

УДК 621.371.3

С.А. КОМАРОВ*, В.Л. МИРОНОВ**, Ю.И. ЛУКИН**

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВЛАЖНЫХ ПОЧВОГРУНТОВ

Проведено исследование частотного спектра комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) почвы, взятой с полигонного исследовательского участка населенного пункта Бор Красноярского края. Найдены параметры рефракционной модели данной почвы. Рассмотрен способ учета влияния неоднородностей измерительного тракта. Проверена применимость выбранного метода путем измерений КДП воздуха, смеси песка и дистиллированной воды.

Введение

С развитием аппаратных средств дистанционного зондирования земных покровов в радиодиапазоне возникает проблема интерпретации полученных данных. При этом бывает необходимо соотнести результаты радиометрических или радарных измерений с физическими параметрами земли. Для достижения этой цели ведутся работы по исследованию зависимости КДП почв от таких физических и геофизических параметров, как температура, влажность, минеральный состав. Использование лабораторных измерений и модельное описание КДП, которое базируется на экспериментальном знании характерных физических параметров модели, позволяет существенно упростить решение ряда обратных задач радиофизического зондирования. В работах [1, 2] показана применимость рефракционной модели для описания диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь почвогрунтов.

В данной работе рассмотрен способ восстановления частотной зависимости КДП почвогрунтов в лабораторных условиях с применением коаксиально-волноводных секций, развитый из методик, описанных в [3, 4]. Проведено исследование частотного спектра КДП реальных почвогрунтов с использованием векторного анализатора цепей *ZVK*, изготовленного фирмой *Rohde-Schwarz*. Учет влияния неоднородностей переходных устройств в измерительном тракте при восстановлении КДП образца проводится с помощью процедуры калибровочных измерений с использованием двух пустых контейнеров разной длины.

Обработка экспериментальных данных позволила получить физические параметры рефракционной модели, необходимые для описания изучаемых почв.

Работа выполнялась в рамках плановых научно-исследовательских работ совместно с Институтом физики им. Л.В. Киренского СО РАН в г. Красноярске и Российской академией наук по государственному контракту в рамках тематики «Методика новых высокоинформативных методов и программно-аппаратных средств микроволновой радиометрии для мониторинга биогеохимических циклов приполярных территорий Сибири».

1. Методика измерений

При выборе методики измерений принималась во внимание необходимость найти комплексную диэлектрическую проницаемость в широком частотном диапазоне. В связи с этим был изготовлен коаксиальный контейнер, подключаемый к векторному анализатору цепей *ZVK* фирмы *Rohde-Schwarz*. Векторный анализатор позволяет измерять частотный спектр элементов *S*-матрицы рассеяния подключаемого устройства в широком частотном диапазоне. Измерительные контейнеры представляют собой отрезки коаксиального волновода, диэлектрическим заполнением которых является исследуемый образец. Размеры контейнера обеспечивают одномодовый режим, то есть условие распространения волны основного типа ТЕМ и подавления высших мод.

В измерительном волноводном тракте можно выделить две составные части: участок, содержащий исследуемый образец, и переходные устройства, выполняющие функцию согласования с разъемами векторного анализатора. Тогда для всего волноводного тракта можно записать матрицу передачи через матрицы передачи измерительных секций [3, 5]:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_1 \mathbf{T}_x \mathbf{T}_2, \quad (1)$$

где $\mathbf{T}_1$, $\mathbf{T}_2$ – матрицы передачи переходных устройств, расположенных соответственно до и после контейнера с образцом, который описывается матрицей $\mathbf{T}_x$. Элементы матриц, входящих в (1), связаны с элементами матриц рассеяния $\mathbf{S}$ следующим образом [5]:

$$\mathbf{T}_i = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{S_{22}^i}{S_{21}^i} \\ \frac{S_{21}^i}{S_{21}^i} & \frac{S_{21}^i S_{12}^i - S_{11}^i S_{22}^i}{S_{21}^i} \end{pmatrix}, \quad i = 1, x, 2. \quad (2)$$

Если контейнер не заполнен веществом, то при выполнении условия одномодового режима матричное равенство (1) можно расписать через соотношения их элементов:

$$\begin{cases} t_{11} = t_{11}^1 t_{11}^2 e^{-ik_0 d} + t_{12}^1 t_{21}^2 e^{ik_0 d}, \\ t_{12} = t_{11}^1 t_{12}^2 e^{-ik_0 d} + t_{12}^1 t_{22}^2 e^{ik_0 d}, \\ t_{21} = t_{21}^1 t_{11}^2 e^{-ik_0 d} + t_{22}^1 t_{21}^2 e^{ik_0 d}, \\ t_{22} = t_{21}^1 t_{12}^2 e^{-ik_0 d} + t_{22}^1 t_{22}^2 e^{ik_0 d}, \end{cases} \quad (3)$$

где $k_0 = 2\pi f/c$ – волновое число в свободном пространстве; d – длина контейнера; c – скорость света в вакууме; f – частота сигнала.

Систему (3) можно рассматривать относительно восьми неизвестных: $t_{11}^1 t_{11}^2$, $t_{12}^1 t_{21}^2$, $t_{11}^1 t_{12}^2$, $t_{12}^1 t_{22}^2$, $t_{21}^1 t_{11}^2$, $t_{22}^1 t_{21}^2$, $t_{21}^1 t_{12}^2$, $t_{22}^1 t_{22}^2$, которые являются характеристиками переходных устройств.

Для решения уравнения (3) требуется взять два пустых калибровочных контейнера разной длины d_1 и d_2 .

Из системы уравнений (1) можно найти t_{11}^x и t_{22}^x при известных характеристиках переходных устройств: $t_{11}^1 t_{11}^2$, $t_{12}^1 t_{21}^2$, $t_{11}^1 t_{12}^2$, $t_{12}^1 t_{22}^2$, $t_{21}^1 t_{11}^2$, $t_{22}^1 t_{21}^2$, $t_{21}^1 t_{12}^2$, $t_{22}^1 t_{22}^2$. Элементы t_{11}^x и t_{22}^x связаны с волновым числом k и длиной образца d следующим образом [4]:

$$\cos(kd) = \frac{1 + (S_{21}^x)^2 - (S_{22}^x)^2}{2S_{21}^x} = \frac{t_{11}^x + t_{22}^x}{2}. \quad (4)$$

Из (4) нетрудно получить комплексное значение диэлектрической проницаемости ε образца:

$$\varepsilon = \left(\frac{ck}{2\pi f} \right)^2, \quad (5)$$

где

$$k = \frac{\arccos\left(\frac{t_{11}^x + t_{22}^x}{2}\right)}{d}. \quad (6)$$

Таким образом, измерение предполагает два этапа. На первом этапе проводится калибровочная процедура с двумя незаполненными контейнерами различной длины. На втором этапе контейнер заполняется измеряемым образцом; с помощью калибровочных соотношений находятся параметры рассеяния заполненной секции, откуда посредством формул (4) – (6) вычисляется КДП измеряемого образца.

2. Рефракционная модель смеси для почвогрунтов

Рефракционную модель смеси (РМС) для почвогрунтов [1] удобно записывать в терминах коэффициента преломления n и приведенного коэффициента поглощения κ , которые связаны с КДП как $\sqrt{\varepsilon} = n + i\kappa$. Согласно [1], РМС для n и κ почвогрунтов записывается в следующем виде:

$$n = \begin{cases} n_d + (n_b - 1)W, & W \leq W_t, \\ n_d + (n_b - 1)W_t + (n_f - 1)(W - W_t), & W > W_t; \end{cases} \quad (7)$$

$$\kappa = \begin{cases} \kappa_d + (\kappa_b - 1)W, & W \leq W_t, \\ \kappa_d + (\kappa_b - 1)W_t + (\kappa_f - 1)(W - W_t), & W > W_t, \end{cases} \quad (8)$$

где W_t – предельное содержание связанной влаги в данном типе почвы; индексы d, b, f относятся к сухой смеси, связанной и свободной воде соответственно. Величины n_d и κ_d связаны с плотностью сухой смеси следующим образом:

$$n_d = 1 + \frac{\rho}{\rho_m}(n_m - 1); \quad (9)$$

$$\kappa_d = \frac{\rho}{\rho_m}\kappa_m, \quad (10)$$

где ρ и ρ_m – плотности сухой смеси и монолита соответственно; n_m и κ_m – коэффициенты преломления и поглощения монолита.

Диэлектрические свойства связанной и свободной воды хорошо описываются формулой Дебая

$$\epsilon_{b,f} = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_{sb,f} - \epsilon_\infty}{1 - i2\pi f\tau_{b,f}} + i \frac{\sigma_{b,f}}{2\pi f\epsilon_0}. \quad (11)$$

Здесь ϵ_∞ – «оптическая» диэлектрическая проницаемость, определяемая атомной и электронной поляризациями, не зависящими от частоты f сигнала; $\epsilon_{sb,f}$ – «статическая» диэлектрическая проницаемость; $\tau_{b,f}$ – эффективное время релаксации молекул; $\sigma_{b,f}$ – ионная проводимость водного раствора; $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума. Индексы b и f относятся к связанной и свободной воде соответственно. Значения дебаевских параметров для свободной воды ϵ_{sf} , τ_f , σ_f в зависимости от температуры и содержания растворимых солей были установлены эмпирически [6].

3. Тестовые измерения

Для тестирования методики были выбраны два образца: воздух и увлажненный песок. Выбор песка в качестве тестового образца обусловлен тем, что диэлектрические свойства крупнозернистого песка, увлажненного водой, хорошо изучены [1]. Результаты представлены в виде коэффициентов преломления и приведенного коэффициента поглощения образцов. При восстановлении КДП воздуха оказалось, что на частотах ниже 500 МГц происходит расхождение решения задачи. В диапазоне частот от 500 МГц до 5 ГГц относительная погрешность восстановления n не превышает 1%. Так как теоретическое значение κ является нулем, то в данном случае возможно лишь рассмотрение абсолютной погрешности. Абсолютная погрешность для κ в диапазоне частот от 500 МГц до 5 ГГц не превышает 0,006. Расходимость алгоритма восстановления на низких частотах связана с тем, что длина волны становится слишком велика в сравнении с длиной контейнера, и данная методика становится неприменимой.

На рис. 1 изображены восстановленные и модельные кривые частотных спектров n и κ песка при различном содержании влажности. Для спектроскопических параметров воды в рефракционной модели песка использовались эмпирические формулы Стогрин [6]. Относительная погрешность измерения n не превысила 6%. Абсолютная погрешность для κ не превысила 0,04.

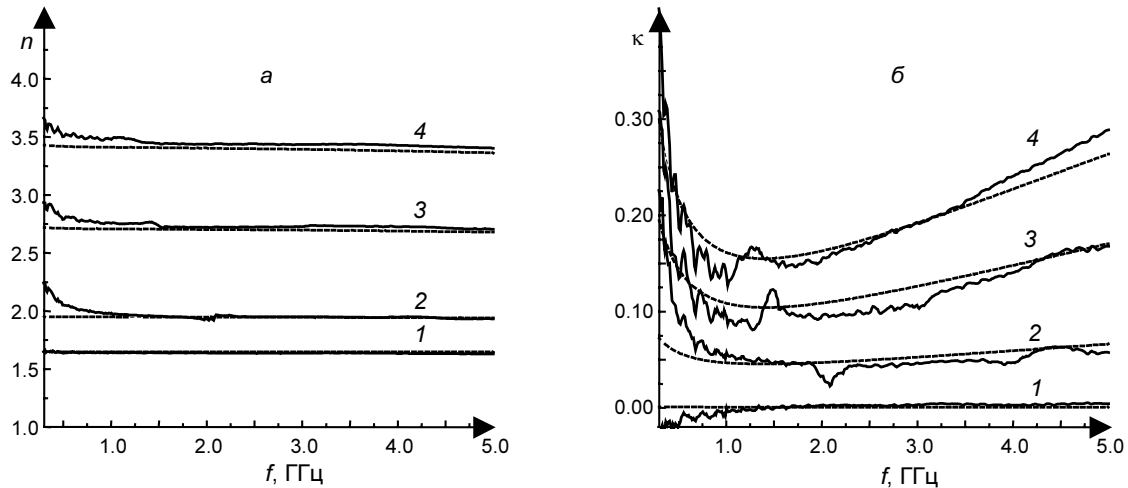


Рис. 1. Измеренные и модельные (выделено пунктиром) коэффициенты преломления n (а) и поглощения k (б) для увлажненного песка: $W = 0$ (кр. 1), 0,04 (кр. 2), 0,14 (кр. 3) и 0,21 (кр. 4)

4. Измерения для почвы

В рамках совместного исследовательского проекта с Красноярским институтом физики им. Л.В. Киренского требовалось измерить спектры коэффициентов преломления n и поглощения k , построить физическую модель почвы, взятой с полигонного исследовательского участка вблизи населенного пункта Бор Красноярского края в целях дальнейшего использования модели при решении обратных задач дистанционного радиометрического и радарного зондирования.

На рис. 2 изображены зависимости n и k почвы от влажности при различных частотах электромагнитного поля.

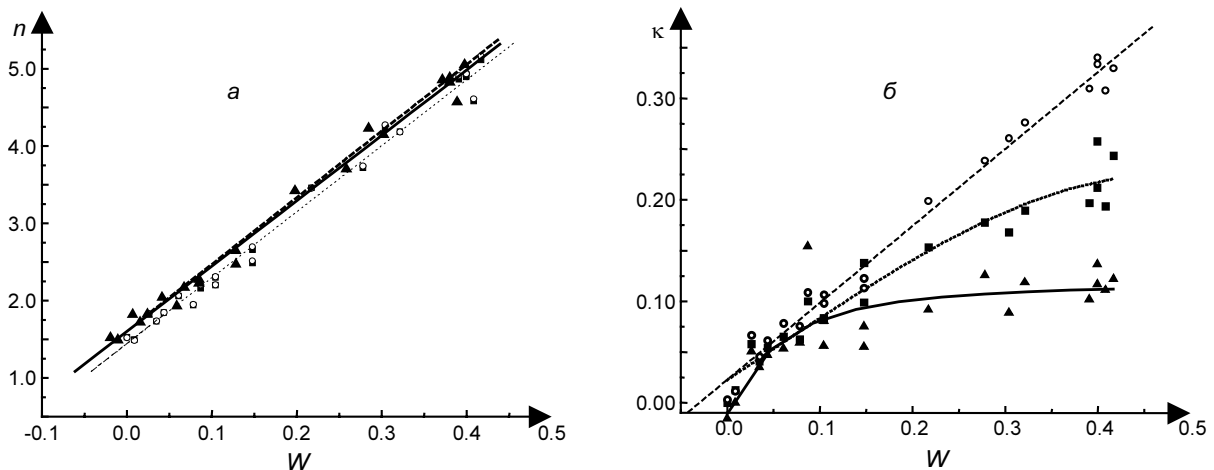


Рис. 2. Зависимость коэффициентов преломления n (а) и поглощения k (б) почвы от объемного содержания влаги: $f = 5,0$ (○), 1,5 (■) и 0,5 ГГц (▲)

Из графиков на рис. 2 видно, что с уменьшением частоты происходит заметное нарушение линейной зависимости n и k относительно объемного содержания воды. Это связано с содержанием в почве растворимых солей. Действительно, при увеличении объемной влажности происходит уменьшение концентрации S солей в почвенном растворе. По этой причине возникает зависимость S от влажности W , а вместе с этим и зависимость от влажности и параметров Дебая для воды (ϵ_s , τ , σ) [3]. Вследствие появления такой зависимости нарушается линейный характер рефракционных формул, однако ранее было показано, что эти формулы в данной ситуации оказываются применимыми [3]. Следует заметить также, что на графиках рис. 2 отсутствует кусочно-ломанная зависимость. Это означает, что в изучаемой почве практически отсутствует связанная вода.

В данном случае параметры рефракционной модели были определены аппроксимацией восстановленных значений n и k почвы относительно объемного содержания воды W с помощью функций (7), (8) с параметрами Дебая, нелинейно зависящими от влажности и описываемыми экспериментальными формулами Стогрин [6]. Пользуясь тем, что в формулах Стогрин можно выделить релаксационные параметры незасоленной воды, которой увлажняется почва, были найдены дебаевские параметры этой воды и засоленность почвы Z . Параметр $(n_m - 1)/\rho_m$, характеризующий свойства монолита, был определен из данных n и k для сухой смеси с помощью формулы (9). Зависимость коэффициента поглощения сухой смеси κ_d от плотности не рассматривалась ввиду малости этой величины. В таблице приведены восстановленные параметры РМС и дебаевские параметры незасоленной воды, которой увлажняется почва.

Рефракционные параметры

Параметры почвы	Значение	Параметры воды	Значение
$(n_m - 1)/\rho_m$	0,44	ε_0	79
κ_d	0,011	τ , пс	9,45
W_t	0		
Z , %	0,4		

На рис. 3 изображены измеренные и модельные кривые частотных спектров n и k песка при различном содержании влажности. Относительная погрешность измерения n не превышает 4%. Абсолютная погрешность для k не превышает 0,04.

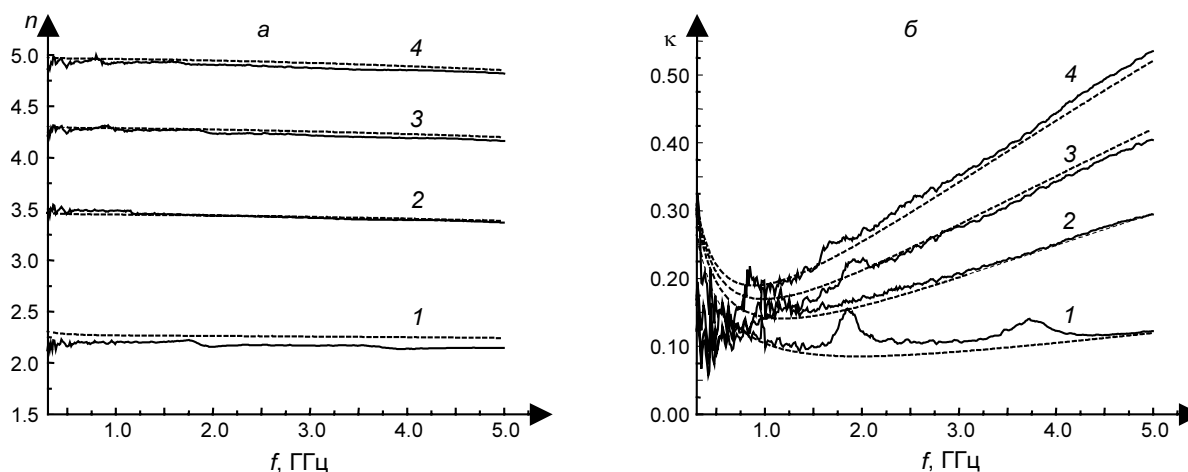


Рис. 3. Измеренные и модельные (выделено пунктиром) коэффициенты преломления n (а) и поглощения k (б) для увлажненной почвы: $W = 0,08$ (кр. 1), $0,22$ (кр. 2), $0,32$ (кр. 3) и $0,43$ (кр. 4)

Заключение

Проведены измерения комплексной диэлектрической проницаемости влажных почвогрунтов в частотном диапазоне 0,5–5,0 ГГц. С помощью соотношений для неоднородных линий передач произведен учет влияния в СВЧ-тракте рассеивающих характеристик переходов контейнера при решении задачи восстановления КДП вещества.

Тестовая проверка проводилась путем измерений КДП смеси песка и дистиллированной воды. Максимальная относительная погрешность измерения коэффициента преломления при этом составила 6%, максимальная абсолютная погрешность коэффициента поглощения – 0,04.

Найдены физические параметры рефракционной модели почвы, взятой с полигонного участка населенного пункта Бор Красноярского края.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров С.А., Миронов В.Л. Микроволновое зондирование почв. – Новосибирск: НИЦ СО РАН, 2000. – 289 с.
2. Клещенко В.Н., Комаров С.А., Миронов В.Л. – Барнаул: Изд-во АГУ, 2000. – 54 с. / Препринт АГУ № 3.
3. Комаров С.А., Лукин Ю.И. Учет влияния элементов волноводного тракта при измерениях диэлектрической проницаемости. – Барнаул: Изв. АГУ, 2006. – № 1. – С. 126–130.
4. Gorrii A. and Slob E. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2005. – V. 43. – No. 9. – P. 2051–2057.
5. Хелзайн Дж. Пассивные и активные цепи СВЧ. – М.: Радио и связь, 1981. – 200 с.
6. Stogryn A. // IEEE Trans. Microwave Theory Thech. – 1971. – V. MTT-19. – P. 733–736.

*Алтайский госуниверситет

E-mail: komarov@phys.asu.ru

**Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН

E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru

yura_lu@mail.ru