

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-2-37-43>

КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТОВ В МНОГОСЛОЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ СВЧ-МЕТОДОМ

© Александр Игоревич Казьмин*, Павел Александрович Федюнин

Военно-воздушная академия имени Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Россия, 394064, Воронеж, ул. Старых Большеви-
ков 54А; *e-mail: alek-kazmin@yandex.ru*Статья поступила 22 июня 2019 г. Поступила после доработки 23 декабря 2019 г.
Принята к публикации 24 декабря 2019 г.*

Развитие современного машиностроения неразрывно связано с разработкой новых типов многослойных диэлектрических материалов, в которых значения относительных диэлектрических проницаемостей слоев могут значительно отличаться друг от друга. Существующие радиоволновые методы контроля межслойных дефектов в подобных материалах характеризуются низкой точностью реконструкции геометрических параметров дефектов. Представлены результаты исследования протяженных межслойных дефектов в трехслойном диэлектрическом покрытии полиметилметакрилат — фторопласт Ф-4Д — полутвердая резина методом поверхностных электромагнитных волн. Метод основан на решении обратных задач по реконструкции геометрических параметров протяженных дефектов многослойных материалов по частотной зависимости коэффициента ослабления поля поверхностной медленной электромагнитной волны. В отличие от методов, использующих в качестве информативного параметра комплексный коэффициент отражения, данный подход позволяет повысить точность реконструкции геометрических параметров дефектов за счет учета линейной зависимости коэффициента ослабления от частоты, а также уменьшения количества фиксированных частот измерений. При этом процедура определений достаточно проста, так как измеряется только напряженность поля поверхностной электромагнитной волны, а необходимость в фазовых измерениях отсутствует. С использованием полученных экспериментальных данных на многочастотном измерительном комплексе в диапазоне 10 – 11 ГГц с помощью разработанного метода проведена реконструкция межслойных дефектов в исследуемом покрытии с относительной погрешностью оценки их геометрических параметров (толщин) не более 10 %. Предложенный подход может быть применен при исследовании многослойных диэлектрических покрытий на металле, при обнаружении расслоений, отсутствия клея или плохой адгезии между слоями. Кроме того, он пригоден для контроля дефектов в полупроводниковых, ферритовых и композиционных материалах.

Ключевые слова: многослойное диэлектрическое покрытие; дефект; обратная задача; коэффициент ослабления поля поверхностной электромагнитной волны; метод поперечного резонанса.

CONTROL OF DEFECTS IN THE MULTILAYER DIELECTRIC MATERIALS AND COATINGS IN THE MICROWAVE RANGE

© Aleksandr I. Kaz'min*, Pavel A. Fedyunin

Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy, 54A, ul. Starykh Bolshevikov, Voronezh, 394064, Russia;
*e-mail: alek-kazmin@yandex.ru*Received June 22, 2019. Revised December 23, 2019. Accepted December 24, 2019.*

The development of modern engineering is inextricably linked with the development of the new types of multilayer dielectric materials. Existing radio wave methods for monitoring interlayer defects in such materials exhibit low accuracy in reconstructing the geometric parameters of defects. The results of studying extended interlayer defects in the three-layer coating consisting of polymethyl methacrylate, F-4D PTFE, and semi-hard rubber by the method of surface electromagnetic waves are presented. The method is based on the solution of inverse problems in the reconstruction of the geometric parameters of extended interlayer defects of special multilayer materials and coatings from the frequency dependence of the attenuation coefficient of the field of a slow surface electromagnetic wave. Unlike the methods that make use from the complex reflection coefficient we proposed to increase the accuracy of the reconstruction of the geometric parameters of extended interlayer defects taking into account the linear frequency dependence of the attenuation coefficient as well as reducing the number of fixed measurement frequencies. Moreover, the determination procedure is rather simple, since only the field strength of the surface electromagnetic

wave is measured, and there is no need for phase measurements. Experimental data obtained on a multifrequency measuring complex in the range of 10 – 11 GHz were used for reconstruction of the interlayer defects in the coating under study. The developed method provided a relative error of thickness estimation below 10%. The proposed method approach can be used in studying multilayer dielectric coatings on the metal for detection of delamination in the lack of glue or poor adhesion between the layers. The developed method is also suitable for control of the defects in semiconductors, ferrite and composite materials.

Keywords: multilayer dielectric coating; defect; inverse problem; attenuation coefficient of the field of the surface electromagnetic wave; transverse resonance method.

Введение

Многослойные диэлектрические материалы и покрытия широко применяют в изделиях современного машиностроения. Неразрушающий контроль качества таких диэлектриков (оценка параметров слоев, обнаружение межслойных дефектов и др.) приобретает все возрастающее значение в связи с ростом их удельного веса среди новых материалов.

При исследовании многослойных конструкций дефекты подразделяют на локальные (воздушный пузырь), соизмеримые или меньше длины волны, и протяженные («расслоение», «отслоение»), размеры которых больше длины волны [1, 2].

На практике наибольшее распространение получили радиоволновые методы дефектоскопии многослойных материалов, основанные на решении обратных задач по результатам измерения параметров отраженных от объекта контроля электромагнитных волн (ЭМВ) СВЧ-диапазона. В качестве информативного параметра при этом выступает комплексный коэффициент отражения $\hat{R}(f, \xi_{\Pi}, \xi_d)$, где $\xi_{\Pi} = \{\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1}, \dots, \varepsilon_N; b_i, b_{i+1}, \dots, b_N\}$ — вектор, описывающий электрофизические и геометрические параметры (ЭФГП) N -слойного материала; $\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1}, \dots, \varepsilon_N, b_i, b_{i+1}, \dots, b_N$ — диэлектрические проницаемости и толщины слоев; f — частота зондирующего сигнала; $\xi_d = \{d_s, d_{s+1}, \dots, d_M\}$ — вектор геометрических параметров дефектов (толщин) [1 – 5].

Вместе с тем радиоволновые методы «на отражение» не всегда обеспечивают заданные достоверность и вероятность обнаружения межслойных дефектов многослойных контрастных (по относительной диэлектрической проницаемости) диэлектрических сред. Это вызвано тем, что при проведении измерений не учитывают отличие фронта ЭМВ от плоского, эффект фокусировки ЭМВ слоем диэлектрика, отличие формы поверхности диэлектрика от плоской и конечный размер образцов исследуемых структур. Кроме того, как правило, исследуемый материал размещают в ближней зоне передающей антенны, а это приводит к тому, что излучаемая антенной ЭМВ — расходящаяся в пределах исследуемой области многослойного материала. В результате отра-

жения от его глубоких границ и контрастность скачков диэлектрической проницаемости слоев уменьшаются [5, 6]. Использование апертурных антенн, размер раскрытия которых превышает рабочую длину волны, также снижает точность и локальность проводимых измерений [5].

Выражения для коэффициента отражения $\hat{R}(f, \xi_{\Pi}, \xi_d)$ — осциллирующие функции с амплитудой, убывающей при возрастании общей толщины материала. Поэтому для приемлемой точности определения положения межслойных дефектов требуются измерения в довольно широкой полосе частот ($\Delta f = 5 - 6$ ГГц и более) [6].

СВЧ-метод определения ЭФГП многослойных диэлектрических покрытий основан на электродинамической модели взаимодействия поверхностных медленных электромагнитных волн (ПМЭМВ) E - или H -типов СВЧ-диапазона с исследуемым материалом [7]. Информативный параметр — коэффициент ослабления поля ПМЭМВ по нормали к поверхности покрытия [7]. Основу метода составляет решение системы дисперсионных уравнений, число которых равно количеству неизвестных электрофизических параметров. Однако в этом случае решение задачи является некорректным, поскольку малые изменения в исходных данных (значениях коэффициента ослабления поля ПМЭМВ) приводят к существенным погрешностям оценки ЭФГП многослойного материала (в том числе и при контроле в нем протяженных дефектов). Поэтому требуемое высокоточное измерение коэффициента ослабления на практике не всегда возможно.

Цель работы — разработка метода контроля протяженных дефектов в многослойных диэлектрических материалах на основе определения их геометрических параметров (толщин) и положения относительно слоев исследуемого материала.

Обратная задача

Обратную нелинейную задачу реконструкции геометрических параметров межслойных дефектов по измеренным значениям коэффициента ослабления поля ПМЭМВ решали методом вычислительной диагностики, который сводит задачу к нахождению минимума целевой функции [3]. Отметим, что от решения обратной задачи зави-

сят точность и достоверность реконструкции внутренней структуры материала.

В простейшем случае в многослойном покрытии с N слоями могут возникнуть N дефектов — один дефект (типа «отслоение») между покрытием и металлической подложкой и $N - 1$ дефектов (типа «расслоение») между слоями. При этом дефекты рассматриваются как дополнительные слои в многослойном материале с отличными от основной среды свойствами [2].

Для оценки вероятностей обнаружения протяженных дефектов в многослойных материалах использовали статистический критерий оптимальности Неймана – Пирсона [9, 10].

После обнаружения дефекта оценивали его местоположение относительно слоев материала и геометрические размеры, т.е. проводили реконструкцию профиля многослойного покрытия в поперечном направлении (по нормали от металлической подложки) с учетом появления дополнительных «слоев» в виде дефектов.

Задача определения толщин дефектных «слоев» сводится к нахождению вектора геометрических параметров дефектов (толщин) $\xi_d = \{d_s, d_{s+1}, \dots, d_M\}$ многослойного материала по коэффициенту ослабления поля ПМЭМВ $\alpha(f, \xi_\Pi, \xi_d)$. Иначе говоря, определение вектора ξ_d заключается в нахождении оператора, обратного $\alpha(f, \xi_\Pi, \xi_d)$:

$$\xi = \arg(f, \xi_\Pi, \xi_d). \quad (1)$$

Отметим, что коэффициент ослабления поля ПМЭМВ для оценки вектора ξ_d анализируется на конечном дискретном наборе частот — $\alpha(f_k, \xi_\Pi, \xi_d)$, $k = 1, \dots, L$, где L — количество фиксированных частот. Кроме того, в отличие от задач, в которых ЭФГП слоев не известны, при дефектоскопии вектор $\xi_\Pi = \{\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1}, \dots, \varepsilon_N; b_i, b_{i+1}, \dots, b_N\}$ известен априорно.

Для решения обратной задачи из области допустимых значений $\xi_d \in \xi_{доп}$ находили вектор оценки параметров ξ_{d0} , обеспечивающий минимум целевой функции $\rho(\xi_d)$, построенной по невязке между экспериментально полученными $\alpha_s(f, \xi_\Pi, \xi_d)$ и расчетными на частотах f_k ($k = 1, 2, \dots, L$) значениями коэффициента ослабления $\alpha_m(f, \xi_\Pi, \xi_d)$ [3, 4]:

$$\min \rho(\xi_d) = \rho(\xi_{d0}), \quad (2)$$

где

$$\rho(\xi_d) = \sum_{k=1}^L \left| \frac{\alpha_s(f, \xi_\Pi, \xi_d) - \alpha_m(f_k, \xi_\Pi, \xi_d)}{\alpha_m(f_k, \xi_\Pi, \xi_d)} \right|^2.$$

Начальное приближение параметров дефектов по совокупности параметров ξ_n , гарантирующее определение минимума функционала (2), находили путем задания грубой «сетки» в области допустимых значений вектора геометрических параметров дефектов (толщин) [4]:

$$\min \rho(\xi_p) = \rho(\xi_n), \quad (3)$$

где

$$\rho(\xi_p) = \sum_{k=1}^L \sum_{p=1}^Q \left| \frac{\alpha_s(f, \xi_\Pi, \xi_d) - \alpha_m(f_k, \xi_\Pi, \xi_{dp})}{\alpha_m(f_k, \xi_\Pi, \xi_{dp})} \right|^2.$$

Таким образом, для определения местоположения дефектов необходимо решить прямую задачу, т.е. в общем случае знать теоретические значения коэффициента ослабления поля ПМЭМВ $\alpha_m(f, \xi_\Pi, \xi_d)$.

Прямая задача

Градиентные и релаксационные методы минимизации по сравнению с прямыми резко сокращают число итераций, выполняемых в ходе расчета, но при этом возрастают требования к точности начального приближения. Исходя из этого, для минимизации функционалов (2) и (3) использовали прямой метод Неллера – Мида, реализованный в компьютерной программе Wolfram Mathematica.

Прямая задача сводится к решению дисперсионного уравнения для многослойного материала с дополнительными «слоями» в виде протяженных дефектов типа «отслоение» и «расслоение», корни которого — коэффициенты ослабления поля ПМЭМВ $\alpha(f, \xi_\Pi, \xi_d)$ для заданной частоты f [11]:

$$D(\alpha(f, \xi_\Pi, \xi_d); f) = 0. \quad (4)$$

С учетом того, что ЭФГП слоев известны априорно, прямая задача заключается в нахождении неизвестных коэффициентов $\alpha(f, \xi_\Pi, \xi_d)$ по известным «пробным» геометрическим параметрам дефектов $d_s, d_{s+1}, \dots, d_M$ на частотах f_k ($k = 1, 2, \dots, L$).

Многослойное слоисто-однородное диэлектрическое покрытие с дефектами характеризуется векторами ЭФГП $\xi_\Pi = \{\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1}, \dots, \varepsilon_N; b_i, b_{i+1}, \dots, b_N\}$, $i = 1, \dots, N$ (ε_i, b_i — относительные диэлектрическая проницаемость и толщина i -го слоя; N — количество слоев покрытия) и геометрических параметров (толщин) дефектов $\xi_d = \{d_s, d_{s+1}, \dots, d_M\}$ (d_s — толщина s -го дефекта, M — количество «слоев» дефектов). Область над многослойным покрытием рассматривали как от-

дельный слой $N + 1$ с ЭФГП $\varepsilon_{N+1} = \varepsilon_0$ и $b_{N+1} = \infty$.

Минимизируя функционал (2), рассчитывали коэффициенты ослабления $\alpha(f, \xi_{\Pi}, \xi_{\Delta})$. При этом использовали по возможности максимально простые алгоритмы построения и решения дисперсионного уравнения (4). Для многослойного материала с дефектами уравнение (4) составляли методом эквивалентных схем, основанным на формализации метода поперечного резонанса для случая покрытия с произвольным числом слоев [12].

В качестве дисперсионного уравнения для собственных волн в многослойном диэлектрическом покрытии использовали уравнение поперечного резонанса, записанное относительно произвольно выбранного опорного сечения y_0 [12 – 15]:

$$Z_{up}(y) + Z_{down}(y) = 0, \quad (5)$$

где $Z_{up}(y)$, $Z_{down}(y)$ — эквивалентные характеристические сопротивления «вверх» и «вниз» относительно y_0 (в качестве опорного сечения y_0 выбрали границу между металлическим основанием и первым слоем покрытия).

Пусть ПМЭМВ будут E -типа. Коэффициент ослабления поля ПМЭМВ $\alpha(f, \xi_{\Pi}, \xi_{\Delta})$ связан с постоянной распространения γ и поперечными волновыми числами q_i и v_s в слоях покрытия и дефектных «слоях» следующими зависимостями [14]:

$$\begin{aligned} &\text{в области над многослойным покрытием с дефектами} \left(y > \sum_{i=1}^N b_i + \sum_{j=1}^M d_j \right) — \\ &\alpha(f, \xi_{\Pi}, \xi_{\Delta}) = \sqrt{\gamma^2 - k_0^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$ — волновое число свободного пространства;

в слое диэлектрического покрытия —

$$q_i = \sqrt{k_i^2 - k_0^2 - \alpha^2(f, \xi_{\Pi}, \xi_{\Delta})}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (7)$$

где $k_i = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_i}$ — волновое число i -го слоя покрытия; ε_i — относительная диэлектрическая проницаемость;

в «слое» дефектов —

$$v_s = -j\alpha(f, \xi_{\Pi}, \xi_{\Delta}), \quad s = 1, \dots, M, \quad (8)$$

где j — мнимая единица.

С учетом (7) – (9) выразим характеристические сопротивления слоев покрытия и «слоев» дефектов через коэффициент $\alpha(f, \xi_{\Pi}, \xi_{\Delta})$ [13]:

в области над многослойным покрытием с дефектами —

$$Z_{N+1} = Z_0 = -\frac{j\alpha(f, \xi_{\Pi}, \xi_{\Delta})}{\omega \varepsilon_0}, \quad (9)$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота; ε_0 — диэлектрическая постоянная;

в слое диэлектрического покрытия —

$$Z_i = \frac{q_i}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_i}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (10)$$

где q_i — поперечное волновое число ПМЭМВ в i -м слое покрытия, определяемое по выражению (7);

в «слое» дефектов —

$$Z_s = Z_0 = \frac{v_s}{\omega \varepsilon_0}, \quad s = 1, \dots, M. \quad (11)$$

Эквивалентное характеристическое сопротивление «вверх» $Z_{up}(y)$ слоев покрытия ($i = 1, \dots, N + 1$) с учетом «слоев» дефектов ($s = 1, \dots, M$) относительно опорного сечения y_0 находили путем последовательного применения формулы трансформации волновых сопротивлений методом теории цепей [13] (рекуррентная формула справедлива при числе слоев покрытия два и более):

$$\begin{aligned} \bar{Z}(s, i) &= Z_s \frac{Z_i + jZ_s \operatorname{tg}(v_s d_s)}{\bar{Z}_s + jZ_i \operatorname{tg}(v_s d_s)}, \quad \bar{Z}(s, \dots, s+1) = \bar{Z}(s, i) \frac{Z_{s+1} + j\bar{Z}(s, i) \operatorname{tg}(q_i b_i)}{\bar{Z}(s, i) + jZ_{s+1} \operatorname{tg}(q_i b_i)}, \\ \bar{Z}(s, \dots, i+1) &= \bar{Z}(s, \dots, s+1) \frac{Z_{i+1} + j\bar{Z}(s, \dots, s+1) \operatorname{tg}(v_{s+1} d_{s+1})}{\bar{Z}(s, \dots, s+1) + jZ_{i+1} \operatorname{tg}(v_{s+1} d_{s+1})}, \dots, \\ \bar{Z}(s, \dots, M) &= \bar{Z}(i, \dots, N-1) \frac{Z_M + j\bar{Z}(i, \dots, N-1) \operatorname{tg}(q_{N-1} b_{N-1})}{\bar{Z}(i, \dots, N-1) + jZ_M \operatorname{tg}(q_{N-1} b_{N-1})}, \quad \bar{Z}(i, \dots, N) = \bar{Z}(s, \dots, M) \frac{Z_N + j\bar{Z}(s, \dots, M) \operatorname{tg}(v_M d_M)}{\bar{Z}(s, \dots, M) + jZ_N \operatorname{tg}(v_M d_M)}, \\ \bar{Z}(i, \dots, N+1) &= \bar{Z}(i, \dots, N) \frac{Z_{N+1} + j\bar{Z}(i, \dots, N) \operatorname{tg}(q_{N+1} b_{N+1})}{\bar{Z}(i, \dots, N) + jZ_{N+1} \operatorname{tg}(q_{N+1} b_{N+1})}, \quad i = 1, \dots, N, \quad s = 1, \dots, M. \end{aligned} \quad (12)$$

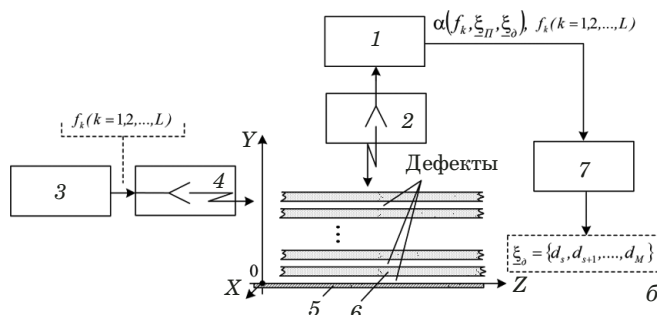


Рис. 1. Измерительный комплекс (а) и его структурная схема (б)

Fig. 1. The measuring complex (a) and block diagram (b)

Получили, что

$$\mathbf{Z}_{\text{up}}(y) = \mathbf{Z}(s, \dots, N + 1), \quad (13)$$

где $\mathbf{Z}(s, \dots, N + 1)$ — характеристическое сопротивление, найденное в результате последовательной трансформации сопротивлений слоев покрытия и «слоев» дефектов.

Характеристическое сопротивление «вниз» относительно опорного сечения y_0 принимали равным нулю ($\mathbf{Z}_{\text{down}}(y) = 0$), поскольку ниже y_0 слой покрытия отсутствуют.

Итоговое дисперсионное уравнение для многослойного диэлектрического покрытия можно представить в следующем виде:

$$D(\alpha(f, \xi_{\text{п}}, \xi_{\text{д}}); f) \equiv \mathbf{Z}(s, \dots, N + 1) = 0. \quad (14)$$

Материалы и оборудование

На рис. 1 представлены измерительный комплекс для обнаружения и оценки протяженных дефектов многослойных диэлектрических материалов в диапазоне СВЧ и его структурная схема (1 — блок измерения коэффициентов ослабления $\alpha(f, \xi_{\text{п}}, \xi_{\text{д}})$ поля ПМЭМВ; 2 — приемная антенна; 3 — генератор СВЧ; 4 — антенна возбуждения ПМЭМВ; 5 — металлическая поверхность; 6 — многослойное диэлектрическое покрытие с числом слоев N и протяженными дефектами M ; 7 — блок решения обратной задачи по реконструкции

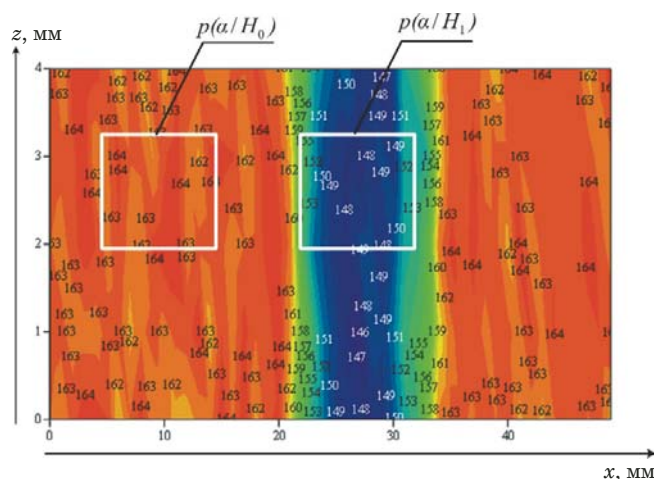


Рис. 2. Распределение коэффициентов ослабления поля ПМЭМВ по поверхности трехслойного диэлектрического покрытия с протяженными дефектами

Fig. 2. Distribution of the attenuation coefficient of the field of a surface electromagnetic wave over the surface of a three-layer dielectric coating with extended defects

геометрических параметров протяженных дефектов [8, 9].

Исследовали трехслойное диэлектрическое покрытие полиметилметакрилат ($b_1 = 1,8$ мм, $\varepsilon_1 = 3,8$) — фторопласт Ф-4Д ($b_2 = 3$ мм, $\varepsilon_2 = 2,2$) — полутвердая резина ($b_3 = 1$ мм, $\varepsilon_3 = 1,8$) с протяженными дефектами, полученными при помощи плоскопараллельных концевых мер длины: 1) «отслоение» ($d_1 = 0,3$ мм); 2) «расслоение» между 1-м и 2-м слоями ($d_2 = 0,3$ мм); 3) «расслоение» между 2-м и 3-м слоями ($d_3 = 0,25$ мм). Коэффициент ослабления поля ПМЭМВ $\alpha(f, \xi_{\text{п}}, \xi_{\text{д}})$ определяли в диапазоне частот 10 – 11 ГГц (шаг — 0,1 ГГц).

Обсуждение результатов

Экспериментальное распределение коэффициентов ослабления поля ПМЭМВ $\alpha(f, \xi_{\text{п}}, \xi_{\text{д}})$ для частоты $f = 10$ ГГц приведено на рис. 2. Видно, что в области покрытия без глубинных дефектов среднее значение коэффициента — около 160, а в области с дефектами — около 150 м^{-1} . Уменьшение коэффициента ослабления подтверждает теоретические расчеты. Аппроксимация экспериментальных данных с помощью метода модернизированных распределений Пирсона [16] показала, что распределения коэффициентов при отсутствии дефектов $p(\alpha/H_0)$ и при их наличии $p(\alpha/H_1)$ подчиняются нормальному закону.

При заданной вероятности $P_{\text{лт}} = 0,01$ вероятность обнаружения протяженных дефектов, рассчитанная на основе критерия Неймана – Пирсона, составила $P_{\text{по}} = 0,96$. Отметим, что в данном случае это обобщенная вероятность с учетом влияния всех трех дефектов.

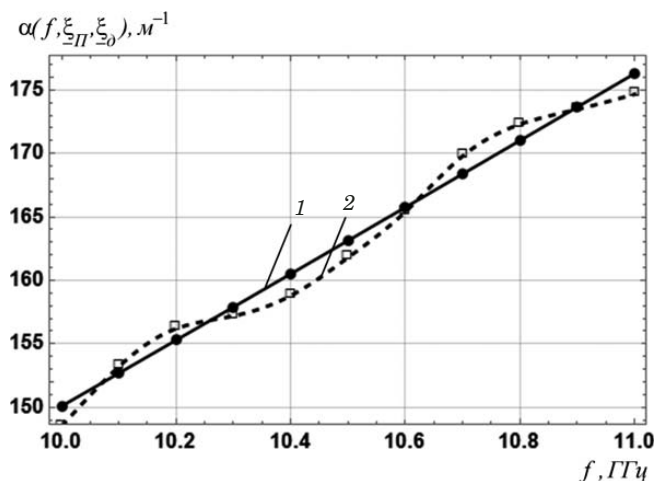


Рис. 3. Теоретическая (1) и экспериментальная (2) частотные зависимости коэффициента ослабления поля ПМЭМВ

Fig. 3. Theoretical (1) and experimental (2) frequency dependences of the attenuation coefficient of the field of a slow surface electromagnetic wave

После локализации области, под которой присутствуют дефекты, решали обратную задачу по реконструкции их параметров (толщин) в поперечном направлении (по нормали к поверхности). На область допустимых значений составляющих вектора геометрических параметров дефектов $\xi_d = \{d_s, d_{s+1}, \dots, d_M\}$ накладывали следующее ограничение:

$$d_s \in [0,1; 0,6 \text{ мм}]. \quad (15)$$

В качестве начального приближения ξ_n использовали решения обратной задачи, полученные на дискретной сетке, из области допустимых значений параметров (15) (для каждого из дефектов сетку задавали из равномерно расположенных в области допустимых значений шести значений $d_s \in [0,1; 0,2, \dots, 0,6 \text{ мм}]$, $s = 1, \dots, 6$).

На рис. 3 для исследуемого покрытия приведены полученная численным решением дисперсионного уравнения (14) теоретическая и экспериментальная частотные зависимости коэффициента ослабления.

Видно, что зависимость имеет линейный характер. При контроле дефектов в многослойном материале это повышает точность и достоверность оценки геометрических параметров дефектов за счет уменьшения количества используемых фиксированных частот измерений. Отличие теоретических значений от экспериментальных не превышало 5 %. Основной вклад в погрешность обусловлен несинфазностью фронта ПЭМВ, возбуждаемой антенной.

Результат реконструкции геометрических параметров дефектов, полученный путем решения обратной задачи на основе частотной зави-

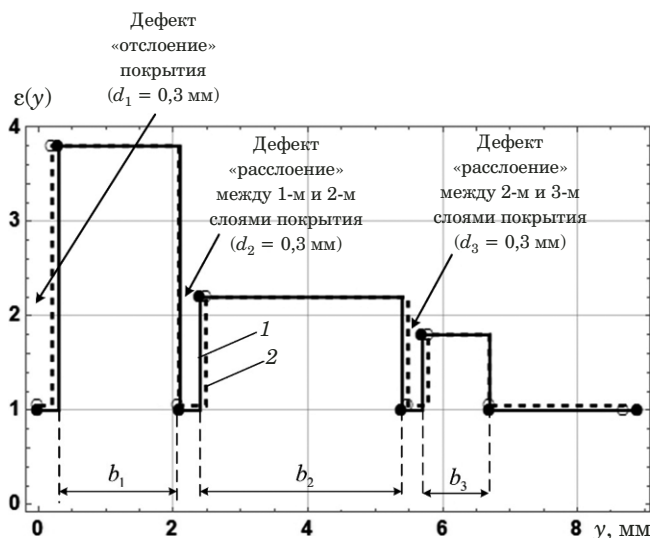


Рис. 4. Реконструированные профили трехслойного покрытия с дефектами по теоретическим (1) и экспериментальным (2) данным

Fig. 4. The profiles of a three-layer coating with defects reconstructed from theoretical (1) and experimental (2) data

симости коэффициента ослабления, приведен на рис. 4 (нормаль направлена вверх от металлической подложки). Относительная погрешность реконструкции составила 10 %.

Закключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что разработанный радиоволновый метод реконструкции геометрических параметров протяженных дефектов в многослойных диэлектрических материалах по частотной зависимости коэффициента ослабления поля ПМЭМВ (в отличие от методов, использующих комплексный коэффициент отражения) позволяет повысить точность и достоверность реконструкции структуры дефектов. Повышение точности достигается в результате учета линейной зависимости коэффициента ослабления от частоты и, соответственно, уменьшения количества фиксированных частот измерений. Вероятность обнаружения протяженных межслойных дефектов составила $P_{по} = 0,96 - 0,98$, относительная погрешность реконструкции их геометрических параметров (толщин) — не более 10 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Михнев В. А.** Реконструктивная микроволновая структурокопия многослойных диэлектрических сред. — Мн.: Светоч, 2002. — 192 с.
2. **Клюев В. В., Соснин Ф. Р., Ковалев А. В. и др.** Неразрушающий контроль и диагностика: справочник. — М.: Машиностроение, 1995. — 408 с.
3. **Гринев А. Ю., Темченко В. С., Багно Д. В.** Радары подповерхностного зондирования. Мониторинг и диагностика сред и объектов. — М.: Радиотехника, 2013. — 391 с.

4. Финкельштейн М. И., Карпукхин В. И., Кутев В. А., Метелкин В. Н. Подповерхностная радиолокация. — М.: Радио и связь, 1994. — 216 с.
5. Lagarkov A. N., Matytsin S. M., Rozanov K. N., Sarychev A. K. Dielectric properties of fiber-filled composites / Journal of Applied Physics. 1998. Vol. 84. N 7. P. 3806 – 3814. DOI: 10.1063/1.368559.
6. Алексин С. Г., Дробахин О. О. Метод Ньютона – Канторовича: модификация итерационной процедуры для случая кусочно-постоянного профиля действительной диэлектрической проницаемости / Вестник днепропетровского университета. Серия Физика. Радиоэлектроника. 2009. № 2. Вып. 16. С. 117 – 124.
7. Казьмин А. И., Федюнин П. А. Метод измерения электрофизических параметров многослойных диэлектрических покрытий в диапазоне СВЧ / Контроль. Диагностика. 2018. № 11. С. 52 – 59. DOI: 10.14489/td.2018.11.
8. Федюнин П. А., Казьмин А. И. Способы радиоволнового контроля параметров защитных покрытий авиационной техники. — М.: Физматлит, 2013. — 190 с.
9. Федюнин П. А., Казьмин А. И., Манин В. А. СВЧ-способ дефектоскопии радиопоглощающих покрытий и устройство для его реализации / Контроль. Диагностика. 2017. № 11. С. 32 – 39. DOI: 10.14489/td.2017.11.
10. Шарп Р. Методы неразрушающих испытаний. / Пер. с англ. — М.: Мир, 1972. — 494 с.
11. Барыбин А. А. Электродинамика волноведущих структур. Теория возбуждения и связи волн. — М.: Физматлит, 2007. — 512 с.
12. Фелсен Л., Маркувиц Н. Излучение и рассеяние волн. Т. 1 / Пер. с англ. — М.: Мир, 1978. — 547 с.
13. Patrovsky A., Ke Wu. Dielectric Slab Mode Antenna for Integrated Millimeter-wave Transceiver Front-ends / Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering, 2013. N 1(3). P. 87 – 93. DOI: 10.13189/ujeee.2013.010305.
14. Zhuozhu Chen, Zhongxiang Shen. Surface Waves Propagating on Grounded Anisotropic Dielectric Slab / Applied Sciences. 2018. N 8(1). DOI: 10.3390/app8010102.
15. Valerio G., Jackson D., Galli A. Fundamental properties of surface waves in lossless stratified structures / Proceedings of the Royal Society. 2010. Vol. 466. P. 2447 – 2469. DOI: 10.1098/rspa.2009.0664.
16. Карпов И. Г. Аппроксимация экспериментальных распределений радиолокационных сигналов с использованием модернизированных распределений Пирсона / Радиотехника. № 5. 2003. С. 56 – 61.
2. Klyuev V. V., Sosnin F. R., Kovalev A. B., et al. Non-destructive testing and diagnosis: a textbook. — Moscow: Mashinostroenie, 1995. — 408 p. [in Russian].
3. Grinev A. Yu., Temchenko V. S., Bagno D. V. Ground penetrating radar. Monitoring and diagnostics of media and objects. — Moscow: Radiotekhnika, 2013. — 391 p. [in Russian].
4. Finkelshtein M. I., Karpukhin V. I., Kutev V. A., Metelkin V. N. Subsurface radiolocation. — Moscow: Radio i svyaz, 1994. — 216 p. [in Russian].
5. Lagarkov A. N., Matytsin S. M., Rozanov K. N., Sarychev A. K. Dielectric properties of fiber-filled composites / Journal of Applied Physics. 1998. Vol. 84. N 7. P. 3806 – 3814. DOI: 10.1063/1.368559.
6. Aleksin S. G., Drobakhin O. O. Newton – Kantorovich method: modification of the iterative procedure for the case of a piecewise constant real dielectric constant profile / Vestn. Dnepropetr. Univ. Ser. Fiz. Radioelektronika. 2009. N 2. P. 117 – 124 [in Russian].
7. Kaz'min A. I., Fedyunin P. A. Method measurement of electrophysical parameters of multilayer dielectric coatings in the microwave range / Kontrol. Diagnostika. 2018. N 11. P. 52 – 59 [in Russian]. DOI: 10.14489/td.2018.11.
8. Fedyunin P. A., Kaz'min A. I. Methods of radio wave monitoring of the parameters of protective coatings of aviation equipment. — Moscow: Fizmalit, 2013 — 190 p. [in Russian].
9. Fedyunin P. A., Kaz'min A. I., Manin V. A. Microwave-method flaw detection of radio-absorbing coatings and device for its implementation. Kontrol'. Diagnostika. 2017. N 11. P. 32 – 39 [in Russian]. DOI: 10.14489/td.2017.11.
10. Sharn R. Non-destructive testing methods. — Moscow: Mir, 1972. — 494 p. [Russian translation].
11. Barybin A. A. Electrodynamics of waveguiding structures. Theory of excitation and wave coupling. — Moscow: Fizmalit, 2007. — 512 p. [in Russian].
12. Felsen L., Marcuvitz N. Radiation and Scattering of Waves. Vol. 1. — Englewood Cliffs, New Jersey. 1973. — 547 p.
13. Patrovsky A., Ke Wu. Dielectric Slab Mode Antenna for Integrated Millimeter-wave Transceiver Front-ends / Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering, 2013. N 1(3). P. 87 – 93. DOI: 10.13189/ujeee.2013.010305.
14. Zhuozhu Chen, Zhongxiang Shen. Surface Waves Propagating on Grounded Anisotropic Dielectric Slab / Applied Sciences. 2018. N 8(1). DOI: 10.3390/app8010102.
15. Valerio G., Jackson D., Galli A. Fundamental properties of surface waves in lossless stratified structures / Proceedings of the Royal Society. 2010. Vol. 466. P. 2447 – 2469. DOI: 10.1098/rspa.2009.0664.
16. Karpov I. G. Approximation of experimental distributions of radar signals using modernized Pearson distributions / Radiotekhnika. 2003. N 5. P. 56 – 61 [in Russian].

REFERENCES