

Оценка точности измерения электрофизических параметров метаматериалов методом поверхностных электромагнитных волн с помощью имитационной модели

А. И. Казьмин, email: alek-kazmin@yandex.ru

П. А. Федюнин, email: fpa1969@yandex.ru

В. А. Манин, email: fanni.05@mail.ru

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и
Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)

***Аннотация.** В статье представлена имитационная модель, позволяющая оценивать точность измерения локальных значений электрофизических и геометрических параметров плоскостойких образцов метаматериалов на основе прямоугольных SRR-элементов на металлической подложке методом поверхностных электромагнитных волн. Имитационная модель на основе системы электродинамического моделирования CST Microwave studio и системы Matlab. Приведены результаты имитационного моделирования по измерению параметров метаматериала на основе SRR-элементов с областью отрицательной рефракции в диапазоне частот 10,06–10,64 ГГц.*

***Ключевые слова:** метаматериал, имитационная модель, поверхностная электромагнитная волна, электрофизические параметры, обратная задача*

Введение

Метаматериалы (ММ) благодаря своим уникальным свойствам (электрофизическим, радиофизическими и оптическим), которые не встречаются в природных условиях, нашли применение и открывают широкие перспективы по их применению в будущем в различных областях науки и техники [1–6].

Вместе с тенденцией развития ММ различных типов возрастают и требования по точности и достоверности к методам и устройствам измерения их электрофизических и геометрических параметров (ЭФГП), к важнейшим из которых относятся частотные зависимости комплексных диэлектрической $\epsilon_{\text{ММ}}(f)$ и магнитной $\mu_{\text{ММ}}(f)$ проницаемостей, а также толщина ММ $t_{\text{ММ}}$.

Количество публикаций по тематике определения ЭФГП ММ постоянно растет [1–4]. Между тем, в представленных работах вопросы, касающиеся развития методов измерения ЭФГП ММ с учетом размещения их на металлической подложке при одностороннем подходе практически отсутствуют. При этом, следует отметить, что размещение ММ на металлической подложке очень часто используется в различных областях (подложки для СВЧ-плат и антенн, использование ММ в качестве радиопоглощающего покрытия и др.).

С учетом размещения ММ на металлической подложке его ЭФГП начинают меняться и могут возникать новые резонансы в частотных зависимостях комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей. Исходя из этого, для их оценки требуются методы, обеспечивающие односторонний подход при измерениях. Методы свободного пространства, основанные на одновременном измерении комплексных коэффициентов отражения R и прохождения T электромагнитных волн, фактически оказываются непригодными для контроля ЭФГП метаматериалов, нанесенных на металлическую подложку.

В данной статье будет рассмотрен новый метод определения ЭФГП метаматериалов на металлической подложке и оценка его точностных характеристик путем численного моделирования с помощью имитационной модели.

1. Оценка ЭФГП метаматериалов с помощью поверхностных электромагнитных волн

В [5] развит подход к измерению ЭФГП ММ с помощью поверхностных электромагнитных волн (ПЭМВ) СВЧ диапазона. Основным информативным параметром ПЭМВ, используемым для проведения измерений ЭФГП выступает поперечное волновое число, характеризующее распределение поля ПЭМВ в свободном пространстве по нормали к поверхности покрытия – комплексный коэффициент ослабления (КО) поля ПЭМВ $\dot{\alpha}(f_k, \xi_{MM}) = \alpha'(f_k, \xi_{MM}) - j\alpha''(f_k, \xi_{MM})$, где $\alpha'(f_k, \xi_{MM})$ – действительная часть КО ПЭМВ – коэффициент характеризующий экспоненциальное ослабление поля ПЭМВ по нормали к поверхности ММ; $\alpha''(f_k, \xi_{MM})$ – мнимая часть КО ПЭМВ – коэффициент характеризующий фазовый набег для ПЭМВ, распространяющейся по направлению к поверхности раздела «ММ-свободное пространство», $\xi_{MM} = \{\varepsilon'_{MM}(f_k), \varepsilon''_{MM}(f_k), \mu'_{MM}(f_k), \mu''_{MM}(f_k), t_{MM}\}$ – вектор ЭФГП ММ, где $\varepsilon'_{MM}(f_k), \mu'_{MM}(f_k)$ действительные и $\varepsilon''_{MM}(f_k), \mu''_{MM}(f_k)$ мнимые части диэлектрической и магнитной

проницаемостей ММ соответственно, $t_{\text{ММ}}$ – толщина ММ. Действительную часть КО $\alpha'(f_k, \xi_{\text{ММ}})$, можно определить по результатам косвенных измерений напряженности электрического поля ПЭМВ по нормали к поверхности ММ в разнесенных точках измерений методом зонда:

$$\alpha'(f_k, \xi_{\text{ММ}}) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{1}{s} \ln \left| \frac{E_j}{E_{j+1}} \right| \quad (1)$$

где E_j и E_{j+1} – значения напряженности электрического поля ПЭМВ измеренные по нормали к поверхности ММ в точках измерений y и $y + s$, s – расстояние между точками измерений, J – количество точек измерения.

В общем случае для определения ЭФГП ММ требуется оценить КО в заданной полосе частот на сетке дискретных частот, т.е. получить частотную характеристику КО поля ПЭМВ $\alpha'(f_k, \xi_{\text{ММ}})$, f_k , $k = 1, 2, \dots, K$. Исходя из этого, в формализованном виде задача определению вектора ЭФГП ММ по измеренной частотной зависимости КО поля ПЭМВ $\alpha'(f_k, \xi_{\text{ММ}})$ сводится к решению операторного уравнения первого рода [5]:

$$\Theta_{\text{ММ}} \cdot \xi_{\text{ММ}} = \dot{\alpha}(f_k, \xi_{\text{ММ}}), \quad \xi_{\text{ММ}} \in \Xi_{\text{ММ}}, \quad \dot{\alpha}(f_k, \xi_{\text{ММ}}) \in \mathbf{A}_{\text{ММ}} \quad (2)$$

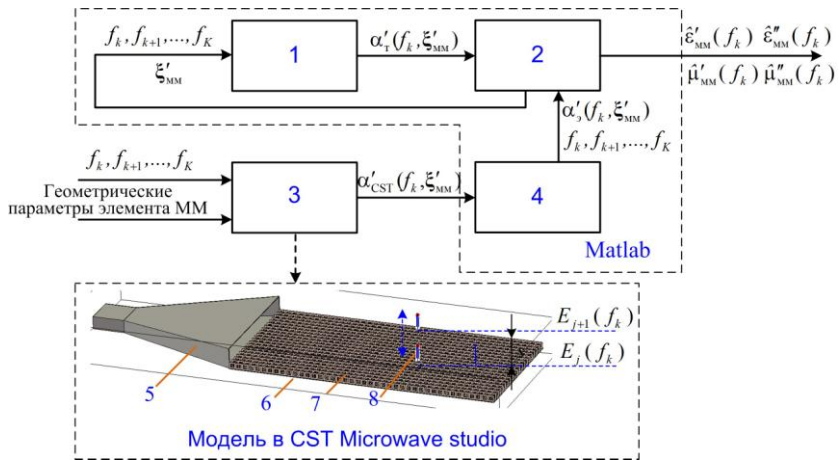
где $\Xi_{\text{ММ}}$ – метрическое пространство векторов $\xi_{\text{ММ}}$ для ММ, $\mathbf{A}_{\text{ММ}}$ – метрическое пространство КО поля ПЭМВ для ММ; $\Theta_{\text{ММ}}$ – нелинейный оператор для ММ, осуществляющий преобразование множества значений вектора $\xi_{\text{ММ}}$ в множество значений КО поля ПЭМВ $\dot{\alpha}(f_k, \xi_{\text{ММ}})$.

Вывод в явном виде уравнения (2) и порядок его решения приведен в [5].

2. Имитационная модель измерений ЭФГП метаматериалов

Для более гибкой оценки точности и достоверности определения ЭФГП различных типов ММ разработана имитационная модель реального измерительного комплекса [5]. Структурная схема имитационной модели приведена на рис. 2, где обозначено: 1 – блок решения прямой задачи, 2 – блок решения операторного уравнения, 3 – блок формирования КО в системе CST Microwave studio, 4 – блок формирования погрешностей измерений КО, 5 – антенная возбуждения ПЭМВ, 6 – металлическая подложка, 7 – исследуемый образец ММ, 8 – приемная антенна (измерительный зонд).

Такие элементы измерительного комплекса, как антенна возбуждения ПЭМВ 5, приёмная антенна (измерительный зонд) 8, а также исследуемый ММ 7 на металлической подложке 6, реализованы в блоке формирования КО в системе CST Microwave studio. Геометрические размеры данных элементов точно соответствуют их размерам в реальном измерительном комплексе. Для оценки адекватности разработанной модели проведено сравнение модельных КО ПЭМВ стандартного образца полиметилметакрилата ($\epsilon \approx 2,7 - j0,081$) размером 200×100 мм толщиной 1 мм $\alpha'_{CST}(f_k, \xi_{MM})$ с теоретическими КО $\alpha'_T(f_k, \xi_{MM})$ найденными при решении операторного уравнения (2), а также с экспериментальными КО $\alpha'_o(f_k, \xi_{MM})$, измеренными на реальном измерительном комплексе [5].



1 – блок решения прямой задачи, 2 – блок решения операторного уравнения, 3 – блок формирования КО в системе CST Microwave studio; 4 – блок формирования погрешностей измерений КО, 5 – антенная возбуждения ПЭМВ, 6 – металлическая подложка, 7 – исследуемый образец ММ, 8 – приемная антенна (измерительный зонд)

Рис. 1. Имитационная модель измерений

Отличие модельных КО от теоретических составляет не более 0,05–0,08 %. Относительные погрешности оценки диэлектрической проницаемости и толщины полиметилметакрилата, полученные путём решения операторного уравнения (2) по частотной зависимости КО $\alpha'_{CST}(f_k, \xi_{MM})$ составляют не более 0,02–0,05 %. Таким образом,

разработанная в CST Microwave studio модель обеспечивает получение КО ПЭМВ с минимальной методической погрешностью, т. е. КО практически соответствуют теоретическим значениям $\alpha'_T(f_k, \xi_{MM})$. Кроме того, при решении обратной задачи (2) оценки ЭФГП получены с минимальными погрешностями. Отличие экспериментальных КО $\alpha'_S(f_k, \xi_{MM})$ от модельных значений составляет не более 5–6 % и обусловлено влиянием шумов (инструментальные погрешности измерительного комплекса и другие погрешности, связанные с процессом эксперимента). Экспериментальные относительные погрешности оценки действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости, а также толщины составляют не более 6–7 и 4–5 % соответственно. Экспериментальные значения КО в имитационной модели (см. рис. 1) формировали в блоке формирования погрешностей измерений КО 4 в виде суммы значений модельных КО $\alpha'_{CST}(f_k, \xi_{MM})$ и функции, имитирующей влияние шума. На точность определения коэффициентов ослабления ПЭМВ влияет множество случайных факторов. Поэтому погрешность оценки указанных коэффициентов моделировалась аддитивным некоррелированным гауссовым шумом с нулевым математическим ожиданием $m[n(f_k)] = 0$ и заданным уровнем дисперсии σ_k^2 [5].

Таким образом, экспериментальные значения КО ПЭМВ $\alpha'_S(f_k, \xi_{MM})$ в блоке 4 (см. рис. 1) формировали на основе выражения [5]:

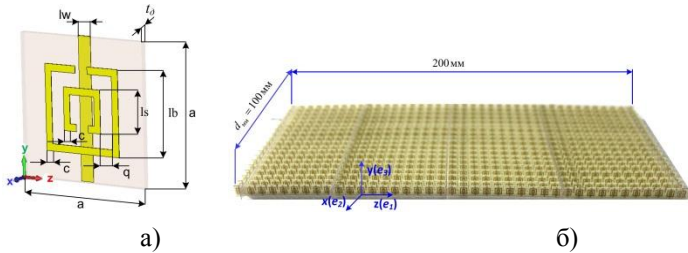
$$\alpha'_S(f_k, \xi_{MM}) = \alpha'_{CST}(f_k, \xi_{MM}) + n(f_k), \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (3)$$

где $n(f_k)$ – шум, воздействующий на k -измерение и обусловленный инструментальными погрешностями измерительного комплекса и другими погрешностями при проведении эксперимента.

Блок определения теоретических значений комплексных коэффициентов ослабления 1 реализует вычисление левой части операторного уравнения (2), а блок решения операторного уравнения 1 реализует операцию по решению уравнения (2), путём варьирования составляющих вектора ξ_{MM} . Данные блоки реализованы в системе Matlab. При этом решение обратной задачи (2) в блоке 2 осуществляется с помощью генетического алгоритма, реализованного в виде функции «ga» приложения Global Search пакета Matlab.

Для численной проверки исследован образец плоскостойкого ММ на основе SRR-элементов с областью отрицательной рефракции в диапазоне частот 10,06–10,64 ГГц. Единичный элемент был спроектирован в системе CST Microwave studio по методике

приведенной в [5]. С учетом геометрических параметров полученного единичного элемента изготовили образец ММ в виде плоской пластины (рис. 2). Не привязываясь строго к теории гомогенизации, для обеспечения проявления ММ свойств однородной среды, SRR-элементы в направлениях e_1 и e_2 (рис. 2) разместили с периодичностью 5 мм. Толщина ММ соответствует 1 элементу (5мм).



а) – единичный элемент ММ, б) – изготовленный плоскостойкий образец ММ

Рис. 2. Исследуемый образец ММ

Таблица

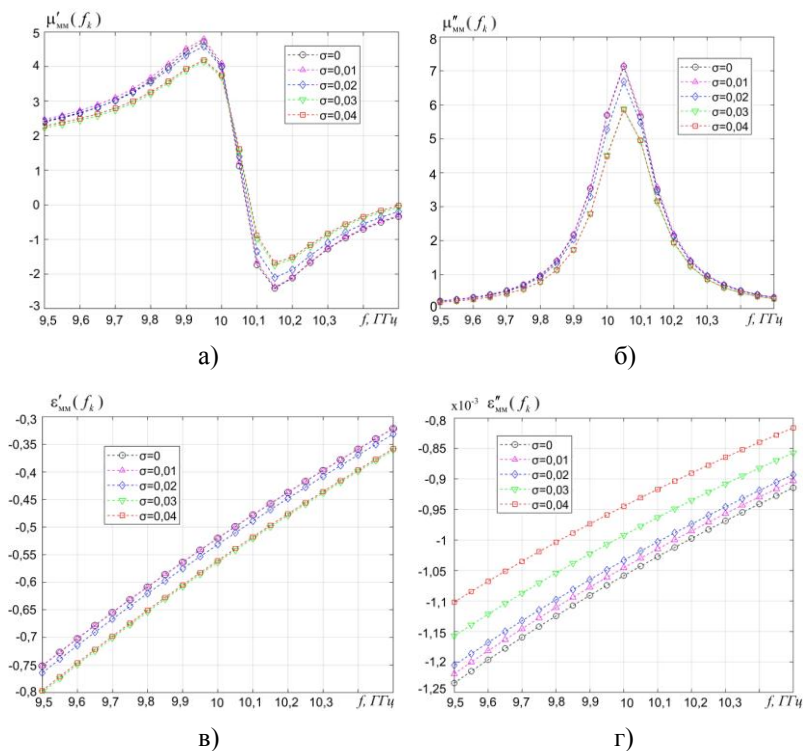
Геометрические размеры эталонного элемента, мм

| Параметр | Оптимизированное значение, мм |
|----------|-------------------------------|
| a | 5 |
| lw | 0,5 |
| ls | 1,5 |
| lb | 3 |
| c | 0,25 |
| q | 0,5 |
| t_d | 0,254 |

3. Результаты и их обсуждение

Для решения операторного уравнения (2) использовали 21 значение частоты из интервала $\Delta f = 9,5 - 10,5$ ГГц с шагом по частоте 0,25 ГГц.

На рис. 3 приведены частотные дисперсионные зависимости комплексных диэлектрической и магнитной проницаемости полученные путем решения обратной задачи (2) при возрастающих значениях уровня среднего квадратического отклонения (СКО) шума в измерительных данных ($\sigma=0,01$, $\sigma=0,02$, $\sigma=0,03$, $\sigma=0,04$).



а) – действительная часть комплексной магнитной проницаемости,
 б) – мнимая часть комплексной магнитной проницаемости,
 в) – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости, г) – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости

Рис. 3. Частотные зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической и магнитной проницаемостей ММ при возрастании СКО шума

Анализ зависимостей на рис. 3 показал, что в целом погрешности оценок действительной и мнимой частей комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей ММ, в том числе и в резонансной области, при СКО уровня шума 0,02 не превышают 10 %. Погрешности оценки толщины при этом получили следующие: $\sigma=0,01$, $\delta t_{\text{ММ}} \approx 3,5\%$; $\sigma=0,02$, $\delta t_{\text{ММ}} \approx 6\%$; $\sigma=0,03$, $\delta t_{\text{ММ}} \approx 10\%$; $\sigma=0,04$, $\delta t_{\text{ММ}} \approx 19\%$.

Таким образом, в целом, проведенный численный эксперимент показал, что разработанная электродинамическая модель измерений обеспечивает устойчивое решение обратной задачи (2) при воздействии шума.

Заключение

Таким образом, представлены результаты исследования показавшие высокую эффективность по измерению ЭФГП ММ с помощью ПЭМВ СВЧ-диапазона. Разработанный метод обеспечивает локальный контроль ЭФГП плоскостойких ММ на металлической подложке при одностороннем доступе. Разработана имитационная модель реального измерительного комплекса, с помощью которой для различных конфигураций измерительных комплексов можно оценить погрешности определения диэлектрической и магнитной проницаемостей различных типов ММ. Имитационное моделирование показало, что локальные значения эффективных ЭФГП исследуемого ММ на основе SRR-элементов отличаются от расчетных не более чем на 10 %.

Список литературы

1. Лагарьков А.Н. Электрофизика и электродинамика метаматериалов / А.Н. Лагарьков, В.Н. Кисель, А.К. Сарычев, В.Н. Семенов // Теплофизика высоких температур. – 2010. – Т. 48. – № 6. – С. 1031–1048.
2. Ran L. Experimental Study on Several Left-Handed Matamaterials / L. Ran [and all] // Progress In Electromagnetics Research. – 2005. – V. 51. – P. 249–279.
3. Smith D. R. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients / D. R. Smith, S. Schultz, P. Markos, C. M. Soukoulis // Physical Review B. – 65. – 195104. – Published 19 April 2002.
4. Shelby R. A. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction / R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz // Science. – Apr 2001. – V. 292. – Iss. 5514. – P. 77–79.
5. Казьмин А.И. Контроль электрофизических параметров метаматериалов методом поверхностных электромагнитных волн / А.И. Казьмин, П.А. Федюнин // Дефектоскопия. 2021. № 4. С. 51–67.
6. Lubkowski G., Schuhmann R., Weiland T. Extraction of effective metamaterial parameters by parameter fitting of dispersive models / G. Lubkowski, R. Schuhmann, T. Weiland // Microwave and Optical Technology Letters. – Feb 2007. – V. – 49. – Iss. 2. – P. 285–288.