

Оценка точности реконструкции электрофизических параметров многослойных радиопоглощающих покрытий методом поверхностных электромагнитных волн с помощью имитационной модели в системе Matlab

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

П. А. Федюнин, email: fpa1@yandex.ru

Д.А. Рябов

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

***Аннотация.** В данной работе представлена имитационная модель, позволяющая оценивать точность реконструкции электрофизических и геометрических параметров многослойных радиопоглощающих покрытий многочастотным методом поверхностных электромагнитных волн. Имитационная модель реализована в виде набора подпрограмм в системе Matlab. Приведены результаты имитационного моделирования по реконструкции диэлектрических проницаемостей и толщин одно- и двухслойных диэлектрических покрытий при различных значениях среднего квадратического отклонения уровня шума в измерительных данных.*

***Ключевые слова:** многослойное радиопоглощающее покрытие, многочастотный метод поверхностных электромагнитных волн, имитационная модель, электрофизические параметры.*

Введение

Уменьшение мощности рассеиваемых радиоволн применяется для снижения радиолокационной заметности образцов вооружения, военной и специальной техники, создания антенн и антенных решеток с необходимыми свойствами, обеспечения электромагнитной совместимости и решении других задач. Один из способов уменьшения мощности рассеиваемых радиоволн заключается в применении радиопоглощающих покрытий (РПП). Их эффективность определяется электрофизическими и геометрическими параметрами (ЭФГП). От точности измерений ЭФГП зависят возможности объектов, в которых применяются РПП. Таким образом, разработка новых методов измерения ЭФГП многослойных РПП, а также обнаружение в них межслойных дефектов является актуальной научной задачей [1,2].

В [3, 4] показано, что повышение эффективности контроля ЭФГП многослойных диэлектрических материалов и покрытий возможно

путем применения многочастотного метода поверхностных электромагнитных волн (ПЭМВ). В качестве информативного параметра при этом выступает комплексный коэффициент ослабления поля ПЭМВ $\alpha(f, \xi_n, \xi_d)$, где f – частота зондирующего сигнала, $\xi_n = \dot{\epsilon}_i, \dots, \dot{\epsilon}_n, \dot{\mu}_{n+1}, \dots, \dot{\mu}_{2n}, b_{2n+1}, \dots, b_{3n}$, $i = 1, \dots, 3n$ – $3n$ -мерный вектор описывающий ЭФГП n -слойного покрытия, $\dot{\epsilon}_i, \dots, \dot{\epsilon}_n, \dot{\mu}_{n+1}, \dots, \dot{\mu}_{2n}$ – комплексные относительные диэлектрические и магнитные проницаемости, $b_{2n+1} = t_{2n+1}/\lambda_{2n+1}, \dots, b_{3n} = t_{3n}/\lambda_{3n}$ – относительные толщины слоёв n -слойного материала; t_{2n+1}, \dots, t_{3n} – толщины слоёв материала.

Цель работы – численное исследование потенциальных возможностей многочастотного радиоволнового метода поверхностных электромагнитных волн по точности реконструкции ЭФГП многослойных РПП в зависимости от значений их ЭФГП, уровня шума в измерительных данных и ширины полосы частот измерений.

1. Имитационная модель реконструкции ЭФГП многослойных радиопоглощающих покрытий

При имитационном моделировании на ЭВМ выполняется совокупность расчётов, позволяющих имитировать процесс реконструкции относительных диэлектрических проницаемостей и толщин слоёв многослойного РПП по экспериментально полученным значениям коэффициентов ослабления поля ПЭМВ α, f, ξ .

Для моделирования разработана имитационная модель измерительного комплекса [3, 4], структурная схема которой приведена на рис. 1.

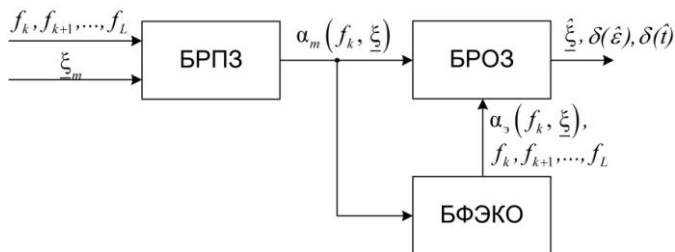


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели

В имитационную модель входят три блока: блок решения прямой задачи БРПЗ, позволяющий определять теоретические значения α_{τ}, f, ξ коэффициентов ослабления поля для частот $f_k, k = 1, 2, \dots, L$ и вектора ЭФГП $\xi_n = \varepsilon_i, \dots, \varepsilon_n, b_{n+1}, \dots, b_{2n}$ блок формирования экспериментальных значений $\alpha_{\circ}, f, \xi, k = 1, 2, \dots, L$, коэффициентов ослабления поля БФЭКО, имитирующий абсолютные погрешности Δ_{α}, f, ξ измерений коэффициента ослабления поля; блок решения обратной задачи БРОЗ, реализующий нахождение минимума целевой функции.

В блоке БРПЗ рассчитываются теоретические значения коэффициентов ослабления α_{τ}, f, ξ многослойного диэлектрического РПП путём решения дисперсионного уравнения по известному вектору ЭФГП $\xi = \varepsilon_i, \dots, \varepsilon_n, b_{n+1}, \dots, b_{2n}$ на частотах $f_k, k = 1, 2, \dots, L$ [3,4]:

$$D[\alpha_{\tau}, f_k, \xi; f_k] = 0. \quad (1)$$

В блоке БРОЗ реализуется представленный в [3] метод определения вектора ЭФГП $\xi = \varepsilon_i, \dots, \varepsilon_n, b_{n+1}, \dots, b_{2n}, i = 1, \dots, 2n$, многослойных РПП. Метод основан на минимизации целевой функции, построенной по невязке между полученными экспериментально α_{\circ}, f, ξ и вычисленными теоретически значениями α_{τ}, f, ξ коэффициентов ослабления поля на частотах $f_k, k = 1, 2, \dots, L$:

$$\begin{aligned} \xi = \arg \min_{\xi \in \xi_{\text{доп}}} \rho(\xi) = & \sum_{k=1}^L \left[\left| \alpha_{\circ}, f_k, \xi - \alpha_{\tau}, f_k, \xi \right| / \alpha_{\tau}, f_k, \xi \right]^2 + \dots \\ & \dots + \varpi \sum_i^{2n} q_i \left\| \xi_i - \xi_{i0} \right\|^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\rho(\xi)$ – расстояние между значениями α_{\circ}, f, ξ и α_{τ}, f, ξ в области допустимых значений $\xi \in \xi_{\text{доп}}$; q_i – вес, определяющий степень априорной информации о каждой составляющей вектора ЭФГП; ϖ – параметр регуляризации; ξ_i – i -я составляющая вектора ЭФГП; ξ_{i0} – найденное с учётом априорной информации о составляющей среднее значение i -й составляющей вектора ЭФГП из области допустимых значений $\xi_{i0} \in \xi_{i\text{min}}, \dots, \xi_{i\text{max}}$.

Ввиду множества случайных факторов, влияющих на точность реконструкции ЭФГП многослойных диэлектрических покрытий, погрешность их измерения в блоке БФЭКО моделировали аддитивным некоррелированным гауссовым шумом $n(f_k)$ с нулевым математическим ожиданием $m(n(f_k)) = 0$ и заданным уровнем дисперсии σ_n^2 . Формировали искажённые значения результатов измерений частотной зависимости коэффициента ослабления поля:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{\gamma} f_k, \xi &= \alpha_{\tau} f_k, \xi + n f_k ; \\ m n f_k &= 0; \\ k &= 1, 2, \dots, L, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $n(f_k)$ – шум, обусловленный как погрешностями самого физического прибора и другими измерительными погрешностями при проведении эксперимента, так и достоверностью выбранной электродинамической модели реальной физической ситуации; L – число частот, на которых проводятся измерения.

Таким образом, в соответствии с принятой моделью нормального распределения погрешностей измерений (5), имитировали погрешности измерений $\Delta \alpha f_k, \xi$.

Блоки структурной схемы имитационного моделирования (рис. 1) реализованы в виде подпрограмм в системе Matlab.

Подпрограмма определения теоретических коэффициентов ослабления поля ПЭМВ для функционала (2) основана на решении дисперсионного уравнения (1) и реализована в виде функции на основе решателя fsolve. Базовая структура подпрограммы имеет следующий вид:

Листинг 1

Базовая структура листинга подпрограммы определения теоретических коэффициентов ослабления

```
function [ y ] = function(x, freq)
% Заданная частота расчета
f = freq;
% ЭФГП РПП (ep1 – действительная часть комплексной
диэлектрической проницаемости, ep1c – мнимая часть комплексной
диэлектрической проницаемости, nu1 – действительная часть
комплексной магнитной проницаемости, nu1c – мнимая часть
комплексной магнитной проницаемости, b1 – толщина слоя
покрытия и т.д.)
ep1 = x(1); ep1c = x(2); nu1 = x(3); nu1c = x(4); b1 =
x(5); ...x(n)
```

```

%% подфункция FunctionRPP, составляется на основе метода
поперечного резонанса (4) для конкретного типа РПП (число
слоев и типа РПП)
fn1 = @(x) FunctionRPP(x, ep1, ep1c, nu1, nu1c, b1,...,f);
%% решатель дисперсионного уравнения
y = fsolve(fn1, 0.6);
end

```

Проведенные исследования показали, что при решении обратной задачи (2), помимо эффективных алгоритмов моделирования прямых задач для широкого диапазона частот, необходимо использовать соответствующие алгоритмы оптимизации целевой функции (функционала), которая в этом случае является невыпуклой и многопараметрической.

При числе слоев РПП больше трех прямые алгоритмы минимизации целевой функции (2) перестают давать устойчивые оценки ЭФГП и целесообразно использовать алгоритмы стохастической минимизации. Исходя из этого, подпрограммы определения ЭФГП РПП, обнаружения и оценки дефектов РПП основаны на применении генетического алгоритма и реализованы в виде функции «ga» приложения Global Search системы Matlab.

Проведенные исследования позволили выбрать рациональные параметры генетического алгоритма для РПП с числом слоев от 1 до 5. Общая структура листинга подпрограммы минимизации целевой функции вида (1) представлена имеет следующий вид (в качестве примера приведен фрагмент для оценки относительных диэлектрических проницаемостей двухслойного покрытия):

Листинг 2

Базовая структура листинга подпрограммы минимизации целевой функции вида (2)

```

clc, clear, close all
%% Вектор экспериментальных коэффициентов ослабления ПЭМВ
AL = [AL1, AL2, AL3.....];
%% Частоты измерений
freq = [freq1, freq2, freq3,... ];
%% Подпрограмма поиска минимума целевой функции (1) с помощью
генетического алгоритма
n=1; % Количество запусков генетического алгоритма
for k=1:n
%% Фитнес функция, реализующая целевую функцию (1)
fitness = @(x) optfn2sldef( x, AL, freq );
nvars = 2; % Количество оцениваемых ЭФГП
lb = [1, 1]; % Нижние значения диапазона поиска ЭФГП
ub = [10, 10]; % Верхние значения диапазона поиска ЭФГП
%% Параметры генетического алгоритма
options = optimoptions(@ga, 'Display', 'iter', ...

```

```

'PopulationSize',10000,... % Размер популяции
'FunctionTolerance',0,...
'MaxGenerations',140,.. % Максимальное количество оценок
'MaxStallGenerations',500,...
'InitialPopulationRange',[1e-50;1e20],...
'ConstraintTolerance',0,...
'EliteCount', 100,...
'CrossoverFraction', 0.9,...% Вероятность скрещивания
'MigrationFraction', 0.9,...% Вероятность мутации
'StallTest', 'geometricweighted',...
'FitnessScalingFcn', { @fitscalingtop 300 },...
'SelectionFcn', @selectionremainder,...
'CrossoverFcn', { @crossoverintermediate 50 },...
'MutationFcn', @mutationadaptfeasible,...
'Display', 'iter',...
'PlotFcn', { @gaplotbestf @gaplotbestindiv },...
'InitialPenalty', 100, 'PenaltyFactor', 300000000000);
[x,fval,exitflag,output] =
ga(fitness,nvars,[],[],[],[],lb,ub,[],options);
%% Найденные ЭФГП при k-запуске генетического алгоритма
ep11(k)=x(1);
ep22(k)=x(2);
FV(k)=fval;
end % конец работы генетического алгоритма, n-запусков
алгоритма.
[val, idx] = min(FV); % поиск минимального значения
фитнесс функции (целевой функции) и его индекса из k-
реализаций
ep1 = ep11(idx); % диэлектрическая проницаемость первого
слоя
ep2 = ep22(idx); % диэлектрическая проницаемость второго
слоя
teta = [ep1, ep2]; % конечный вектор ЭФГП двухслойного
покрытия
%% Расчет погрешностей оценки ЭФГП
dep1 = abs((ep1)-ep1real)/ ep1real)*100
dep2 = abs((ep2)-ep2real)/ ep2real)*100

```

2. Имитационное моделирование реконструкции ЭФГП РПП

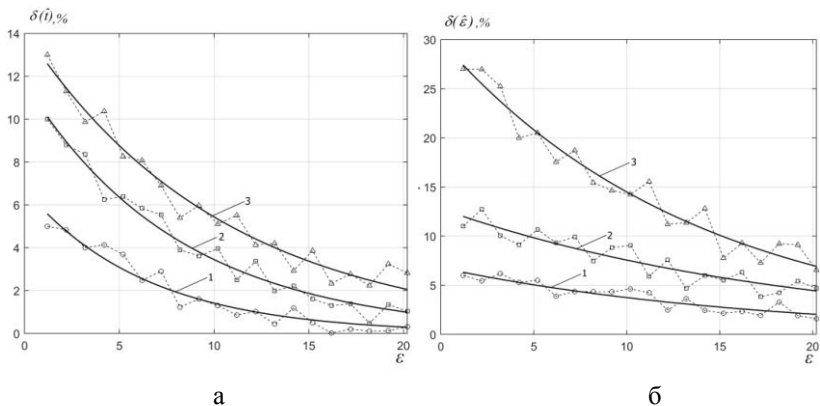
Имитационное моделирование включает следующее. По принятым точным значениям относительных диэлектрических проницаемостей $\epsilon_{i, \dots, \epsilon_n}$ и толщин t_i, \dots, t_n , $k = 1, 2, \dots, L$ многослойного РПП вычисляли теоретические значения коэффициентов ослабления α_r, f_k, ξ для каждой из f_k фиксированных частот, решая дисперсионное уравнение (1).

В блоке БФЭКО формировали экспериментальные значения коэффициентов ослабления α_s, f_k, ξ , которые подставляли в качестве регистрируемой величины в целевую функцию (2). Далее в блоке БРОЗ оптимизировали выражение (2). Точность реконструкции

относительных диэлектрических проницаемостей и толщин исследуемых диэлектрических покрытий исследовали при возрастающих значениях среднего квадратического отклонения (СКО) шума 0–0,008.

В качестве образцов для исследования выбраны РПП, схожие с реальными образцами приведенными в [5]. Также при имитационном моделировании изучали диэлектрики с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 1, 2, \dots, 20$.

На рисунке 2а представлены зависимости средней относительной погрешности оценки диэлектрической проницаемости $\delta(\varepsilon)$ однослойного РПП с толщиной $b = 1$ мм при увеличении значений диэлектрической проницаемости слоя от 1,2 до 20, для трех значений СКО уровня шума: 0,001; 0,003; 0,005. На рисунке 2б представлено, как при этом меняется погрешность оценки толщины слоя $\delta(i)$. Коэффициент ослабления поля ПЭМВ определяли в диапазоне частот 9–10 ГГц с шагом по частоте 0,1 ГГц (количество частот $N=10$).



а – оценка толщины $\delta(i)$; б – диэлектрической проницаемости $\delta(\varepsilon)$

Рис. 2. Зависимости средней относительной погрешности оценки ЭГПП однослойного РПП при фиксированных значениях СКО уровня шума (1 – $\sigma=0,001$; 2 – $\sigma=0,003$; 3 – $\sigma=0,005$)

Анализ зависимостей рисунка 2а для однослойного РПП показывает, что относительная погрешность $\delta(\varepsilon)$ оценки диэлектрической проницаемости слоя, при фиксированном значении уровня СКО шума и толщине слоя, уменьшается с возрастанием их

величины. Относительная погрешность оценки толщины слоя $\delta(i)$, также уменьшается. При этом, точность оценки толщины слоя в 2–2,5 раза выше точности оценки диэлектрической проницаемости.

По результатам имитационного моделирования, метод дает оценки диэлектрической проницаемости и толщины для однослойного покрытия при СКО уровня шума $\sigma=0,003$, во всем диапазоне исследуемых значений диэлектрической проницаемости (1,2–20) с погрешностью не больше 10% с доверительной вероятностью 0,95.

Экспериментальные значения погрешностей оценки диэлектрической проницаемостей $\delta(\varepsilon)$ для однослойных РПП толщиной 1 мм РПП-1 ($\varepsilon = 2,7$), РПП-2 ($\varepsilon = 2,2$) и РПП-3 ($\varepsilon = 11,2$), полученные на измерительном комплексе [3], составляют 6%, 7% и 5%, соответственно, а погрешности оценки толщин слоя 5%, 6% и 4 %, соответственно.

Дисперсионное уравнение для двухслойного РПП усложняется тем, что появляется еще одна граница раздела сред между первым и вторым слоем покрытия.

Для экспериментального и численного эксперимента выбран наиболее сложный случай, когда двухслойное РПП является высококонтрастным (по диэлектрической проницаемости). Исследовано двухслойное РПП на основе двух РПП: РПП-1 ($\varepsilon = 2,7$) и РПП-2 ($\varepsilon = 11,2$) с толщинами слоев 2 мм: «РПП-1-РПП-2» и покрытие в котором слои поменяли местами: «РПП-2-РПП-1». Коэффициент ослабления поля ПМЭМВ, как и в случае однослойного покрытия, измеряли в диапазоне частот 9–10 ГГц с шагом по частоте 0,1 ГГц (количество частот $N=10$).

Увеличение числа оцениваемых ЭФГП приводит к возрастанию их относительных погрешностей. Погрешности оценок параметров слоев двухслойного РПП не совпадают с оценками для однослойного покрытия, однако, сохраняется общая закономерность установленная для базового слоя – погрешности оценок диэлектрических проницаемостей и толщин слоев меньше при больших значениях диэлектрической проницаемости и электрической толщины слоя.

Метод дает устойчивые оценки относительных погрешностей ЭФГП слоев двухслойного РПП не больше 10 %, при уровне СКО шума $\sigma=0,003$ и более, с доверительной вероятностью 0,95. При этом экспериментальные значения погрешностей оценок диэлектрических проницаемостей $\delta(\varepsilon_1)$ и $\delta(\varepsilon_2)$ слоев и их толщин $\delta(i_1)$ и $\delta(i_2)$ для покрытия «РПП-2-РПП-1» составляют 3% и 7 %, 2% и 6%,

соответственно, а для покрытия «РПП-1-РПП-2» 4% и 5 %, 8% и 0,1 %, соответственно.

Отличие ЭФГП оценок отдельных слоев от ЭФГП однослойного покрытия, объясняется появлением дополнительных корреляционных связей между ними.

Заключение

Таким образом, разработана имитационная модель, позволяющая оценивать точность реконструкции структуры электрофизических и геометрических параметров многослойных РПП в зависимости от их электрофизических и геометрических параметров, учитывающая значение СКО уровня шума в измерительных данных и ширину полосы частот измерений.

Список литературы

1. Лагарьков, А.Н. Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий / А.Н. Лагарьков, М.А. Погосян // Вестник РАН. – 2003. – Т. – 73. – № 9. – С. 779–787.
2. Федюнин, П. А. Способы радиоволнового контроля параметров защитных покрытий авиационной техники / П.А. Федюнин, А.И. Казьмин. – М.: Физматлит, 2013. – 190 с.
3. Казьмин, А.И. Восстановление структуры электрофизических параметров многослойных диэлектрических материалов и покрытий по частотной зависимости коэффициента ослабления поля поверхностной электромагнитной волны / А.И. Казьмин, П.А. Федюнин // Измерительная техника. – 2019. – № 9. – С. 39–45.
4. Казьмин, А.И. Оценка точности реконструкции электрофизических и геометрических параметров многослойных диэлектрических покрытий многочастотным радиоволновым методом поверхностных медленных электромагнитных волн / А.И. Казьмин, П.А. Федюнин // Измерительная техника. – 2020. – 8. С. – 51–58.
5. Казанцева, Н.Е. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона / Н.Е. Казанцева, Н.Г. Рывкина, И.А. Чмутин // Радиотехника и электроника. – 2003. – том 48. – № 2. – С. 196–209.