

УДК 621.317

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Борохов И.В., инж.,

Федюшко Ю.М., д.т.н.,

Таврический государственный агротехнологический университет

Тел. (0619) 42-14-38

Аннотация – проведен анализ методов и технических систем импульсной рефлектометрии для измерения диэлектрических параметров биологических систем в широком частотном диапазоне.

Ключевые слова - диэлектрическая проницаемость, биологические объекты, рефлектометрические системы.

Постановка проблемы. Измерение диэлектрической проницаемости (ДП) материалов и биологических веществ является методологически первым и основным заданием в отрасли контроля состава и свойств материалов и биологических веществ. Кроме того, измерение диэлектрических параметров в области ЭМ биологии несущего информацию о физических и биофизических свойствах вещества и их зависимости от разных физических факторов в широкой полосе частот, требует проведения анализа существующих методов и средств измерения [1,2,3].

Анализ последних исследований. В настоящее время имеется достаточно большой материал, в котором рассмотрены методы и устройства измерения диэлектрической проницаемости материалов и веществ [1,3]. В меньшей степени исследованы методы и технические системы измерения электрофизических параметров биологических объектов, которые находятся в свободном пространстве [1].

Формулирование цели статьи. Целью статьи является проведение анализа методов и рефлектометрических систем измерения диэлектрической проницаемости биологических объектов с целью обоснования метода измерения электрофизических параметров биообъектов в свободном пространстве.

Основная часть. Методы измерения электрофизических свойств веществ в СВЧ диапазоне можно разделить три - на методы измерения в объемном резонаторе, в линии передачи и в свободном пространстве.

Для научных исследований и практических работ в биологии, медицине и сельском хозяйстве особую ценность представляют измерения диэлектрической проницаемости биообъектов в свободном пространстве, в виду отсутствия физического возмущения вносимого в исследуемый объект при подготовке образца к проведению измерений.

Существующие в настоящее время информационно-измерительные системы дистанционного измерения диэлектрической проницаемости объектов в СВЧ диапазоне разделяются на две основные подгруппы: измерителя на основе анализа стоячей волны и на основе анализа отношений падающих, прошедших и отраженных от исследуемого объекта сигналов [5]. Методы измерения, основанные на применении измерительных линий предназначены для измерения характеристик стоячих волн, возникающих в результате суперпозиции падающей $U_{\text{ПАД}}$ и отраженной $U_{\text{ОТР}}$ волн вдоль линии передачи. Отношение между $U_{\text{ОТР}}$ и $U_{\text{ПАД}}$ характеризуются коэффициентом отражения или коэффициентом стоячей волны [1, 5].

По измеренным характеристикам стоячих волн могут быть рассчитаны модуль и фаза коэффициентов отражения, потери четырехполюсника, длина волны, частота, параметры среды (диэлектриков) [1, 6].

Следует отметить, что методу стоячей волны присущи такие недостатки: измерение только на фиксированной частоте; узкополосностью; сложность автоматизации процесса измерений.

При исследованиях по методу измерений, основанному на анализе отношений падающих, прошедших и отраженных от исследуемого объекта сигналов используют рефлектометры, структурная схема которых приведена на рис. 1.

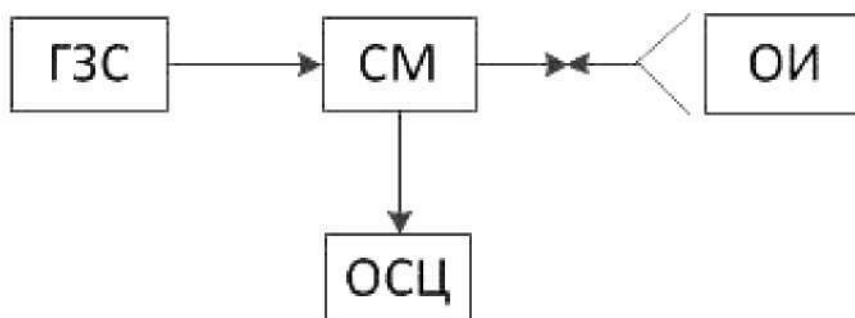


Рис. 1. Структурная схема рефлектометра для измерений в свободном пространстве.

Здесь зондирующий сигнал генератора (ГЗС) через широкополосный смеситель (СМ) (выполненный в виде линии передачи с входом и выходом – смеситель «на проход») поступает на исследуемый объект (ОИ) и одновременно после стробоскопического преобразования наблюдается на экране осциллографа (ОСЦ). Отраженный от неоднородностей исследуемого объекта сигнал, пройдя смеситель, после стробоскопического преобразования наблюдается вместе с зондирующим сигналом на экране осциллографа. Эти сигналы после Фурье-преобразования определяют коэффициенты рассеивания S_{11} и S_{12} материала образца [6]:

$$S_{11} = S_{22} \frac{\Gamma(1 - e^{-2x})}{(1 - \Gamma^2 e^{-2x})} \quad (1)$$

$$S_{12} = S_{21} \frac{\Gamma(1 - \Gamma^2) e^{-x}}{(1 - \Gamma^2 e^{-2x})}, \quad (2)$$

где

$$\tilde{A} = \frac{\sqrt{\mu} - \sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\mu} + \sqrt{\varepsilon}}, \quad x = j\gamma_0 \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \mu' - j\mu'' \\ \varepsilon &= \varepsilon' - j\varepsilon'' \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь μ', ε' - реальные, а μ'', ε'' - мнимые составляющие комплексных величин ε и μ .

При известных значениях S_{11} и S_{21} систему выражений (1) и (2) можно решить относительно ε и μ следующим образом:

$$\varepsilon = \sqrt{DC}, \quad \mu = \sqrt{\frac{C}{D}}, \quad (5)$$

где

$$D = \frac{1 - 2S_{11} + |S|}{1 + 2S_{11} + |S|}, \quad (6)$$

$$C = \frac{\gamma^2}{\gamma_0^2}, \quad \gamma = \gamma_n + n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

$$\gamma_n = \ln(P \pm \sqrt{P^2 - 1})$$

$$P = \frac{1 - |S|}{2S_{21}}, \quad (8)$$

$$|S| = S_{11}^2 - S_{21}^2. \quad (9)$$

Из (1) - (9) следует, что одновременное измерение частотных зависимостей $S_{11}(f) = S_{21}(f)$ образца, в соответствии с рис. 1, в принципе позволяет решить задачу определения частотных зависимостей комплексных значений ε и μ . Однако практическая реализация получения требуемых характеристик для исследования биообъектов в свободном пространстве таким методом определения ε и μ связана с преодолением ряда трудностей. Поэтому рассмотрим более детально пути практической реализации данного метода измерения ε , μ и область его применения для исследования биообъектов в свободном пространстве.

Рассмотрим некоторые типы современных рефлектометров для исследования объектов в свободном пространстве. Наибольшее распространение при дистанционном зондировании получили рефлектометры с импульсными радиосигналами [6-11].

В [10] описан рефлектометр, в котором был использован генератор импульсов на диоде Ганна мощностью около 3 Вт на несущей частоте 6,2 или 6,5 ГГц. Отраженные сигналы через циркулятор поступали на вход стробоскопического осциллографа. Этот прибор позволял обнаружить неоднородности с коэффициентом отражения порядка $5 \cdot 10^{-4}$.

Похожий по конструкции прибор с генератором зондирующих импульсов на маломощном диоде Ганна описан в [6]. Этот прибор работает в диапазоне частот 7-11 ГГц при динамическом диапазоне около 40 дБ.

При рефлектометрических изменениях большое значение имеет возможность перестройки несущей частоты зондирующего сигнала в широком диапазоне частот, что позволяет оценивать отражающий объект по частотной характеристике модуля коэффициента отражения [9]. Зондирующие радиоимпульсы длительностью 2-200 нс и мощностью около 70 мВт получаются при помощи быстродействующего сверхширокополосного модуля на *p-i-n* диоде из непрерывного сигнала внешнего генератора гармонических колебаний с частотой 1-18 ГГц. Отраженные сигналы могут непосредственно наблюдаться на широкополосном осциллографе, что обеспечивает динамический диапазон порядка 40 дБ, вполне достаточный, например, для измерения параметров элементов антенного тракта РЛС.

В [7] описан вариант импульсного рефлектометра с зондирующим сигналом в виде радиоимпульса большой длительности с крутым фронтом. При этом отраженные сигналы многократно накладываются один на другой, что в принципе позволяет измерить их модули и фазы. Конечный результат рефлектометрических измерений представляет собой совокупность двух-трех параметров отраженного сигнала (амплитуда, положение центра тяжести, фаза заполнения), в то время как на осциллографе изменяются сотни отсчетов мгновенных значений сигнала. Поэтому оптимизация методики измерений параметров неоднородностей может обеспечить значительный энергетический выигрыш.

В корреляционном рефлектометре [4] в качестве источника зондирующего сигнала был использован генератор сигнала с линейной частотной модуляцией. Была получена точность измерения модуля $|\Gamma|$ 3%, фазы 3° ; измерялись $|\Gamma| > 10^{-4}$.

Довольно большое распространение получили корреляционные рефлектометры с линейной частотной модуляцией и усреднением корреляционного произведения зондирующего и отраженного сигналов на промежуточных частотах, что позволяет построить многоканальную схему коррелометра без аналоговой линии задержки.

Схема такого коррелометра содержит перемножитель зондирующего и отраженного сигналов и систему фильтров, настроенных на частоты F_1 [11],

$F_1 = k(f)2l/v_\phi(f)$, где l – расстояние до неоднородности; v_ϕ – фазовая скорость; $k(f)$ – скорость перестройки частоты которая должна выбираться такой, чтобы отношение $k(f)2l/v_\phi(f)$ оставалось постоянным.

В последнее время широкое распространение получили рефлектометры, использующие видеоимпульсные сигналы. В литературе описаны видеоимпульсные рефлектометры, длительность фронта аппаратурной функции которых 28-100 пс [6, 12]. Импульсный рефлектометр, имеющий смеситель на туннельном диоде и работающий с использованием принципа дискриминатора мгновенных значений, имеет особую высокую чувствительность [12].

Видеоимпульсные рефлектометры, имеющие длительность фронта аппаратурной функции 30-100 пс, уровень собственных шумов 2-5 мВ и амплитуду зондирующего сигнала 0,2-1В, позволяют определять непосредственно по рефлектограмме отклонение волнового сопротивления линии от номинала на 0,5Ом, минимальную емкостную неоднородность 0,008-0,02 пф, минимальную индуктивность 0,01-0,05 нГц, разрешение в линии с воздушным заполнением 4,5-15

мм, а в полосковых линиях на диэлектрической подложке – до 1-5 мм [6].

Выводы. В настоящее время отсутствуют специализированные рефлектометры, предназначенные для измерения диэлектрической проницаемости биологических объектов в свободном пространстве.

Для дистанционного измерения диэлектрической проницаемости биологических объектов рефлектометрическими системами в широком частотном диапазоне необходимо использовать радиоимпульсы нано и - субнаносекундной длительности;

Исследование диэлектрических параметров биологических объектов дистанционным способом требует разработки методов измерения и специализированных рефлектометрических систем.

Література

1. *Бранд А.А.* Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах : учебник / *А.А. Бранд.* – М. : Физматгиз, 1964. – 404 с.
2. *Харвей А.Ф.* Техника сверхвысоких частот / *А.Ф. Харвей.* – М.: Сов.радио, 1965. – 783 с.
3. *Потапов А.А.* Современные диэлектрические методы и аппаратура для исследования микро – и макроскопических свойств веществ / *А.А. Потапов.* – М.: ВНИИКИ, 1980.- 56с.
4. *Абубакиров Б. А.* Измерение параметров радиотехнических цепей/ *Б. А. Абубакиров.* – М. : Сов. радио, 1984. – 245 с.
5. *Завьялов А. С.* Измерение параметров материалов на СВЧ / *А. С. Завьялов.* – Томск. : Издательство Томского университета, 1985. – 215 с.
6. *Глебович Г.В.* Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов / *Г. В. Глебович, А. В. Андриянов, Ю. В. Введенский* – М. : Радио и связь.1984. – 256 с.
7. *Ogletree S.T.* The developmant of nazroubland time-domain ztleitometry / *S.T. Ogletree, S.V. Makio* IEEE Trans., 1972, V.-im-21, №2,P. 82.
8. *Андриянов А. В.* Радиоимпульсный рефлектометр наносекундного диапазона / *А. В. Андриянов, Е. И. Булатов, Ю. В. Введенский.* – Приборы и техника эксперимента. 1977. №2, – 141с.
9. Radioreflectometer. – Microwave S., 1980, V. 23, №10, – P. 31.
10. *Rantala K.,* Narrouband time-domain reflectorueter in waveguide maintenance: theory, instrument and operating experience / *K. Rantala, S. Halme* – Proc. Of the fifth colloquium on microwave. Budapest. 1974. V. ME- 73 – P. 18
11. *Solmo P.* Microwave locating reflectoweter / *P. Solmo, P. Holleway* – Electronics Let., 1969. №5, – P. 34.

12. Херманис Э.Х. Рефлектометр на основе дискретного стробоскопического преобразователя / Э.Х.Херманис, В.Г. Карлиныг / Дискретные стробоскопические преобразователи. – Рига., 1977. – С.63-71.

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ
ДИСТАНЦІЙНОГО ВИМІРЮВАННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Борохов І.В., Федюшко Ю.М.

Анотація – проведено аналіз методів та технічних систем імпульсної рефлектометрії для вимірювання діелектричних параметрів біологічних систем в широкому частотному діапазоні.

ANALYSIS OF METHODS AND TECHNICAL SYSTEMS FOR TELEMETERING OF DIELECTRIC PARAMETERS OF BIOLOGICAL OBJECTS

I. Borohov, U. Fedyushko

Summary

The analysis is conducted of methods and technical systems of impulsive reflektometris for measuring of dielectric parameters of the biological systems in the wide frequency range.