

С.А. Комаров, Ю.И. Лукин
**Учет влияния элементов волноводного тракта
 при измерениях диэлектрической проницаемости***

Методы микроволнового зондирования приповерхностных слоев почвы основаны на знании ее диэлектрических характеристик [1]. Для восстановления физических параметров требуется изучить зависимость между комплексной диэлектрической проницаемостью почвы и искомыми параметрами. Наличие воды в почве определяет ее дисперсные свойства, поэтому целесообразно рассматривать в процессе изучения не конкретные частоты, а целый частотный диапазон. Для этого необходимо разрабатывать методики, позволяющие изучать частотную зависимость комплексной диэлектрической проницаемости образцов почвы. Наиболее современными и перспективными являются методы измерения, в основе которых лежит использование векторных анализаторов – приборов, позволяющих в широких частотных диапазонах с высокой точностью и малыми временными затратами на проведение эксперимента измерять частотную зависимость рассеивающих характеристик СВЧ-устройств. В настоящее время ведутся работы по совершенствованию методик измерений комплексной диэлектрической проницаемости влажных почвогрунтов с использованием векторных анализаторов [2].

Цель данной работы – развитие алгоритма восстановления комплексной диэлектрической проницаемости почвогрунтов из измеренных характеристик рассеяния волноводного контейнера в широком диапазоне частот, заполненного исследуемым веществом.

Описание измерительной установки. На рисунке 1 изображена блок-схема экспериментальной установки для измерений параметров рассеяния волноводного тракта, подключенного к входным портам векторного анализатора А.

Установка такого типа позволяет определить комплексные элементы S-параметров, которые связывают следующим соотношением напряженности электрического поля на входе порта 1 (E_1^+ , E_1^-) и на входе порта 2 (E_2^+ , E_2^-):

$$\begin{cases} E_1^- = E_1^+ S_{11} + E_2^- S_{21}, \\ E_2^+ = E_1^+ S_{12} + E_2^- S_{22}. \end{cases} \quad (1)$$

со знаком «плюс» указана напряженность электрического поля для волны, падающей со сторо-

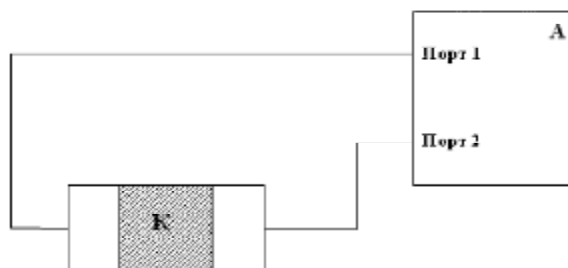


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки

ны порта 1, со знаком «минус» – для волны, падающей со стороны порта 2.

Образцы грунта помещаются в контейнер К, которым служит отрезок коаксиального волновода. Для уменьшения потерь контейнер имеет серебряное покрытие. Предполагается работа такой установки в частотном диапазоне измерений от 500 до 4000 МГц. Элементы волноводного тракта имеют волновое сопротивление 50 Ом. Для согласования контейнера с трактом векторного анализатора используются переходные устройства. Конструкция измерительного устройства обеспечивает реализацию одномодового режима волны основного типа ТЕМ и подавление высших мод.

Восстановление комплексной диэлектрической проницаемости из S-параметров. Предполагаем, что в измерительной линии распространяется волна вида $e^{-\gamma z}$, где γ – коэффициент распространения для ТЕМ волны, который выражается согласно формуле

$$\gamma = j(\omega/c_0)\sqrt{\varepsilon}, \quad (2)$$

где ε – величина комплексной диэлектрической проницаемости заполнения линии.

За основу метода восстановления величины комплексной диэлектрической проницаемости из измеренных S-параметров выбран метод, рассмотренный в [2] и [3], который представляет собой записанные в матричном виде соотношения для линии передачи. Особенность этого метода в том, что происходит учет параметров рассеяния переходов, в противном случае может быть внесена значительная погрешность в результат восстановления ε . Авторы статьи [3] предлагают учесть влияние переходов в экспе-

* Работа выполнена в рамках научной тематики лаборатории радиофизики дистанционного зондирования Института физики СО РАН (г. Красноярск).

рименте путем разбиения области переходов на однородные подобласти, для каждой из которых считаются известными геометрические размеры и комплексная диэлектрическая проницаемость. Выражение напряженности электрического поля на входе порта 1 относительно поля на входе порта 2 записывается следующим образом:

$$E_1 = LPRE_N, \quad (3)$$

где

$$E_1 = \begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix}, \quad E_N = \begin{bmatrix} E_N^+ \\ E_N^- \end{bmatrix},$$

N – число разбиений на слои.

$$P = M_p^R (M_p^L)^{-1}, \quad (4)$$

$$L = (M_1^L)^{-1} \begin{bmatrix} \text{II} & \\ & \text{II} \end{bmatrix}_{n=2}^{n=p-1} M_n^R (M_n^L)^{-1}, \quad (5)$$

$$R = \begin{bmatrix} \text{II} & \\ & \text{II} \end{bmatrix}_{n=p+1}^{n=N-1} M_n^R (M_n^L)^{-1} M_N^R, \quad (6)$$

индекс n указывает на позицию области разбиения, индекс p определяет номер позиции области, соответствующей контейнеру, M_n^R и M_n^L – матрицы, которые вычисляются по следующим формулам:

$$M_n^L = \begin{bmatrix} e^{-\gamma n d_n} & 1 \\ \frac{1}{Z_n} e^{-\gamma n d_n} & -\frac{1}{Z_n} \end{bmatrix},$$

$$M_n^R = \begin{bmatrix} 1 & e^{-\gamma n d_n} \\ \frac{1}{Z_n} & -\frac{1}{Z_n} e^{-\gamma n d_n} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

где Z_n – волновое сопротивление, которое для коаксиального волновода определяется по формуле:

$$Z_n = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon}}, \quad Z_0 = \frac{\ln(a/b)}{2\pi}.$$

Из формулы (3) для волны, падающей из порта 1 векторного анализатора, запишем выражение:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ S_{11} \end{bmatrix} = LPR \begin{bmatrix} S_{12} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Для волны, падающей из порта 2, выражение запишется в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ S_{21} \end{bmatrix} = LPR \begin{bmatrix} S_{22} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Далее предлагается рассчитать матрицы L и R по формулам (5) и (6), затем скорректировать параметры переходов, входящие в формулы по методу калибровки, описанному в [3]. Комплексная диэлектрическая проницаемость образца вычисляется из элементов матрицы P , которые

находятся путем решения уравнения (8) или (9) относительно P . Такой подход не всегда применим на практике, так как требует знания и учета в расчетах конструкции и точных значений параметров переходов. Это возможно лишь при небольшом их количестве и в простых конструкциях. Поэтому в данной работе предложен другой метод учета влияния переходов в эксперименте, он изложен ниже.

Методика калибровки измерительной секции. Из формул (8, 9) можно получить выражение для элементов матрицы

$$T = LPR \quad (10)$$

через S -параметры:

$$T = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{pmatrix},$$

$$t_{11} = \frac{1}{S_{12}}, \quad t_{12} = -\frac{S_{22}}{S_{12}},$$

$$t_{21} = \frac{S_{11}}{S_{12}}, \quad t_{22} = \frac{S_{12}S_{21} - S_{11}S_{22}}{S_{12}}. \quad (11)$$

Матрицы L и R зависят только от конструкции переходов и определяют их влияние в измерительном тракте. Чтобы определить эти матрицы, необходимо провести измерение S -параметров измерительной секции с известным заполнением контейнера, затем вычислить матрицы P и T и решить уравнение (10) относительно L и R . Это позволит восстановить комплексную диэлектрическую проницаемость из эксперимента с исследуемым веществом из решения уравнения (10) относительно P с известными матрицами R и L .

Нетрудно видеть, что решение (10) относительно L и R приводит к незамкнутой системе нелинейных алгебраических уравнений. Расписывая систему (10) покомпонентно с учетом

$$L = \begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \end{pmatrix}, \quad R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

получим:

$$\begin{cases} l_{11}p_{11}r_{11} + l_{12}p_{21}r_{11} + l_{11}p_{12}r_{21} + l_{12}p_{22}r_{21} = t_{11}, \\ l_{11}p_{11}r_{12} + l_{12}p_{21}r_{12} + l_{11}p_{12}r_{22} + l_{12}p_{22}r_{22} = t_{12}, \\ l_{21}p_{11}r_{11} + l_{22}p_{21}r_{11} + l_{21}p_{12}r_{21} + l_{22}p_{22}r_{21} = t_{21}, \\ l_{21}p_{11}r_{12} + l_{22}p_{21}r_{12} + l_{21}p_{12}r_{22} + l_{22}p_{22}r_{22} = t_{22}. \end{cases} \quad (13)$$

В системе (13) видно, что коэффициент при p_{ij} в $[(r-1)2 + s]$ -м уравнении равен

$$l_{ri}r_{js} = g_{lm}, \quad (14)$$

где $l = (r-1)2 + s$, $m = (i-1)2 + j$.

Таким образом, ясно, что для нахождения матрицы P нет необходимости решать (13) относительно компонент L и R , достаточно решить систему относительно комбинаций $l_{ri}r_{js}$, т.е. найти g_{lm} , при этом (13) сведется к линейной системе. В литературе выражение (14) называется прямым произведением матриц [4] и записывается следующим образом:

$$G = L \otimes R,$$

где G – матрица, составленная из элементов g_{lm} .

Уравнения (13) можно переписать в следующем виде:

$$GP = T, \quad (15)$$

где P и T записываются в виде матриц-столбцов:

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} \\ p_{21} \\ p_{12} \\ p_{22} \end{pmatrix}, T = \begin{pmatrix} t_{11} \\ t_{12} \\ t_{21} \\ t_{22} \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Система (15) является линейной алгебраической системой относительно G из четырех уравнений с 16 неизвестными.

Если расписать матрицу P по формуле (4), получим:

$$P = \begin{pmatrix} \frac{e^{\gamma p d p} + e^{-\gamma p d p}}{2} & Z_p \frac{e^{\gamma p d p} - e^{-\gamma p d p}}{2} \\ \frac{1}{Z_p} \frac{e^{\gamma p d p} - e^{-\gamma p d p}}{2} & \frac{e^{\gamma p d p} + e^{-\gamma p d p}}{2} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Из (17) видно, что $p_{11} = p_{22}$, поэтому в (15) можно объединить коэффициенты при p_{11} и p_{22} и преобразовать систему (15) в систему уравнений третьего порядка относительно G с 9 неизвестными.

Чтобы дополнить преобразованную систему (15), можно провести дополнительные измерения с известным заполнением контейнера. Для составления замкнутой системы требуются три измерения, в результате чего получим

$$GP_i = T_i, \quad (18)$$

где $i = 1..3$.

Систему (18) можно переписать в виде:

$$G\tilde{P} = \tilde{T}, \quad (19)$$

$$\text{где } \tilde{P} = \begin{pmatrix} p_{11}^1 & p_{11}^2 & p_{11}^3 \\ p_{21}^1 & p_{21}^2 & p_{21}^3 \\ p_{12}^1 & p_{12}^2 & p_{12}^3 \end{pmatrix}, \tilde{T} = \begin{pmatrix} t_{11}^1 & t_{11}^2 & t_{11}^3 \\ t_{12}^1 & t_{12}^2 & t_{12}^3 \\ t_{21}^1 & t_{21}^2 & t_{21}^3 \end{pmatrix}.$$

Система (18) имеет единственное решение, если определители матриц \tilde{P} и \tilde{T} не равны

нулю. Такое возможно в том случае, если контейнеры имеют различную длину и, по крайней мере, один эксперимент проводится с заполнением, которое имеет диэлектрические свойства, отличные от предыдущих экспериментов.

Определитель матрицы \tilde{P} имеет следующий вид:

$$\det(\tilde{P}) = \left(\frac{Z'}{Z} - \frac{Z}{Z'} \right) [X^1 Y^2 Y^3 - X^2 Y^1 Y^3 + X^3 Y^1 Y^2], \quad (20)$$

$$\text{где } X^n = \frac{e^{\gamma p d p} + e^{-\gamma p d p}}{2}, Y^n = \frac{e^{\gamma p d p} - e^{-\gamma p d p}}{2}$$

для n -того измерения.

Требуется выбрать такое заполнение контейнера, чтобы

$$\left(\frac{Z'}{Z} - \frac{Z}{Z'} \right) \neq 0, \quad (21)$$

кроме того, накладывается ограничение на ε образца и длину контейнера, обусловленное неравенством:

$$[X^1 Y^2 Y^3 - X^2 Y^1 Y^3 + X^3 Y^1 Y^2] \neq 0. \quad (22)$$

Если условия (21) и (22) выполняются, то можно найти матрицу G :

$$G = \tilde{T}(\tilde{P})^{-1}. \quad (23)$$

Восстановление комплексной диэлектрической проницаемости образца. Будем использовать уравнение (15) и поставим задачу нахождения неизвестного ε заполнения контейнера. Пусть матрица G определена с помощью калибровочной процедуры, описанной в п. 3, а матрица T вычисляется по формулам (11) через измененные S -параметры:

$$P = G^{-1}T. \quad (24)$$

Используя формулу (17), находим коэффициент распространения волны:

$$\gamma_p = \frac{\text{arch}(p_{11})}{d_p}. \quad (25)$$

После этого комплексная диэлектрическая проницаемость заполнения образца выражается по формуле:

$$\sqrt{\varepsilon} = \frac{c_0 \gamma_p}{j\omega}. \quad (26)$$

Выводы. Разработан метод калибровки лабораторной установки, предназначенной для измерений комплексной диэлектрической проницаемости дисперсных сред в микроволновом диапазоне. Используя метод матриц распространения, производится учет влияния в СВЧ-тракте рассеивающих характеристик переходов кон-

тейнера при решении задачи восстановления комплексной диэлектрической проницаемости вещества. Данный метод позволяет использовать переходы произвольной конструкции. Единственным ограничением является выполнение в тракте одномодового режима и согласование волновых сопротивлений элементов линии передачи. При реализации подхода в широком диапазоне частот возможно появление неоднозначности решения на некоторых частотах. В таком

случае требуется вводить дополнительные условия, ограничивающие область допустимых решений. Эту трудность следует также учитывать при проектировании контейнеров и выборе их геометрических размеров.

Подход предполагается использовать при измерениях частотной зависимости вещественной и мнимой частей диэлектрической проницаемости влажных грунтов в дециметровом и сантиметровом диапазонах.

Литература

1. Комаров С.А. Микроволновое зондирование почв / С.А. Комаров, В.Л. Миронов. Новосибирск, 2000.
2. Ainhoa G. Slob Comparison of the Different Reconstruction Techniques of Permittivity From S-Parameters / G. Ainhoa, Gorriti, C. Evert // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2005. Vol. 43. №9.
3. Ainhoa G. Gorriti, Evert C. Slob A New Tool for Accurate S-Parameters Measurements and Permittivity Reconstruction / G. Ainhoa, Gorriti, C. Evert // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2005. Vol. 43. №8.
4. Ланкастер П. Теория матриц. М., 1973.