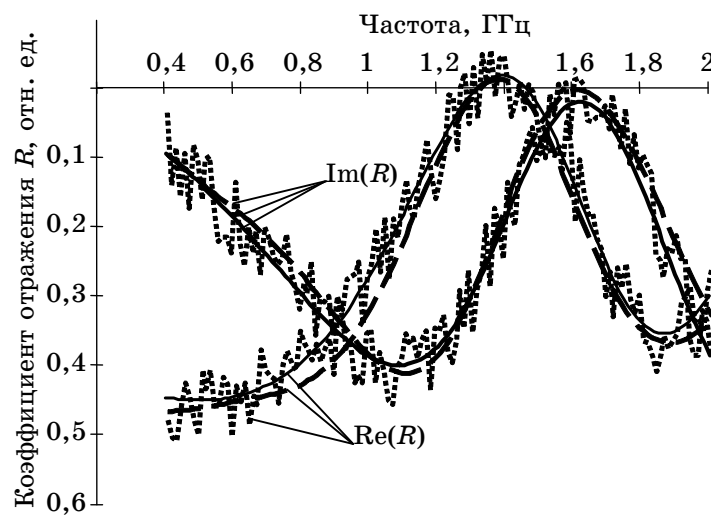


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента отражения

В рассматриваемом случае параметр регуляризации  $\alpha$  подбирался по минимуму невязки  $\sum_s \left| R[\omega_s, \varepsilon(z)] - R_{ex}(\omega_s) \right|^2$  и был равен  $\alpha_{opt} = 0,1$  ( $\omega_s$  — сетка частот). Восстановленное кусочно-постоянное распределение  $\varepsilon(z)$ , соответствующее этому значению  $\alpha_{opt}$ , изображено на рис. 1 кружочками. Здесь же штриховой кривой дано распределение, интерполированное кубическими сплайнами. Рассчитанный для восстановленного распределения  $\varepsilon(z)$  коэффициент  $R(\omega)$  показан на рис. 2 пунктирной кривой. Как видно из рис. 1, восстановленный профиль хорошо согласуется с исходным.

## Заключение

Таким образом, использование регуляризирующих алгоритмов при обработке данных подповерхностной радиолокации позволяет эффективно определять пространственное распределение диэлектрической проницаемости верхнего слоя и подстилающей поверхности почвогрунта.

### Литература

1. Суханов Д.Я. Метод наклонной фокусировки в подповерхностной радиолокации / Д.Я. Суханов, В.П. Якубов // Журнал технической физики. — 2006. — Т. 76. — № 7. — С. 64–68.
2. Щербак Н. Сверхширокополосная радиолокация. Что это такое? / Н. Щербак // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. — 2002. — № 3. — С. 38–46.

3. Разработка аппаратуры, методов обработки данных для электромагнитного подповерхностного зондирования и опыт их применения / Резников А.Е. [и др.] // УФН. – 2000. – Т. 170. – № 5. – С. 565–568.
4. Вопросы подповерхностной радиолокации / под ред. А.Ю. Гринева. – М. : Радиотехника, 2005. – 416 с.
5. Подповерхностная радиолокация / В. Кутев. – М. : Радио и связь, 1994. – 216 с.
6. Финкельштейн М.И. Радиолокация слоистых земных покровов / М.И. Финкельштейн, В.Л. Мендельсон, В.А. Кутев. – М. : Советское радио, 1977. – 173 с.
7. Гаврин А.В. Подповерхностное широкополосное радиозондирование / А.В. Гаврин, Д.Б. Мальцев // Радиотехника. – 1995. – № 6. – С. 74–77.
8. Лучининов В.С. Уравнения подповерхностной радиолокации для многократно отраженных сигналов / В.С. Лучининов // Радиотехника и электроника. – 1991. – Т. 36. – № 6. – С. 1217–1220.
9. Bates R.H.T. Time domain approach to inverse scattering / R.H.T. Bates, R.P. Millane // IEEE Tran. Ant. & Prop. – 1981. – Vol. AP-29. – No. 2. – P. 359–363.
10. Spectral and time domain approaches to some inverse scattering problems / Bolomey J.-C. [at al.] // IEEE Tran. Ant. & Prop. – 1981. – Vol. AP-29. – No. 2. – P. 206–212.
11. Tijhuis A.G. Iterative determination of permittivity and conductivity profiles of a dielectric slab in the time domain / A.G. Tijhuis // IEEE Tran. Ant. & Prop. – 1981. – Vol. AP-29. – No. 2. – P. 239–245.
12. Ge D.B. A direct profile inversion for weakly conducting layered medium / D.B. Ge, L.-J. Chen // IEEE Tran. Ant. & Prop. – 1991. – Vol. 39. – No. 7. – P. 907–909.
13. Tabbara W. Reconstruction of permittivity profiles from a spectral analysis of the reflection coefficient / W. Tabbara // IEEE Tran. Ant. & Prop. – 1979. – Vol. AP-27. – No. 2. – P. 241–244.
14. Chan L.C. Subsurface radar target imaging estimates / L.C. Chan, D.L. Moffatt, L. Peters // IEEE Tran. Ant. & Prop. – 1981. – Vol. AP-29. – No. 2. – P. 413–417.
15. Uno T. Inverse scattering method for one-dimensional inhomogeneous layered media / T. Uno, S. Adachi // IEEE Tran. Ant. & Prop. – 1987. – Vol. AP-35. – No. 12. – P. 1456–1466.
16. Tijhuis A.G. Iterative approach to the frequency-domain solution of the inverse-scattering problem for an inhomogeneous lossless dielectric slab / A.G. Tijhuis, C.V.D. Worm // IEEE Tran. Ant. & Prop. – 1984. – Vol. AP-32. – No. 7. – P. 711–716.
17. Козулин Ю.Н. К теории частотного электромагнитного зондирования многослойных структур / Ю.Н. Козулин // Изв. АН СССР, серия геофиз. – 1960. – № 8. – С. 1204–1212.
18. Шахсуваров Д.Н. Методика интерпретации результатов наблюдений электромагнитного поля при дипольном зондировании / Д.Н. Шахсуваров // Изв. АН СССР, серия геофиз. – 1956. – № 5. – С. 497–503.
19. Эненштейн Б.С. К методике интерпретации кривых электромагнитных зондирований / Б.С. Эненштейн // Изв. АН СССР, серия геофиз. – 1957. – № 12. – С. 1515–1519.
20. Тихонов А.Н. Некорректные задачи естественного происхождения / А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1987. – 303 с.
21. Cui T.J. Nonlinear differential equation for the reflection coefficient of an inhomogeneous lossy medium and its inverse scattering solutions / T.J. Cui, C.H. Liang // IEEE Tran. Ant. & Prop. – 1994. – Vol. 42. – No. 5. – P. 621–626.
22. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М. : Наука, 1979. – 285 с.
23. Морозов В.А. Регулярные методы решения некорректных задач / В.А. Морозов. – М. : Наука, 1987. – 239 с.
24. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М. : Наука, 1970. – 855 с.

---

**Авдоченко Борис Иванович**

Канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектроники и защиты информации ТУСУРа

Телефон: (3822) 41 38 84

Эл. почта: AvdochenkoBI@rzi.tusur.ru

**Задорин Анатолий Семенович**

Д-р физ.-мат. наук, зав. кафедры радиоэлектроники и защиты информации ТУСУРа

Телефон: (3822) 41 33 65

Эл. почта: Anatoly.Zadorin@rzi.tusur.ru

**Замотринский Владимир Алексеевич**

Канд. техн. наук, доцент кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники ТУСУРа  
Телефон: (3822) 41 36 43  
Эл. почта: zam@svch.rk.tusur.ru

**Ильиных Артем Александрович**

Студент гр. 142-1 радиотехнического факультета ТУСУРа  
Телефон: (3822) 41 38 84  
Эл. почта: artemu@sibmail.com

**Круглов Роман Сергеевич**

Канд. техн. наук, мл. науч. сотр. кафедры радиоэлектроники и защиты информации ТУСУРа  
Телефон: (3822) 41 38 84  
Эл. почта: krs@mail.ru

**Литвинов Рудольф Викторович**

Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиоэлектроники и защиты информации ТУСУРа  
Телефон: (3822) 41 38 84  
Эл. почта: litvinovrv@rzi.tusur.ru

**Шибельгут Александр Андреевич**

Аспирант каф. кафедры радиоэлектроники и защиты информации ТУСУРа  
Телефон: (3822) 41 38 84  
Эл. почта: ShibelgutAA@rzi.tusur.ru

B. Avdochenko, A. Zadorin, V. Zamotrinsky, A. Ilinykh,

R. Kruglov, R. Litvinov, A. Shibelgut

**Reconstruction of the layered media permittivity on the basis  
of the frequency dependence of the reflection coefficient  
by minimization method of regularizing functional**

In order to restore a one-dimensional continuous profile of the permittivity of underlying surface and top layer of soil with typical scale of heterogeneity 1 cm the method of data handling of radio-waves reflection from half-infinite medium with depth heterogeneous permittivity have been considered. The basis of the method is regularizing algorithm of the minimization of generalized discrepancy between frequency dependence of the reflection coefficient and its theoretical model. The dependence of the reflection coefficient on frequency into range 0.4–2 GHz has been obtained as results of the direct problem solution. This result has been calculated by means of superposition of the random fluctuations, which simulate the measurement error, on dependence of the reflection coefficient on frequency.