

Об опыте измерения диэлектрической проницаемости “живой” древесины

А.А. Калинин, М.С. Крылова, В.М. Масюк, А.Ю. Каковкина, Е.А. Хромец

Институт Радиотехники и Электроники им. В.А.Котельникова РАН, 103907, Москва,
ул.Моховая, 11. Тел.: +7(495) 629-33-65, Факс: +7(495) 629-36-78, E-mail:
kalinkevich@newmail.ru

При анализе обратного отражения от лесов необходимы сведения о диэлектрической проницаемости живой древесины. Сделана попытка развить методику измерения комплексной диэлектрической проницаемости “живой” древесины посредством помещения внутрь дерева дипольной антенны в обтекатель в диапазоне 2,45ГГц.

Permittivity of "live" trunks data are necessary at the analysis of backscattering from forests. An attempt to develop a technique of complex permittivity measurement of "live" trunk at 2.45 GHz by means of an insert into tree the dipole antenna in radome was made.

Влияние комплексной диэлектрической проницаемости стволов деревьев на обратное отражение лесов

При моделировании обратного отражения от леса необходимы сведения о диэлектрической проницаемости “живой” древесины. Диэлектрическая проницаемость растительного покрова определяется его влажностью. В работе [1] разработан метод измерения диэлектрических свойств элементов растительного покрова. Метод основан на измерении в лабораторных условиях в широком диапазоне частот комплексного коэффициента отражения антенны, плотно прижимаемой к ровной поверхности элементов растительного покрова. В качестве антенны использовался открытый конец фидерной линии. В этой работе рассматривалась диэлектрическая дисперсная модель, в которой определялось распределение свободной и связанной воды внутри образца, и их влияние на общую диэлектрическую проницаемость. Была найдена зависимость диэлектрических свойств элементов растительности от влаги, частоты и температуры:

$$\varepsilon_v = A(m_v) + B(m_v) \left[\varepsilon_o + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_o}{1 - i f / f_0} + i \frac{22.74}{f} \right] + C(m_v) \left[1 + \frac{18.97}{1 + \sqrt{-i f / 0.18}} \right], \quad (1)$$

где $A(m_v) = 1.7 + 3.2m_v + 6.5m_v^2$,

$B(m_v) = 0.166m_v(1 + 4.94m_v)$ - относительный объем свободной воды;

$$C(m_v) = \frac{91.06m_v^2}{1 + 59.5m_v^2} - \text{относительный объем связанной воды.} \quad (2)$$

$$\varepsilon_o = 4.9, \quad \varepsilon_s(t) = 88.045 - 0.4147t + 6.295 \cdot 10^{-4}t^2 + 1.075 \cdot 10^{-5}t^3 \quad (3)$$

$$f_0(t) = \frac{9.0}{1 - 3.44 \cdot 10^{-2}t + 6.24 \cdot 10^{-4}t^2 - 4.59 \cdot 10^{-6}t^3} - \text{частота релаксации молекулы} \quad (4)$$

Здесь t - выражена в градусах Цельсия, а частоты f и f_0 - в ГГц, m_v - объемная влажность воды, которая связана с ее весовой концентрацией m_g соотношением:

$$m_v = \frac{m_g \rho_c}{1 - m_g(1 - \rho_c)}, \quad (\rho_c - \text{плотность твердой клетчатки}) \quad (5)$$

Примечание: в литературе часто утверждается, что в поляризации роль связанной воды сравнительно невелика. Расчеты по указанным формулам показывают, что роль свободной воды и связанной в диэлектрической проницаемости сопоставимы

$$\varepsilon_{\text{своб. воды}} = 5.33 + i9.47, \quad \varepsilon_{\text{связ. воды}} = 6.41 + i3.6 \quad (\text{расчеты выполнены при } m_g = 0.7, T_0 = 0^\circ\text{C}, f = 2.45 \text{ ГГц}).$$

Таким образом, метод определения диэлектрических свойств растительности основан на взятии проб из дерева и определении его влажности. Влажность “живой” древесины, а значит, комплексная диэлектрическая проницаемость меняются в течение года в зависимости от типа древесной растительности, от погоды и т.д. Поэтому была поставлена задача сезонных измерений в одной точке дерева комплексной диэлектрической проницаемости ε_c^* “живой” древесины.

В работе [2] описаны методы измерения диэлектрических свойств с помощью сверхвысоких частот, основанные на взятии проб и проведении лабораторных измерений. В работе [3] для измерения комплексной диэлектрической проницаемости ровного верхнего слоя предложено использовать экранированную копланарную линию. В работах [4–6] подробно изучено влияние поглощающей среды на отражательные свойства антенн, и рассмотрен метод использования антенны, помещаемой в однородную диэлектрическую среду, для измерения ее параметров. Основное внимание уделяется вибраторной антенне. Этот метод взят за основу, несмотря на то, что использовать теоретические результаты этих работ для измерения диэлектрических свойств живой древесины не удастся. Основная трудность заключается в том, что древесина не однородна по глубине ствола, кроме того, поверхность ее покрыта слоем коры, между антенной и древесиной образуется промежуточный слой воздуха.

Для измерения диэлектрической проницаемости “живой” древесины одного и того же дерева в районах проведения радиолокационных съемок в течение сезонов, включая и холодный период времени, требовалось максимально упростить состав аппаратуры и методику измерений. Приемлемым методом для измерения комплексной диэлектрической проницаемости “живой” древесины явился метод, основанный на определении КСВ дипольной антенны. С этой целью в выбранные деревья помещался тефлоновый обтекатель, размеры которой точно соответствовали размерам дипольной антенны. Измерение КСВ антенны осуществлялось с помощью измерительной линии. Между антенной и средой имеются два промежуточных слоя: 1) воздушный зазор между антенной и обтекателем, 2) тефлоновый слой обтекателя, внешняя сторона которого плотно контактирует со средой. На КСВ антенны оказывает влияние слой древесины, прилегающей к обтекателю. Толщина слоя зависит от длины электромагнитного излучения.

В длинноволновом диапазоне влияние объема древесины на КСВ увеличивается. Кроме того анализ выражений 1?5 показывает, что наибольшая чувствительность диэлектрической проницаемости к влажности достигается при использовании длинноволнового диапазона. Поэтому использование этого диапазона более предпочтительно. Однако возникает вероятность “выхода” электромагнитного излучения из ствола дерева. Для коротковолнового диапазона объем древесины, оказывающий влияние на КСВ антенны, уменьшается, а влияние слоя воздуха и обтекателя увеличивается, т.е. данный диапазон является менее предпочтительным. Выполненные сезонные измерения влажности живой древесины [7] показали, что она меняется в значительных пределах, т.е. в больших пределах меняются значения как действительной, так и мнимой части диэлектрической проницаемости (формулы 1?5). В результате объем древесины влияющий на КСВ антенны меняется в зависимости от влажности. Для измерения диэлектрической проницаемости “живой” древесины был выбран дециметровый диапазон $\lambda = 12.24$ см., частота 2.45 ГГц. Размеры же антенны приемлемы для размещения ее в стволе дерева. Резонансная антенна наиболее чувствительна к изменению диэлектрической проницаемости. Большие колебания влажности “живой” древесины приводят к сложности конструирования антенны.

Разработка резонансной антенны осуществлялась для $\varepsilon^* = 20 + i5$ ([1]). Для расчета антенны использовались программы CST Microwave Studio. В результате расчетов определены основные размеры антенны, а также влияние окружающей среды на ее КСВ в диапазоне частот 1?3 ГГц. Используя справочные данные о диэлектрических свойствах растворов [8] изготовлены кюветы для калибровки. Результаты теоретических расчетов и калибровочных измерений в области 1?3 ГГц показали, что достигнуто удовлетворительное согласие.

Калибровочные измерения

Отработка методики измерения и калибровки проводилась в лабораторных условиях с использованием растворов различной концентрации ацетона, фосфорной кислоты и т.д. На рис.1 представлены результаты некоторые измерений

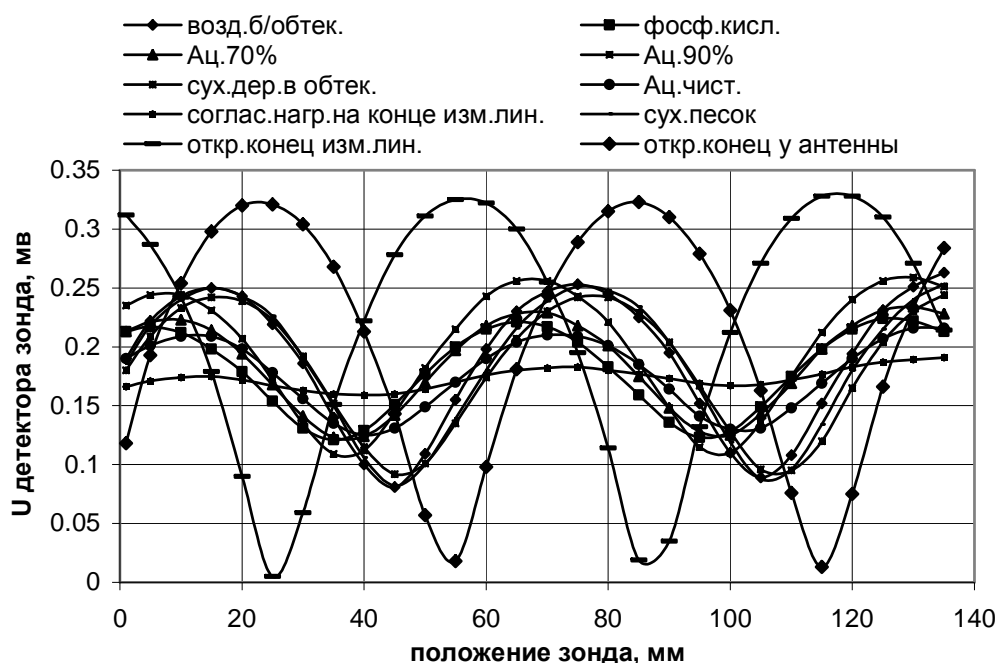


Рис. 1. Результаты измерения КСВ дипольной антенны, помещенной в различные растворы

В результате эксперимента сделаны следующие выводы: данные содержат систематическую составляющую (включающую несколько компонент) и случайный шум (ошибку), который затрудняет обнаружение регулярных компонент и систематическую погрешность, обусловленную методикой измерений и физическими свойствами измерительной линии. Модель, описывающую экспериментальные данные представим уравнением:

$$y = a_0 + a_1 + x + a_2 \sin(\omega x + \varphi),$$

где a_0 - постоянная составляющая, a_1 - коэффициент, в большей степени обусловленные наличием методической погрешности, ω - частота, φ - фаза сигнала, a_2 - амплитуда сигнала.

Для аппроксимации экспериментальных данных, полученных с измерительной линии, использовался стандартный метод - метод наименьших квадратов. Параметры модели $a_0, a_1, a_2, \omega, \varphi$ определяются из решения системы:

$$\sum_{i=1}^N (y_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 \sin(\omega x_i + \varphi)))^2 \rightarrow \min.$$

Информационными величинами являются $\frac{A_{\max}}{A_{\min}} = \frac{\max(a_0 + a_2 \sin(\omega x_i + \varphi))}{\min(a_0 - a_2 \sin(\omega x_i + \varphi))} = \frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}$ и φ .

Значения диэлектрической проницаемости ε' и ε'' неявно зависят от параметров $\frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}$, φ и могут быть заданы таблично для разных калибровочных материалов. По результатам калибровочным измерений строится таблица:

Таблица 1.

Раствор для калибровки	ε' Справ. значения	ε'' Справ. значения	φ для i -ого раствора	$\frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}$ для i -ого раствора

Модель для ε' и ε'' представляется в виде:

$$\varepsilon' = f_1\left(\frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}, \varphi\right), \quad \varepsilon' = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 y^2,$$

$$\varepsilon'' = f_2\left(\frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}, \varphi\right), \quad \varepsilon'' = c_0 + c_1 x + c_2 y + c_3 x^2 + c_4 y^2,$$

где $x = \frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}$ и $y = \varphi$.

Коэффициенты b_i и c_i находятся по решению задачи аппроксимации на неравномерной сетке методом наименьших квадратов

$$\sum_{i=1}^N (\varepsilon'_i - (b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 y^2))^2 \rightarrow \min.$$

$$\sum_{i=1}^N (\varepsilon''_i - (c_0 + c_1 x + c_2 y + c_3 x^2 + c_4 y^2))^2 \rightarrow \min.$$

Результаты аппроксимации представлены на рис.2

Анализ результатов показал, что точность модели аппроксимации на этапе нахождения $\frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}$, и φ не хуже 3?4%, однако на настоящее время точность

аппроксимации $\varepsilon' = f_1\left(\frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}, \varphi\right)$ и $\varepsilon'' = f_2\left(\frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}, \varphi\right)$ низка, по нашим оценкам порядка 30?40%. Точность аппроксимации повышается с увеличением числа калибровочных сред с известными значениями ε' и ε'' .

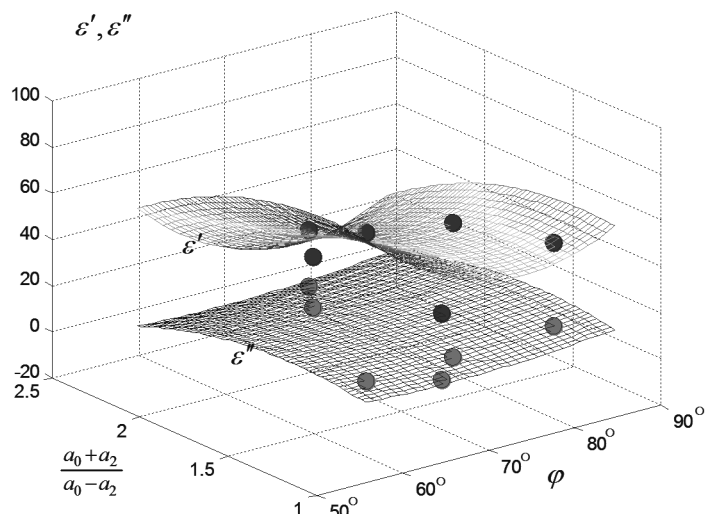


Рис. 2. Модель зависимости $\varepsilon' = f_1\left(\frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}, \varphi\right)$ и $\varepsilon'' = f_2\left(\frac{a_0 + a_2}{a_0 - a_2}, \varphi\right)$.

Результаты эксперимента

На данный момент времени выполнены эксперименты по измерению диэлектрической проницаемости в два сезона: в ноябре 2009г и марте 2010 г. Измерения проводились для изучения электрических и влажностных характеристик деревьев: сосна (2 дерева), ель (2), лиственница (2) и береза (2). Для выполнения эксперимента за пять месяцев до этого в стволы деревьев были “внедрены” фторопластовые обтекатели антенн. В ряде случаев измерения диэлектрической проницаемости в диапазоне $\lambda = 12$ см. сопровождалось взятием проб для измерения влажности древесины с последующим вычислением диэлектрической проницаемости по выражениям 1?5. Результаты измерений представлены в таблице 2

Таблица 2.

	13.11.2009			14.03.2010		
	Влажн.,m _г %	Знач.ε*=ε'+iε", выч-ное, согласно выраж. 1?5	измеренное знач. ε*=ε'+iε"	Влажн.,m _г %	Знач.ε*=ε'+iε", выч-ное, согласно выраж. 1-5	измеренное знач. ε*=ε'+iε"
сосна	67,80	15,5+i12,66	23.58+i 3.1	33,50	6.8+i 3.74	16,45+i1,96
ель	111,11	30,95+i30,94	23.19+i 2.85	84,10	20.6+i 18.6	20,12+i2,38
береза	66,33	15,08+i12,18	23.9+i 3.2			27,2+i3,64
лиственница	71,57	16,61+i13,92	18.3+i 3.5	23.5	4.56+i 1.9	25,61+i3,24

Сравнительный анализ показывает, что полученные результаты по определению комплексной диэлектрической проницаемости существенно отличаются от выводов, сделанных по работе [1]. Разница может объясняться многими причинами и являться предметом дальнейшего исследования.

Литература

1. El-Rayes M.A., Ulaby F.T. "Microwave Dielectric Spectrum of Vegetation" // IEEE Trans. On Geoscience and remote sensing, vol.GE-25, NO.5, 1987, pp.541-557
2. Брант А.А. "Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах", Гос.Изд.физ-мат. Литературы. Москва 1963.
3. Филоненко В.А., Чубинский Н.П. "Измеритель комплексной диэлектрической проницаемости материалов на основе экранированной копланарной линии". // Тр. LVI научной сессии РНТОРЭС им. А.С. Попова, посвященной дню Радио. М.: Инсвязьиздат. 2006. С. 282-283.
4. Кинг Р., Смит Г. "Антенны в материальных средах", Том 1, Перевод с англ. Под ред. В.Б.Штейншлейгера, Москва "Мир" 1984
5. Smith G.S., King R.W.P. "The resonant linear antenna as f probe for measuring ...media", Journal of Geophysical. Research, vol. 79, pp. 2623-2628, 1974
6. King R. W. P., Sandler B., Wu T.T. Cylindrical Antennas Immersed In Arbitrary Homogeneous Media, J. Appl. Phys. vol. 40, pp. 5049-5065, 1969.
7. Калинкевич А.А., Крылова М.С., Арманд Н.А., Каковкина А.Ю., Слюсарев В.И., Манаков В.Ю., Плющев В.Ю. "Об особенностях обратного отражения соснового леса в L и P диапазонах длин волн". // Тезисы докладов на III Всеросс. научн. конф." Сверхширокополосные сигналы в радиолокации и акустике", Муром, 2010.
8. Ахадов Я.Ю. "Диэлектрические свойства бинарных растворов", Изд."Наука", Глав. редак. Физ.-Мат. Литературы, М.1977