

Запись рефлектограммы в диапазоне углов, содержащем угол Брюстера, дает возможность проводить устойчивую минимизацию целевой функции и запись рефлекторграммы в диапазоне углов, содержащем угол Брюстера, дает возможность восстановить диэлектрическую проницаемость отражающего слоя и, соответственно, усредненную по площади влажность с большей точностью. На рис. 1 приведены интерференционная рефлектограмма и расчетная кривая для модели почвы с содержанием глины 25 % и объемной влажностью $W = 0,213 \pm 0,05 \text{ см}^3/\text{см}^3$. Полученные результаты сопоставимы со значениями влажности $W = 0,244 \text{ см}^3/\text{см}^3$, определенной независимо термостатно-весовым методом.

Разработана модель формирования интерференционной рефлектограммы почвенными покровами безлесных территорий с применением правоциркулярной и дипольной антенн.

С помощью этой модели проведено восстановление влажности верхнего слоя почвенного покрова. Показано, что значения влажностей, восстановленных из единичных интерференционных рефлектометрических измерений, испытывают значительные вариации, и сделан вывод о необходимости использования массивов данных с большим количеством элементарных отсчетов для оптимизации статистической обработки.

Сопоставление значений восстановленной влажности и измеренной независимым методом показало эффективность восстановления влажности почвы с использованием антенны, принимающей сигнал с вертикальной поляризацией.

Библиографические ссылки

1. Soil Moisture Retrieval Using GNSS-R Techniques: Experimental Results Over a Bare Soil Field / R.-A. Nereida et al. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2009. Vol. 47, № 11. P. 3616–3624.
2. Kristine M. Larson et al. GPS Multipath and Its Relation to Near-Surface Soil Moisture Content // IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2010. Vol. 3, № 4. Part 2. P. 91–99.
3. Mironov V. L., Kosolapova L. G., and Fomin S. V., Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2009. Vol. 47, № 7. P. 2059–2070.
4. Восстановление диэлектрической проницаемости почв и лесных покровов при использовании сигналов навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS / В. Л. Миронов, С. В. Фомин, А. В. Сорокин и др. // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 9/2. С. 99–101.

References

1. Nereida Rodriguez-Alvarez et al., IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, V. 47, N. 11, November 2009, pp. 3616–3624.
2. Kristine M. Larson et al. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2010, Vol. 3, No. 4, part 2, pp. 91–99.
3. Mironov V. L., Kosolapova L. G., and Fomin S. V., IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Jul. 2009, Vol. 47, N. 7, pp. 2059–2070.
4. Mironov V. L., Fomin S. V., Sorokin A. V., Muzalevskiy K. V, Mihaylov M. I., Izvestiya VUZov. Fizika, 2012. Vol. 55, No. 9/2, pp. 99–101.

© Миронов В. Л., Сорокин А. В., Михайлов М. И., Фомин С. В., Музалевский К. В., 2013

УДК 538.956+537.876.42

КОЭФФИЦИЕНТЫ ОТРАЖЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ СЛОИСТОЙ СРЕДЫ И ВОЗМОЖНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОДНОГО ИЛИ ДВУХ СЛОЕВ*

А. В. Репин, А. С. Яценко

Омский государственный педагогический университет
Россия, 644099, Омск, наб. Тухачевского, 14. E-mail: x_rays1@mail.ru

Приведены результаты определения комплексной диэлектрической проницаемости слоистой среды. Описана методика измерения диэлектрических параметров сразу двух образцов с различными диэлектрическими проницаемостями. Проведена проверка возможности определения диэлектрической проницаемости с одновременным использованием коэффициентов отражения и прохождения. Показано, что данный метод применим для измерения в диапазоне частот от 100 МГц до 4 ГГц. Реализован способ автоматического расчета диэлектрических параметров в программной среде MS Excel. Корректное восстановление диэлектрической проницаемостей возможно, если начальные значения отличаются от истинных не более чем на 10 %. Полученные результаты могут быть использованы при проведении диэлектрических измерений.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, коэффициент отражения, коэффициент прохождения, слоистая среда.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-05-00502-а).

REFLECTION AND TRANSMISSION COEFFICIENTS OF THE BEDDED MEDIA AND POSSIBILITY OF DETECTION OF COMPLEX PERMITTIVITY OF ONE OR TWO BEDS

A. V. Repin, A. S. Yashchenko

Omsk State Pedagogical University
14 Tukhachevskiy st., 644099, Omsk, Russia. E-mail: x_rays1@mail.ru

The authors present the results of detection of the complex dielectric permittivity of the bedded medium. A technique of measuring the dielectric parameters of two samples together with different dielectric permittivity. The possibility of determining the dielectric constant using both reflection and transmission coefficients is investigated. It is shown that this method can be used for measurements in the frequency range from 100 MHz to 4 GHz. The method for automatic calculating the dielectric parameters with the software MS Excel was implemented. Correct recovery of the dielectric permittivity is possible if the initial values do not differ from the true values by more than 10 %. The results can be used during the dielectric measurements.

Keywords: dielectric permittivity, reflection coefficient, transmission coefficient, layered medium.

При интерпретации данных полученных дистанционными методами необходимо знать комплексную диэлектрическую проницаемость (КДП) среды в широком интервале частот и температур. Для измерения КДП в диапазоне от 100 МГц до 20 ГГц используют ячейки в виде отрезков коаксиальных линий. В качестве измерителей применяют векторные анализаторы цепей, измеряющие матрицу коэффициентов рассеяния. Для восстановления КДП чаще всего используют модуль и фазу коэффициента прохождения, так как он измеряется точнее и процедура калибровки ячейки проще, чем при измерении коэффициента отражения [1–3]. Также применяется метод восстановления КДП с использованием модулей коэффициентов отражения и прохождения [4; 5]. Однако при проведении долгосрочных температурных измерений ячейки приходится подключать к прибору при каждой температурной точке по очереди. Это приводит к возрастанию времени измерения, так как необходимо ждать, пока в термостате снова установится нужная температура. Для повышения скорости проведения температурных измерений рассмотрена возможность определения КДП при подключении в тракт двух измерительных ячеек с различными образцами. При определении параметров нужно будет использовать и модули, и фазы коэффициентов отражения и прохождения, а также знать априорные значения КДП.

Измерения проводились с помощью векторного анализатора цепей ZNB8 фирмы Rohde&Schwarz измеряющего матрицу коэффициентов рассеяния. В качестве термостата применялась климатическая камера JEIO TESH TH-ME-25 с точностью установки температуры 0,3 °С. Измерительные ячейки представляют собой отрезки коаксиальной линии сечением 16/7 длиной 2 и 10,5 см.

Образцы 2 и 6 (рис. 1) размещались между двумя шайбами из фторопласта 1, 3 и 5, 7. Диэлектрическая проницаемость фторопласта $\epsilon = 2,05 \pm 0,05 - j \cdot 6 \cdot 10^{-4}$. Средой 5, как и средами перед границей 1 и после границы 7, является воздух с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 1 - j \cdot 0$. Комплексный коэффициент

отражения (параметр S_{11}) данной структуры от границы «воздух–шайба» (0–1) [6]:

$$S_{11} = \frac{Z_{\text{BX}1} - Z_0}{Z_{\text{BX}1} + Z_0} \quad (1)$$

где

$$Z_{\text{BX}1} = \frac{Z_{\text{BX}2} + Z_1 \text{th}(jk_1 d_1)}{Z_1 + Z_{\text{BX}2} \text{th}(jk_1 d_1)} Z_1,$$

$Z_{\text{BX}i}$ вычисляются по аналогичным формулам:

$$Z_{\text{BX}i} = \frac{Z_{\text{BX}(i+1)} + Z_i \text{th}(jk_i d_i)}{Z_i + Z_{\text{BX}(i+1)} \text{th}(jk_i d_i)} Z_i,$$

где i – индекс слоя; $Z_{\text{BX}8} = Z_8 = Z_0$, $Z_0 = 50$ Ом – волновое сопротивление линии; $k_i = k_0 \sqrt{\epsilon_i}$ – комплексное волновое число i -го слоя, где ϵ_i – КДП i -го слоя; $k_0 = 2\pi f/c$ – волновое число в вакууме (f – частота; c – скорость света); d_i – толщина i -го слоя; $Z_i = Z_0 / \sqrt{\epsilon_i}$. Комплексный коэффициент передачи (параметр S_{12}) определяется как обратная величина произведения [6]:

$$\frac{1}{S_{12}} = \prod_{i=0}^i \frac{Z_i + Z_{\text{BX}(i+1)}}{Z_{(i+1)} + Z_{\text{BX}(i+1)}} e^{-jk_i d_i}, \quad (2)$$

где размеры d_i показаны на рис. 1, кроме d_0 и d_8 , значения которых принимаются равными нулю. Действительную ϵ' и мнимую ϵ'' части КДП образца можно определить как из (1), так и из (2) методами оптимизации.

При проведении измерений использовались переходники для подключения разъема ZNB8 типа N к линии сечением 16/7. Для коррекции фазы коэффициента отражения необходимо определить физическую длину переходника, а затем вычислить фазу волны, которая набегаёт при прохождении волны до первой границы, и вычесть ее удвоенное значение из измеренных данных. Длину отрезка легко рассчитать, поставив перед слоем 1 короткозамыкатель, и измерив параметр S_{11} . Для коррекции фазы коэффициента прохождения нужно определить физические длины переходников, рассчитать набегающую на них фазу и вычесть ее из измеренной фазы.

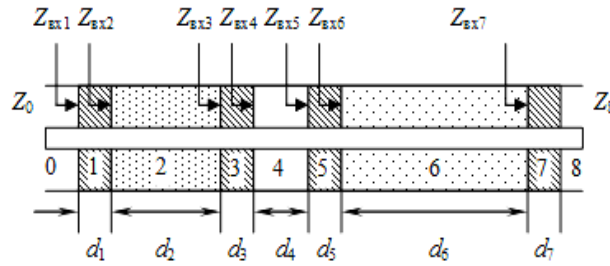


Рис. 1

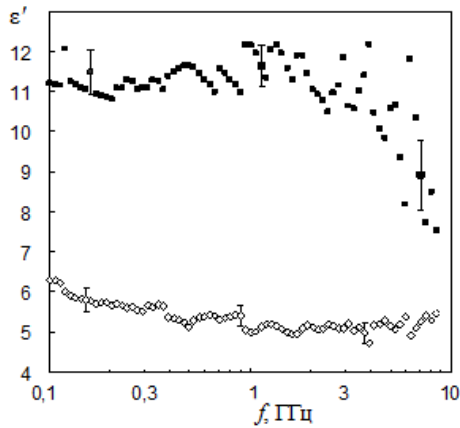


Рис. 2

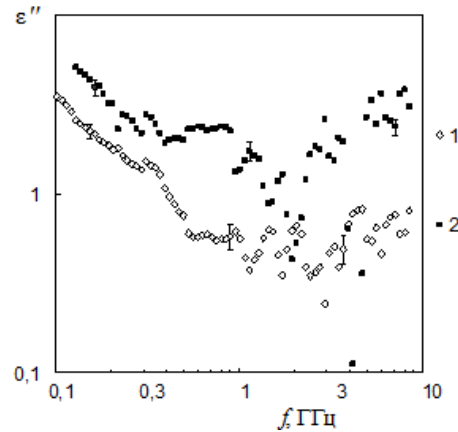


Рис. 3

Методика расчета КДП одного образца аналогична, только нужно учитывать только три первых слоя, а для расчета достаточно взять или коэффициент отражения, или коэффициент прохождения. Априорные значения КДП на частоте 100–150 МГц определяются при помещении ячейки в бокс в разрыв центрального проводника коаксиальной линии. Метод измерения и расчета при таком подключении подробно приведен в [7].

Образцом был выбран речной песок с различной влажностью. В длинной ячейке находился образец объемной влажностью $W_{об} = 0,06 \text{ см}^3/\text{см}^3$, в короткой ячейке образец с $W_{об} = 0,22 \text{ см}^3/\text{см}^3$.

На рис. 2 приведены частотные зависимости действительной части КДП ϵ' для образцов, восстановленных при одновременном измерении. Видно, что значения для образца в длинной ячейке восстановились лучше, чем для образца в короткой ячейке. Погрешности определения ϵ' составили 5 и 5–10 % соответственно. Наибольший разброс значений наблюдается в области от 0,5 ГГц до 3 ГГц в областях интерференционных максимумов и минимумов, где как отмечено в [8] погрешность измерения существенно возрастает. На рис. 3 приведены частотные зависимости действительной части КДП ϵ' для этих же образцов. Погрешности восстановления составляют 10–18 и 10–12 % соответственно.

Исследуемые образцы были также измерены по отдельности. Сравнение диэлектрических проницаемостей показало, что значения для более сухого образца совпадают в пределах погрешности до 8,5 ГГц для действительной части КДП и до 4 ГГц для мнимой части КДП. Для более влажного образца удовлетворительное совпадение наблюдается до частоты 4 ГГц.

Многие программные пакеты компьютерной алгебры (например, Maple и Mathcad) и технических вычислений (например, Matlab) имеют встроенные средства оптимизации функций. Табличный процессор Excel не обладает гибкостью применения и широким функционалом как программы компьютерной алгебры, однако его несомненным достоинством является широкое распространение и низкая цена. Расширить возможности Excel, можно с помощью макросов, созданных во встроенной среде VBA, имеющей много общего с VBA.

Основным средством оптимизации в Excel является Solver, применяемый как в «ручном» режиме, так и в макросах VBA [9]. При увеличении числа переменных в оптимизируемой функции, полученный результат во многом зависит от начальных значений переменных. Используя VBA и Solver, была написана программа автоматического расчета диэлектрической проницаемости. Для проверки возможности определения диэлектрической проницаемости применение Solver осуществлялось в широком диапазоне начальных условий. Анализ восстановленных данных показал, что программа корректно восстанавливает значения КДП, если априорные значения отличаются от истинных не более чем на 10 %. Погрешность определения КДП при помещении ячейки в бокс не превышает 10 %, поэтому их можно выбирать как начальные.

Таким образом, показано, что метод восстановления КДП сразу двух образцов с использованием коэффициентов отражения и прохождения применим в диапазоне частот от 0,1 до 4 ГГц. Реализован алгоритм автоматического расчета КДП.

Библиографические ссылки

1. Бобров П. П., Кондратьева О. В., Репин А. В. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости образца в одной ячейке от десятков герц до единиц гигагерц // Известия вузов. Физика. 2012. № 8/3. С. 23–26.
2. Folgero K. Broad-band dielectric spectroscopy of low-permittivity fluids using one measurement cell // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1998. Vol. 47, № 4. P. 881–885.
3. Sabburg J., Ball J. A. R., Hancock N. H. Dielectric behavior of moist swelling clay soils at microwave frequencies // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1997. Vol. 35, № 3. P. 784–787.
4. Бобров А. П., Галеев О. В. Исследование метода определения диэлектрической проницаемости почв по модулям коэффициентов отражения и прохождения // Естественные науки и экология. Ежегодник ОмГПУ. 2001. С. 3–10.
5. Curtis J. O., Charles A. W. Jr., Everett J. B. Technical Report EL-95-34. 1995.
6. Бреховских В. Л. Волны в слоистых средах. М. : Наука, 1973.
7. Пат. РФ № 2474830 С1, МПК G01R 27/26 Способ измерения комплексной диэлектрической проницаемости жидких и сыпучих веществ в широком диапазоне частот / Бобров П. П., Кондратьева О. В., Репин А. В. ; опубл. 10.02.13, Бюл. № 4.
8. Folgero K. A broad-band and high-sensitivity dielectric spectroscopy measurement system for quality determination of low-permittivity fluids // Measurement Science and Technology. 1995. Vol. 6. P. 995–1008.

9. Создание макросов в Visual Basic с помощью решения Microsoft Excel в Excel 97 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.support.microsoft.com/KB/843304>.

References

1. Bobrov P. P., Kondrateva O. V., Repin A. V. Izvestiya Vuzov. Fizika. 2012, no. 8/3, pp. 23–26.
2. Folgero K. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1998, vol. 47, no 4, pp. 881–885.
3. Sabburg J., Ball J. A. R., Hancock N. H. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1997, vol. 35, no. 3, pp. 784–787.
4. Bobrov A. P., Galeev O. V. Estestvennye nauki i ekologiya. Ezhegodnik OmGPU, 2001, pp. 3–10.
5. Curtis J. O., Charles A. W. Jr., Everett J. B. Technical Report EL-95-34. 1995.
6. Brekhovskikh V. L. Volny v sloistykh sredakh (Waves in Layered Media). Moscow, Nauka, 1973. 343 p.
7. Pat. 2474830 S1 Rossiyskaya Federatsiya, МПК G01R 27/26 Bobrov P. P., Kondrateva O. V., Repin A. V., zayavitel' i patentoobladatel' FBGOU VPO "OmGPU". № 2011134175/28; zayavl. 12.08.11; opubl. 10.02.13; Byul. № 4. 12 p.
8. Folgero K. Measurement Science and Technology. 1995, vol. 6, pp. 995–1008.
9. Sozdanie makrosov Visual Basic s pomoshch'yu resheniya Microsoft Excel v Excel 97 (Create macros in Visual Basic by using Microsoft Excel solutions in Excel 97). Available at: <http://www.support.microsoft.com/KB/843304> (accessed 28 March 2013).

© Репин А. В., Ященко А. С., 2013

УДК 621.396.968

ИЗУЧЕНИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА СОЛЕННЫХ ОЗЕР РАДИОЛОКАЦИОННЫМ МЕТОДОМ*

Г. С. Бордонский, А. О. Орлов, А. А. Гурулев, К. А. Щегрина

Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 672014, Чита, ул. Недорезова, 16а. E-mail: lgc255@mail.ru

Выполнено радиолокационное исследование ледяного покрова содового оз. Доронинского, расположенного в Забайкальском крае. Полученные данные показывают возможность изучения геохимических особенностей водоема после начала процесса таяния, когда возникают заметные пространственные неоднородности электромагнитных свойств снежно-ледяного покрова.

Ключевые слова: содовый лед, радиолокационные измерения.

INVESTIGATION OF SALINE LAKES ICE COVER BY RADAR METHOD

G. S. Bordonskiy, A. O. Orlov, A. A. Gurulev, K. A. Schegrina

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Russian Academy of Sciences Siberian branch
16a Nedorezova st., Chita, 672014, Russia. E-mail: lgc255@mail.ru

Radar investigation of ice cover of soda lake Doroninskoe, located in Zabaikalskiy Region, was carried out. The measurement data show the possibility of geochemical peculiarities study after the beginning of melting process, when significant spatial inhomogeneities of electromagnetic properties of snow-ice cover start to appear.

Keywords: soda ice, radar measurements.

* Работа выполнена при поддержке Интеграционного проекта СО РАН №56 и гранта РФФИ №12-02-31237.