

## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОТСЛОЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН СВЧ ДИАПАЗОНА

© 2020 г. А.И. Казьмин<sup>1,\*</sup>, П.А. Федюнин<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия 394064 Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 А  
E-mail: \*alek-kazmin@yandex.ru; \*\*fpal@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.06.2020; после доработки 20.07.2020  
Принята к публикации 23.07.2020

Представлены результаты исследования, подтверждающие высокую эффективность применения поверхностных электромагнитных волн СВЧ-диапазона для оценки величины отслоения диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий от металлического основания. В качестве параметра для оценки величины отслоения используется комплексный коэффициент ослабления поля поверхностной электромагнитной волны по нормали к поверхности покрытия. В отличие от существующих подходов, в разработанной электродинамической модели измерений учитываются действительные и мнимые части комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей покрытия с учетом их частотной дисперсии, что повышает точность и достоверность оценки величины отслоения. Разработан алгоритм оценки величины отслоения покрытия на основе поиска максимальной совместной плотности вероятности коэффициента ослабления поля поверхностной электромагнитной волны, измеренного на наборе частот. Обоснован и введен статистический предел разрешения двух величин отслоений, что позволяет оценить возможность различения двух близких величин отслоений в зависимости от ширины полосы частот измерений коэффициента ослабления, их количества и отношения «сигнал—шум». Приведена структура измерительного комплекса, для реализации предложенных подходов оценки отслоения. Численные и натурные эксперименты показали принципиальную возможность оценки значения регистрируемых величин отслоений диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий от металлической подложки 20 мкм и менее в полосе частот 9—13,5 ГГц.

*Ключевые слова:* отслоение, покрытие, поверхностная электромагнитная волна, коэффициент ослабления поля, диэлектрическая и магнитная проницаемости, частотная дисперсия, максимум совместной плотности распределения вероятностей, статистический предел разрешения.

DOI: 10.31857/S0130308220090055

### ВВЕДЕНИЕ

Диэлектрические (ДП) и магнитодиэлектрические покрытия (МДП), работающие в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), широко применяются в различных областях науки и техники. В отдельное важнейшее самостоятельное направление выделяется применение ДП и МДП, реализованных в виде радиопоглощающих покрытий (РПП), для снижения радиолокационной заметности (РЛЗ) современных образцов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) [1—3]. При этом снижение РЛЗ образцов ВВСТ различными способами и с помощью РПП в частности представляет собой комплексную проблему государственного уровня [1—3].

Эффективно реализовать свойства ДП, МДП и РПП в частности можно только при строгом соблюдении технологических режимов и допусков при их нанесении. В данном процессе становится крайне актуальной задача обеспечения надежной адгезии РПП к обшивке ВВСТ. При недостаточной адгезии в ходе эксплуатации высокие внутренние напряжения приводят к отслоениям РПП, что приводит к увеличению эффективной поверхности рассеяния образца ВВСТ и снижению его боевых возможностей [1, 2].

Особенностью измерения электрофизических параметров (ЭФП) и оценки дефектов в ДП, МДП и в РПП, в частности, заключается в том, что измерения необходимо проводить в диапазоне частот, в котором работает покрытие. При этом важно оценить, как меняются ЭФП и дефекты по поверхности исследуемого образца в ходе его эксплуатации. Исходя из этого, метод должен обеспечивать односторонний доступ к объекту контроля с высокой локальностью и точностью контроля.

Таким образом, разработка радиоволновых неразрушающих методов контроля ДП и МДП, работающих в диапазоне СВЧ, с количественной интерпретацией результатов контроля является актуальной научной задачей.

В работах [4—9] показано, что повышение эффективности измерения ЭФП многослойных покрытий, контроля и оценки в них дефектов (в виде отслоений и расслоений) возможно путем применения метода квазиразрешений в рамках многочастотной (широкополосной) СВЧ-интроскопии. В ка-

честве информативного параметра при этом выступает комплексный коэффициент отражения (ККО)  $\dot{R}(f, \xi_n, \xi_d)$ , 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 ЭФП  $n$ -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 слоев  $n$ -слойного материала;  $t_{n+1}, \dots, t_{2n}$  — толщины слоев материала;  $\lambda$  — длина волны зондирующего сигнала,  $\xi_d = \{d_s, d_{s+1}, \dots, d_M\}$  — вектор геометрических параметров дефектов (величин отслоений и расслоений в покрытии).

Между тем в представленных работах исследованы, в основном, диэлектрические материалы. Для достижения приемлемой точности оценки ЭФП слоев и толщин дефектов многослойного материала требуются измерения коэффициента отражения в широкой полосе частот ( $\Delta f = 5$ — $6$  ГГц и более), при этом частотная дисперсия ЭФП материала не учитывается, или рассматриваются материалы с малой частотной дисперсией, что не позволяет использовать данные методы для контроля реальных образцов материалов и РПП в частности. Кроме того, данные методы обладают низкой локальностью контроля из-за использования апертурных антенн с размером раскрыва, превышающим рабочую длину волны. Также при испытаниях на эффективность РПП требуется локальная оценка ЭФП и возникающих дефектов по его поверхности. Кроме того, результаты исследований представлены в основном для диапазонов  $15$ — $27$  ГГц, однако при контроле РПП требуются измерения и на более низких частотах.

В [10—12] представлен метод, основанный на определении постоянных распространения  $\dot{\gamma}$  мод поверхностной электромагнитной волны (ПЭМВ) путем анализа частотных свойств изогнутого конца диэлектрического волноводного датчика, с последующим решением обратной задачи. Между тем для удовлетворительной точности оценки диэлектрических проницаемостей слоев материала требуется измерение  $6$ — $10$  продольных постоянных распространения ПЭМВ в диапазоне  $25$ — $100$  ГГц. В области частот  $9$ — $15$  ГГц метод измерений обладает низкой точностью, достоверностью и локальностью контроля.

В ряде работ [3, 13—16] представлен подход для измерения ЭФП и дефектоскопии, когда сам исследуемый листовый диэлектрик служит открытой линией передачи в которой возбуждается ПЭМВ. При этом измеряется не продольная постоянная распространения  $\dot{\gamma}$ , а связанная с ней величина — поперечное волновое число, характеризующее распределение поля ПЭМВ в свободном пространстве по нормали к поверхности покрытия — комплексный коэффициент ослабления ПЭМВ  $\dot{\alpha}(f, \xi_n, \xi_d)$ , который связан с постоянной распространения зависимостью:

$$\dot{\alpha}(f, \xi_n, \xi_d) = \sqrt{\dot{\gamma}^2 - k_0^2}, \quad (1)$$

где  $f$  — частота зондирующего сигнала;  $k_0$  — волновое число свободного пространства;  $\dot{\gamma} = \alpha_3 - j\beta$  — продольная постоянная распространения,  $\alpha_3$  — коэффициент затухания,  $\beta$  — коэффициент фазы;

$$\dot{\alpha}(f, \xi_n, \xi_d) = \alpha'(f, \xi_n, \xi_d) - j\alpha''(f, \xi_n, \xi_d), \quad (2)$$

где  $\alpha'(f, \xi_n, \xi_d)$  — действительная часть коэффициента ослабления ПЭМВ — коэффициент, характеризующий экспоненциальное ослабление поля ПЭМВ по нормали к поверхности покрытия;  $\alpha''(f, \xi_n, \xi_d)$  — мнимая часть коэффициента ослабления ПЭМВ — коэффициент, характеризующий фазовый набег для ПЭМВ, распространяющейся по направлению к поверхности раздела «покрытие—свободное пространство» [17].

В [3, 15, 16] теоретически и экспериментально доказано, что действительную часть коэффициента ослабления  $\alpha'(f, \xi_n, d)$  можно определить по результатам косвенных измерений напряженности электрического поля ПЭМВ по нормали к поверхности покрытия в разнесенных точках измерений методом зонда [18]:

$$\alpha'(f, \xi_n, \xi_d) = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r \frac{1}{s} \ln \left[ \frac{E_j}{E_{j+1}} \right], \quad (3)$$

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

Мнимая часть коэффициента ослабления определяется диэлектрическими и магнитными потерями материала. Разделяя действительную и мнимую части выражения (2), можно найти связь мнимой части коэффициента ослабления с коэффициентом затухания поля ПЭМВ  $\alpha_3$  вдоль поверхности покрытия:

$$\alpha''(f, \xi_{\text{п}}, \xi_{\text{д}}) = \sqrt{\frac{\alpha_3^4 - \alpha_3^2 \alpha'^2(f, \xi_{\text{п}}, \xi_{\text{д}}) - k_0^2 \alpha_3^2}{\alpha'^2(f, \xi_{\text{п}}, \xi_{\text{д}}) - \alpha_3^2}}. \quad (4)$$

При этом в работах [3, 15, 16] модели измерений не учитывают диэлектрические и магнитные потери материала, а также дисперсию его ЭФП (рассматривается только действительная часть коэффициента ослабления). Но при оценке дефектов типа «отслоение» и «расслоение» с толщиной 10—50 мкм, это приводит к значительной погрешности их оценки, соизмеримой с промахом.

Кроме того, модели, которые обеспечивают однозначную оценку величин отслоений и расслоений с учетом неопределенности измерений коэффициента ослабления ПЭМВ, который связан с ними нелинейно, отсутствуют. Это требование имеет решающее значение для надежного обнаружения и оценки отслоений и расслоений слоев ДП и МДП с использованием ПЭМВ. Данные неопределенности включают шум в измерительной системе, погрешности в определении номинальных значений ЭФП слоев покрытия, калибровка измерительной системы и др.

Как и в случае с коэффициентом отражения, данные неопределенности можно компенсировать при оценке нескольких коэффициентов ослабления в полосе частот методом квазирешений. Предварительные исследования по обнаружению и оценке отслоений и расслоений в многослойных ДП с использованием ПЭМВ на основе метода квазирешений приведены в [15,16]. В данных работах представлены электродинамические модели, которые описывают взаимодействие между ПЭМВ и многослойной структурой и рассмотрены базовые основы метода определения ЭФП и оценки отслоений и расслоений.

Исходя из этого, целью статьи является оценка потенциальной точности оценки величины отслоения ДП и МДП, с частотной дисперсией ЭФП, от металлической подложки с использованием ПЭМВ, с учетом неопределенностей в измерениях коэффициента ослабления поля ПЭМВ.

### ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ ОТСЛОЕНИЯ ДП И МДП ОТ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОСНОВАНИЯ

Представленный в [16] метод оценки толщин протяженных дефектов типа «отслоение» многослойного диэлектрического покрытия от подложки и «расслоений» между слоями основан на определении вектора оцениваемых геометрических параметров дефектов (их толщин)  $\xi_{\text{д}} = \{d_s, d_{s+1}, \dots, d_M\}$  многослойного материала путем минимизации целевой функции, построенной по невязке между экспериментально полученными  $\alpha'_s(f_k, \xi_{\text{п}}, \xi_{\text{д}})$  и вычисленными теоретическими значениями действительной части коэффициентов ослабления  $\alpha'_t(f_k, \xi_{\text{п}}, \xi_{\text{д}})$  поля ПЭМВ на частотах  $f_k, k=1, 2, \dots, L$ :

$$\hat{\xi}_{\text{д}} = \arg \min_{\xi \in \xi_{\text{доп}}} \rho(\xi_{\text{д}}) = \sum_{k=1}^L \left| \alpha'_s(f_k, \xi_{\text{п}}, \xi_{\text{д}}) - \alpha'_t(f_k, \xi_{\text{п}}, \xi_{\text{д}}) \right|^2, \quad (5)$$

где  $\rho(\xi_{\text{д}})$  — расстояние между экспериментально полученными  $\alpha'_s(f_k, \xi_{\text{п}}, \xi_{\text{д}})$  и вычисленными теоретическими значениями  $\alpha'_t(f_k, \xi_{\text{п}}, \xi_{\text{д}})$  коэффициентов ослабления поля ПЭМВ в области допустимых значений  $\xi \in \xi_{\text{доп}}$ .

Рассмотрим особенности применения метода для случая оценки величины отслоения  $\hat{d}$  однослойных ДП и МДП с диэлектрическими и магнитными потерями, с частотной дисперсией ЭФП, от металлического основания.

На рис. 1 приведена геометрия однослойного покрытия с диэлектрическими и магнитными потерями, в общем случае с частотной дисперсией комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей, размещенного на металлической подложке. При этом учитывается, что в данной структуре может присутствовать протяженный дефект в виде воздушного отслоения толщиной  $d$ .

Появление в ДП или МДП на металлической подложке протяженного дефекта в виде отслоения (длина отслоения в продольном направлении  $1/3\lambda$  и более) можно представить как появление в системе «дополнительного слоя» с отличными от основного покрытия свойствами и рассматривать его как двухслойное покрытие «отслоение—покрытие». Обоснованность подобного подхода подтверждена теоретически и экспериментально в [15,16].

Так как рассматривается однослойное покрытие с диэлектрическими и магнитными потерями, вектор ЭФП покрытия представим пятикомпонентным  $\xi_{\text{п}} = \{\varepsilon'_n(f_k), \varepsilon''_n(f_k), \mu'_n(f_k), \mu''_n(f_k), t_n\}$ , где  $\varepsilon'_n(f_k), \mu'_n(f_k)$  — действительные и  $\varepsilon''_n(f_k), \mu''_n(f_k)$  — мнимые части диэлектрической и магнитной

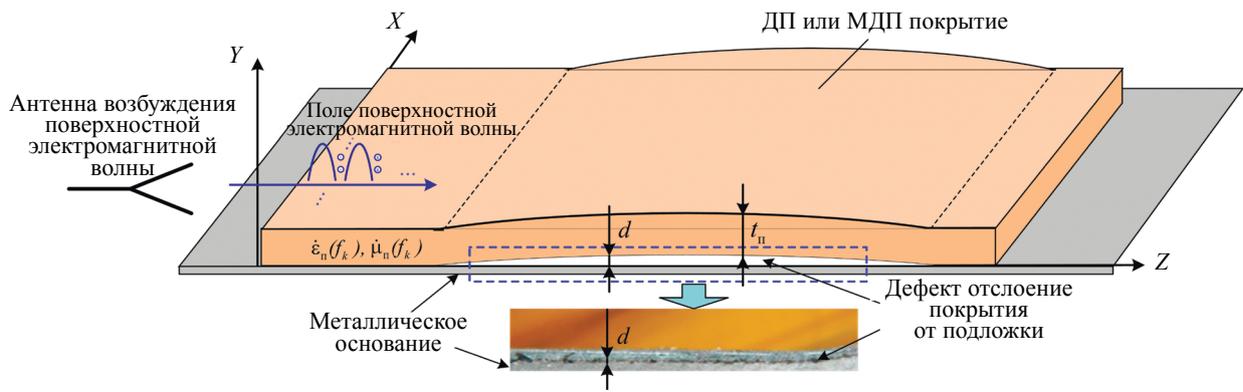


Рис. 1. Геометрия однослойного ДП или МДП при отслоении его от металлической подложки.

проницаемостей соответственно,  $t_n$  — толщина покрытия, а вектор дефектов  $\xi_d = \{d_s, d_{s+1}, \dots, d_M\}$  представим в виде одной величины отслоения  $d$ . Исходя из этого, комплексный коэффициент ослабления ПЭМВ будет иметь следующий вид:  $\hat{\alpha}(f_k, \xi_n, d)$ .

Мнимую часть коэффициента ослабления включим в целевую функцию (5) в виде дополнительного параметра оптимизации. С учетом этого, выражение для целевой функции представим в следующем виде:

$$\hat{d} = \arg \min_{d \in d_{\text{дон}}} \rho(d, \alpha''(f, \xi_n, d)) = \sum_{k=1}^L \left| \hat{\alpha}_s^T(f_k, \xi_n, d) - \hat{\alpha}_T(f_k, \xi_n, d) \right|^2. \quad (6)$$

Теоретические значения коэффициента ослабления  $\hat{\alpha}(f_k, \xi_n, d)$  ПЭМВ рассматриваемого двухслойного покрытия «отслоение—покрытие» получали путем решения дисперсионного уравнения по известному вектору ЭФП  $\xi_n$  и пробным значениям величин отслоений  $d$  на частотах  $f_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, L$  [15, 16]:

$$D[\hat{\alpha}(f_k, \xi_n, d); f_k] = 0. \quad (7)$$

Дисперсионное уравнение (7) составляли, используя метод «поперечного резонанса» [15, 16, 18, 20]. Расчетная схема составления дисперсионного уравнения (7) приведена на рис. 2.

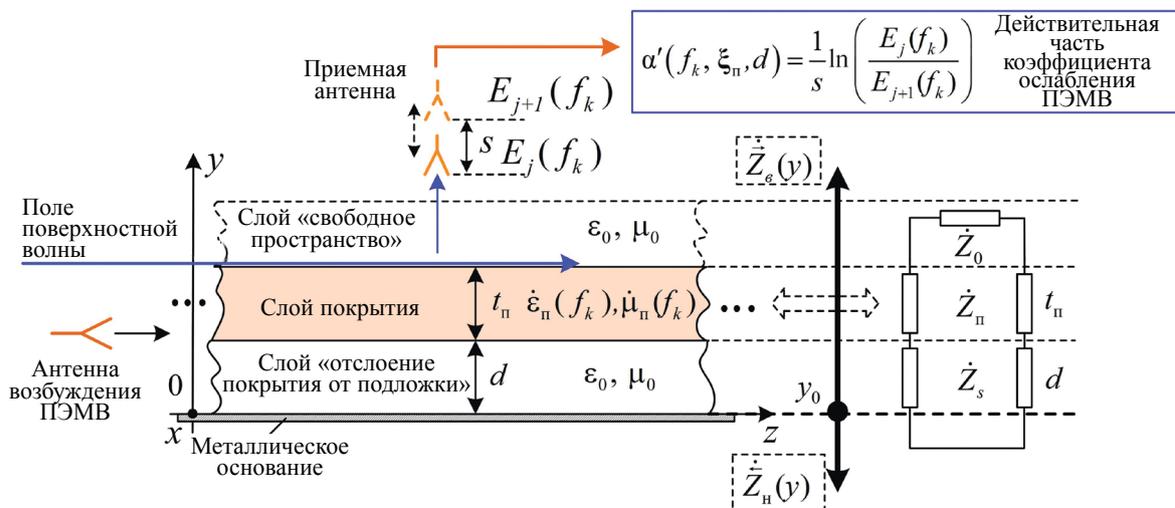


Рис. 2. Расчетная схема составления дисперсионного уравнения для ДП или МДП при отслоении от металлической подложки.

В общем случае в данной структуре могут существовать ПЭМВ Е- и Н-типов. Дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования приведены для ПЭМВ Е- типа. Между тем физические особенности оценки отслоения с помощью ПЭМВ Н-типов аналогичны.

Уравнение «поперечного резонанса» для составления дисперсионного уравнения (7) имеет следующий вид [15, 16, 19—21]:

$$\dot{\tilde{Z}}_в(y) + \dot{\tilde{Z}}_н(y) = 0 \text{ при } \forall y, \quad (8)$$

где  $\dot{\tilde{Z}}_в(y)$  и  $\dot{\tilde{Z}}_н(y)$  — эквивалентные характеристические сопротивления «вверх» и «вниз» относительно произвольного опорного сечения  $y_0$  (для удобства математических преобразований выбрано сечение  $y_0$  между слоем «отслоение» и металлической подложкой).

Характеристическое сопротивление  $\dot{\tilde{Z}}_н(y) = 0$ , так как ниже опорного сечения  $y_0$  — металлическая поверхность, а  $\dot{\tilde{Z}}_в(y)$  определяется по рекуррентной формуле трансформации волновых сопротивлений [15, 16, 20—22]:

$$\dot{\tilde{Z}}_в \equiv \dot{\tilde{Z}}(s\_п\_0) = \dot{\tilde{Z}}(s\_п) \frac{\dot{Z}_0 + j\dot{Z}(s\_п) \operatorname{tg}(\dot{q}t_п)}{\dot{\tilde{Z}}(s\_п) + j\dot{Z}_0 \operatorname{tg}(\dot{q}t_п)}, \quad \dot{\tilde{Z}}(s\_п) = \dot{Z}_s \frac{\dot{Z}_п + j\dot{Z}_s \operatorname{tg}(\dot{v}d)}{\dot{Z}_s + j\dot{Z}_п \operatorname{tg}(\dot{v}d)}, \quad (9)$$

где  $\dot{\tilde{Z}}(s\_п\_0)$  — эквивалентное характеристическое сопротивление слоя «отслоение», слоя покрытия и области над покрытием (слой «свободное пространство»);  $\dot{\tilde{Z}}(s\_п)$  — эквивалентное характеристическое сопротивление слоя «отслоение» и слоя покрытия;  $\dot{Z}_0, \dot{Z}_п, \dot{Z}_s$  — характеристические сопротивления на границе раздела между слоем покрытия и свободным пространством, в слое покрытия и в слое «отслоение» соответственно.

Выражения для  $\dot{Z}_0$ ,  $\dot{Z}_п$  и  $\dot{Z}_s$  имеют следующий вид [15, 16, 20—23]:

$$\dot{Z}_0 = -j \frac{\dot{\alpha}(f_k, \xi_п, d)}{\omega \varepsilon_0}; \quad \dot{Z}_п = \frac{\dot{q}}{\omega \varepsilon_0 (\varepsilon'_п(f_k) - j\varepsilon''_п(f_k))}; \quad \dot{Z}_s = \frac{\dot{v}}{\omega \varepsilon_0},$$

где  $\dot{\alpha}(f_k, \xi_п, d)$  — комплексный коэффициент ослабления ПЭМВ,  $\dot{\alpha}(f_k, \xi_п, d) = \sqrt{\dot{\gamma}^2 - k_0^2}$ ,  $\dot{\gamma}$  — продольная комплексная постоянная распространения ПЭМВ;  $k_0$  — волновое число свободного пространства,  $k_0 = 2\pi f_k / c$ ;  $\dot{q}$  — комплексное поперечное волновое число ПЭМВ в слое покрытия,  $\dot{q} = \sqrt{\dot{k}_п^2 - k_0^2 - \dot{\alpha}^2(f_k, \xi_п, d) + \beta^2}$ ,  $\dot{k}_п$  — комплексное волновое число в слое покрытия,  $\dot{k}_п = 2\pi f \sqrt{(\varepsilon'_п(f_k) - j\varepsilon''_п(f_k))(\mu'_п(f_k) - j\mu''_п(f_k))} / c$ ,  $c$  — скорость ЭМВ в свободном пространстве,  $\varepsilon'_п(f_k) - j\varepsilon''_п(f_k)$  — комплексная диэлектрическая проницаемость слоя,  $\mu'_п(f_k) - j\mu''_п(f_k)$  — комплексная магнитная проницаемость слоя,  $\beta = m\pi/p$  — волновое число, характеризующее распределение поля ПЭМВ по ширине покрытия  $p$ ;  $\dot{v} = -j \cdot \dot{\alpha}(f_k, \xi_п, d)$  — комплексное волновое число в слое «отслоение»;  $j$  — мнимая единица.

Таким образом, итоговое дисперсионное уравнение для покрытия с отслоением представим в следующем виде:

$$D[\dot{\alpha}(f_k, \xi_п, d); f_k] = 0 \equiv \dot{\tilde{Z}}(s\_п\_0) = 0. \quad (10)$$

Полученное дисперсионное уравнение (10) позволяет для заданной частоты ЭФП материала с учетом их частотной дисперсии и величине отслоения  $d$  однозначно определить комплексный коэффициент ослабления ПЭМВ  $\dot{\alpha}(f, \xi_п, d)$  и, по сути, является прямой задачей метода квазирешений для ПЭМВ.

#### АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОСЛАБЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Предварительные исследования метода квазирешений для ПЭМВ, основанного на минимизации целевой функции вида (5), представленные в [15, 16], не дают ответ, насколько будет точным результат с учетом неопределенностей в измерениях коэффициента ослабления. Исходя из этого, дальнейшее развитие метода заключается в разработке алгоритма обработки результатов измере-

ний коэффициента ослабления ПЭМВ, обеспечивающего оценку величины отслоения покрытия от подложки  $\hat{d}$ , с учетом неопределенностей в измерительных данных с наименьшей погрешностью.

Предполагается, что ЭФП слоя покрытия известны априорно, что соответствует реальной практической ситуации контроля дефектов. Для оценки величины отслоения  $\hat{d}$  примем, что оно принимает конечный дискретный набор возможных значений  $\hat{d} \in \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ , при этом  $d_1 = 0$  и соответствует случаю, когда отслоения покрытия нет.

Экспериментальные значения действительной части коэффициента ослабления ПЭМВ  $\alpha'_s(f_k, \xi_n, d)$  как функции частоты и величины отслоения  $d$  наблюдаются в эксперименте при наличии аддитивных случайных помех и были представлены в виде [5, 6]:

$$\alpha'_s(f_k, \xi_n, d) = \alpha'_t(f_k, \xi_n, d) + n(f_k); \quad k = 1, 2, \dots, L, \quad (11)$$

где  $\alpha'_s(f_k, \xi_n, d)$  — экспериментальное значение действительной части коэффициента ослабления поля ПЭМВ;  $\alpha'_t(f_k, \xi_n, d)$  — истинное (теоретическое) значение коэффициента ослабления поля ПЭМВ;  $n(f_k)$  — функция неопределенности измерения, которая представляет собой шум, воздействующий на  $k$ -измерение и обусловленный как инструментальными погрешностями измерительного комплекса и другими погрешностями при измерении коэффициента ослабления, так и достоверностью электродинамической модели измерения коэффициента ослабления ПЭМВ реальной физической ситуации;  $L$  — число частот, на которых проводятся измерения.

Ввиду множества случайных факторов, влияющих на  $k$ -измерение коэффициента ослабления, погрешность их измерения моделировалась аддитивным некоррелированным гауссовским шумом  $n(f_k)$  с нулевым математическим ожиданием  $m[n(f_k)] = 0$  и заданным уровнем дисперсии  $\sigma_k^2 = m[n^2(f_k)] = N_0 / 2$ ,  $N_0$  — представляет собой общую мощность шума, присутствующего в измерении.

Выбор модели гауссовского шума оправдывается тем, что различные источники неопределенностей довольно независимы, и, следовательно, их совместная функция плотности распределения вероятностей стремится к нормальному закону распределения, как следует из центральной предельной теоремы [24, 25]. Кроме того, анализ данных измерений коэффициентов ослабления  $\alpha'_s(f_k, \xi_n, d)$  на стандартных образцах материалов показал, что на реальном измерительном комплексе, структура которого будет рассмотрена далее, их распределение подчиняется нормальному закону. При этом уровень шума надо оценивать у каждого измерительного комплекса индивидуально, исходя из тех базовых элементов, из которых сформирована структура комплекса.

Учитывая модель измерения (11), для разработки алгоритма обработки результатов измерений коэффициентов ослабления ПЭМВ воспользуемся основным положением теории оценок о том, что вся информация о величине отслоения покрытия от подложки заключена в совместной плотности вероятности распределения результатов измерений коэффициента ослабления на нескольких частотах, которая достигает своего максимального значения (максимум совместной плотности распределения вероятности (МСПРВ)) на истинной (искомой) величине отслоения  $d$  в контролируемом покрытии. При этом средний квадрат ошибки  $\Delta_d = |\hat{d} - d|^2$  оценки величины отслоения  $d$  достигает минимального значения [24, 25].

Поскольку шум в (11) имеет нормальное распределение, функция плотности распределения вероятностей измеренной действительной части коэффициента ослабления  $p(\alpha'_s(f_k, \xi_n, d))$  на  $k$ -ой частоте представили как

$$p(\alpha'_s(f_k, \xi_n, d)) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp \left[ -\frac{|\alpha'_s(f_k, \xi_n, d) - \alpha'_t(f_k, \xi_n, d)|^2}{N_0} \right]. \quad (12)$$

Поскольку случайные выборки шума  $n(f_k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, L$  являются нормально распределенными и имеют плотность распределения вероятностей (12), совместную плотность распределения вероятностей для  $L$  измерений коэффициентов ослабления представим в следующем виде [25, 26]:

$$p(\mathbf{A}_s) = \left( \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \right)^L \exp \left[ -\frac{L|\mathbf{A}_s - \mathbf{A}_t|^2}{N_0} \right], \quad (13)$$

где  $\mathbf{A}_s$  и  $\mathbf{A}_t$  — вектор-столбцы с компонентами:

$$\mathbf{A}_s = [\dot{\alpha}_s(f_1, \xi_n, d), \dot{\alpha}_s(f_2, \xi_n, d), \dots, \dot{\alpha}_s(f_L, \xi_n, d)]^T,$$

$$\mathbf{A}_T = [\dot{\alpha}_T(f_1, \xi_n, d), \dot{\alpha}_T(f_2, \xi_n, d), \dots, \dot{\alpha}_T(f_L, \xi_n, d)]^T.$$

Функцию логарифмического правдоподобия экспериментального коэффициента ослабления  $\mathbf{A}_s$  для оценки МСПРВ при  $n$ -ой величине отслоения,  $n = 1, 2, \dots, N$ , определили, взяв натуральный логарифм от правой и левой части выражения (13):

$$L(\mathbf{A}_s; d_n) = -L \ln(\sqrt{\pi N_0}) - \frac{L}{N_0} |\mathbf{A}_s - \mathbf{A}_T|^2. \quad (14)$$

МСПРВ (13) достигает максимума при величине отслоения  $\hat{d}$ , которое обеспечивает максимум логарифмической функции правдоподобия (14). Поскольку первое слагаемое логарифмической функции правдоподобия (14) не зависит от величины отслоения, достаточно максимизировать только ее второй член. Исходя из этого, функционал для оценки МСПРВ представили в виде:

$$\hat{d} = \arg \min_{d_n} \{Z(d_n)\}, \quad (15)$$

где

$$Z(d_n) = \frac{1}{L} |\mathbf{A}_s - \mathbf{A}_T|^2. \quad (16)$$

Значение функционала (16) представляет собой квадрат евклидова расстояния между экспериментальными и теоретическими коэффициентами ослабления. Таким образом, фактически осуществляется поиск величины отслоения  $\hat{d}$ , которое минимизирует это расстояние. Поиск проводится численно в заданном диапазоне изменения величин отслоений, требующихся на практике. Численная оптимизация осуществлялась с помощью генетического алгоритма, реализованного в виде функции «ga» приложения Global Search пакета Matlab.

Поскольку оценка МСПРВ основана на минимизации евклидова расстояния между экспериментальными и теоретическими значениями коэффициентов ослабления, наибольшая погрешность оценки величины отслоения  $\hat{d}$  будет наблюдаться в том случае, если коэффициенты ослабления, соответствующие двум разным величинам отслоений  $d_1$  и  $d_2$ , имеют близкие значения на частотах  $f_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, L$ . В этом случае становится труднее оценить различие между двумя близкими величинами отслоений. Чтобы уменьшить эту неопределенность, количество частот и ширину полосы частот измерений необходимо выбирать такими, чтобы коэффициенты ослабления, соответствующие разным величинам отслоений, максимально отличались друг от друга. Исходя из этого, набор и количество частот, который обеспечивает максимальную точность оценки величины отслоения, следует выбирать в соответствии с правилом:

$$\langle F \rangle = \arg \max_f \{Y\}, \quad (17)$$

где

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_L\},$$

$$Y = \frac{1}{LN} \sum_{k=1}^L \sum_{n=1, r=1}^N |\alpha'_T(f_k, \xi_n, d_n) - \alpha'_T(f_k, \xi_n, d_r)|^2.$$

Оптимизация (17) может быть выполнена методом, аналогичным оптимизации функционала (15).

Таким образом, алгоритм для оценки величины отслоения покрытия  $\hat{d}$ , на основе поиска МСПРВ, для ДП и МДП включает следующую последовательность действий:

1. Определение диапазона возможных значений отслоений  $d \in \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ .
2. Оптимизация набора частот и ширины полосы частот на основе (17).
3. Измерение вектора экспериментальных коэффициентов ослабления  $\mathbf{A}_s$ .
4. Минимизация функционала (16) с учетом всех возможных величин отслоений. За истинную величину отслоения  $\hat{d}$  принимают ту, которая обеспечивает минимум функционала (16).

## ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКОГО ПРЕДЕЛА РАЗРЕШЕНИЯ ОТСЛОЕНИЯ

Введем понятие о предельном разрешении по величине отслоения покрытия  $\varpi = d_1 - d_2$ , т.е. о минимальной разности двух величин отслоений, которая может быть выявлена представленным методом. Введение данного понятия позволяет оценить метод в возможности различения двух близких величин отслоений  $d_1$  и  $d_2$ , что очень важно для практического применения. Оценка статистического предела разрешения обеспечивает необходимую исходную информацию для выбора ширины полосы частот измерений и их количества для оценки отслоения.

Следует отметить, что такой предел разрешения ранее не рассматривался для ПЭМВ, при использовании их для оценки величины дефектов и отслоения в частности.

Так как шум имеет нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием, среднее значение оценки величины отслоения и предел его статистического разрешения, а также их СКО, являются функциями уровня шума. Среднее значение отслоения  $\hat{d}$  будет группироваться вокруг истинного значения отслоения  $d$  в интервале, определяемым СКО. При этом вероятность того, что среднее значение оценки отслоения  $\hat{d}$  действительно находится в окрестностях своего истинного значения  $d$ , напрямую связана с тем, как определяется эта окрестность.

Предел статистического разрешения, который вводится в данной статье, основан на определении этой окрестности в зависимости от среднего квадрата ошибки определения величины отслоения  $\Delta_d = |\hat{d} - d|^2$ , которую обеспечивает функционал оценки МСПРВ (16) и доверительной вероятности.

Среднее значение  $\Delta_d$  по всем возможным расслоениям  $d \in \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$  представим как

$$\Delta_d = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\hat{d}_n - d_n|^2, \quad (18)$$

где  $\hat{d}_n$  —  $n$ -величина отслоения полученная при минимизации функционала МСПРВ (16).

Предел статистического разрешения  $\varpi$  для полученной оценки  $\Delta_d$  с учетом заданной доверительной вероятности  $p$ ,  $0 \leq p \leq 1$ :

$$\varpi = 2\zeta\sqrt{\Delta_d}, \quad (19)$$

при этом  $\zeta$  определяется путем решения уравнения

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x-\zeta}^{x+\zeta} e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \quad (20)$$

где  $p$  — вероятность того, что средняя величина отслоения  $\hat{d}$  лежит в пределах разрешения, около истинной величины отслоения  $d$ ,  $x$  — стандартизированное значение  $\Delta_d$ .

Предел статистического разрешения в (19) определяется, исходя из предположения, что средний квадрат ошибки  $1/N \sum_{n=1}^N |\hat{d}_n - d_n|^2$  подчиняется нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием и с СКО, равным  $\sqrt{\Delta_d}$ . Это предположение оправдано, поскольку шум подчиняется нормальному закону распределения.

Таким образом, фактически предел статистического разрешения, определяемый по выражению (19), является доверительным интервалом оценки величины отслоения, полученной при измерении. Исходя из этого, уменьшая  $\Delta_d$  или доверительную вероятность, можно получить более высокие величины разрешения. Естественно, на практике требуются доверительные вероятности 0,95 и более.

## МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Измерительный комплекс для реализации оценки величины отслоения реализован на основе векторного анализатора электрических цепей (ВАЦ) Anritsu 37347A. На рис. 3 представлена структурная схема и фотография измерительного комплекса, где цифрами обозначено: 1 — векторный анализатор электрических цепей; 2 — приемная антенна с механизмом перемещения; 3; 4 — электронная вычислительная машина; 5 — антенна возбуждения ПЭМВ; 6 — металлическая поверхность; 7 — ДП или МДП с отслоением  $d$ ; 8 — отслоение покрытия.

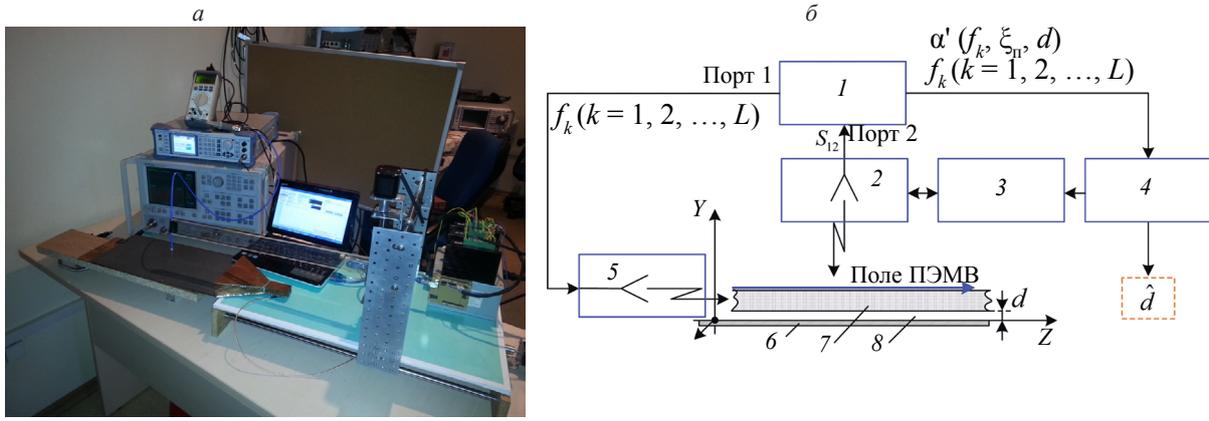


Рис. 3. Фотография (а) и структурная схема (б) измерительного комплекса, реализующего метод оценки отслоения.

Использование ВАЦ позволило отказаться от отдельного генератора и блока детектирования. Для этого первый порт ВАЦ подключен к антенне возбуждения ПЭМВ, а второй порт подключен к приемной антенне. Оценку коэффициента ослабления ПЭМВ проводили по измеренным коэффициентам передачи  $S_{12}$  по формуле:

$$\alpha'(f_k, \xi_n, d) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{s} \ln \left[ \frac{S_{12j}}{S_{12j+1}} \right], \quad (21)$$

где  $s$  — шаг между точками измерений, который составлял 0,5 мм;  $n$  — количество точек измерения (экспериментальные исследования показали, что для приемлемой точности оценок коэффициента ослабления необходимо  $n = 4—5$  точек измерения над поверхностью).

Использование ВАЦ позволило осуществить измерения коэффициента ослабления одновременно на всех заданных частотах  $f_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, L$ , что позволило значительно сократить время проведения измерений.

Для определения СКО уровня шума в измерительных данных, полученных с помощью измерительного комплекса, оценивали закон распределения экспериментальных значений  $\alpha'_s(f_k, \xi_n, d)$  коэффициентов ослабления поля на стандартном образце полиметилметакрилата толщиной 1 мм ( $\epsilon = 2,7$ ) и образце материала с более высоким значением диэлектрической проницаемости — RO3010 (производитель Rogers Corporation, USA) ( $\epsilon = 11,2$ ). Диапазон частот измерений составил 9—13,5 ГГц с дискретным шагом по частоте 0,5 ГГц (количество частот  $L=10$ ). На каждой частоте формировали выборку из 300 значений  $\alpha'_s(f_k, \xi_n, d)$ . Расчетные оценки показали, что плотность распределения вероятностей коэффициентов ослабления поля  $p[\alpha'_s(f_k, \xi_n, d)]$  для стандартного образца полиметилметакрилата подчиняется нормальному закону распределения с СКО  $\sigma(\alpha'_s(f_k, \xi_n, d)) = 0,0015 \dots 0,0018$ . Плотность распределения вероятностей для образца RO3010 также подчиняется нормальному закону (6) с СКО  $\sigma(\alpha'_s(f_k, \xi_n, d)) = 0,0014 \dots 0,0017$ .

В качестве материала для численных исследований выбрали образец реального РПП с ЭФП, приведенными в [17]. Комплексная диэлектрическая проницаемость данного образца в диапазоне частот от 9 до 18 ГГц почти постоянная  $\epsilon' = 20,45$ , а  $\epsilon'' = 0,73$ . Дисперсия комплексной магнитной проницаемости РПП описывается зависимостями [17]:

$$\epsilon'(f_k) = 1,56 \exp(-3,867 \cdot 10^{-11} f_k); \quad \epsilon''(f_k) = 1,299 \exp(-4,659 \cdot 10^{-11} f_k).$$

В качестве материалов для экспериментального исследования использовали следующие диэлектрики: полутвердая резина ( $\epsilon' = 7,1$ , дисперсию мнимой части диэлектрической проницаемости аппроксимировали зависимостью  $\epsilon''(f_k) = -1,607 \cdot 10^{-31} \cdot (f_k)^3 + 7,766 \cdot 10^{-21} \cdot (f_k)^2 - 1,395 \cdot 10^{-10} f_k + 1,103$ ) толщиной 2 мм и СВЧ-материал RO3010 (компания Rogers Corporation, USA) толщиной 1,2 мм (частотные дисперсии действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости RO3010 аппроксимировали зависимостями [26]):

$$\begin{aligned} \epsilon'(f_k) &= 10,22 \exp(-1,773 \cdot 10^{-13} f_k) + 1,2 \cdot 10^{-7} \exp(6,947 \cdot 10^{-10} f_k), \\ \epsilon''(f_k) &= 0,02633 \exp(-1,181 \cdot 10^{-11} f_k) - 0,01827 \exp(-2,954 f_k). \end{aligned}$$

Наличие отслоений в покрытии моделировали размещением нескольких плоскопараллельных концевых мер длины (ПКМД) между металлическим основанием и слоем соответствующего покрытия. Использовали ПКМД 1-Н10 1 класса точности. В наборе 20 ПКМД от 0,1 до 0,2 мм с шагом 0,01 мм.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОЦЕНКЕ ПРЕДЕЛА СТАТИСТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ОТСЛОЕНИЯ

Моделирование осуществлялось для образца РПП толщиной 1 мм, с ЭФП описанными выше, при величине отслоений от 0 до 0,5 мм с шагом 0,01 мм.

Частотные зависимости теоретических значений действительной  $\alpha'_T(f_k, \xi_{\text{п}}, d)$  и мнимой  $\alpha''_T(f_k, \xi_{\text{п}}, d)$  частей коэффициента ослабления исследуемого РПП для величин отслоений от 0 до 0,5 мм, в полосе частот измерений  $\Delta f = 9\text{--}13,5$  ГГц, на основе электродинамической модели (10) приведены на рис. 4.

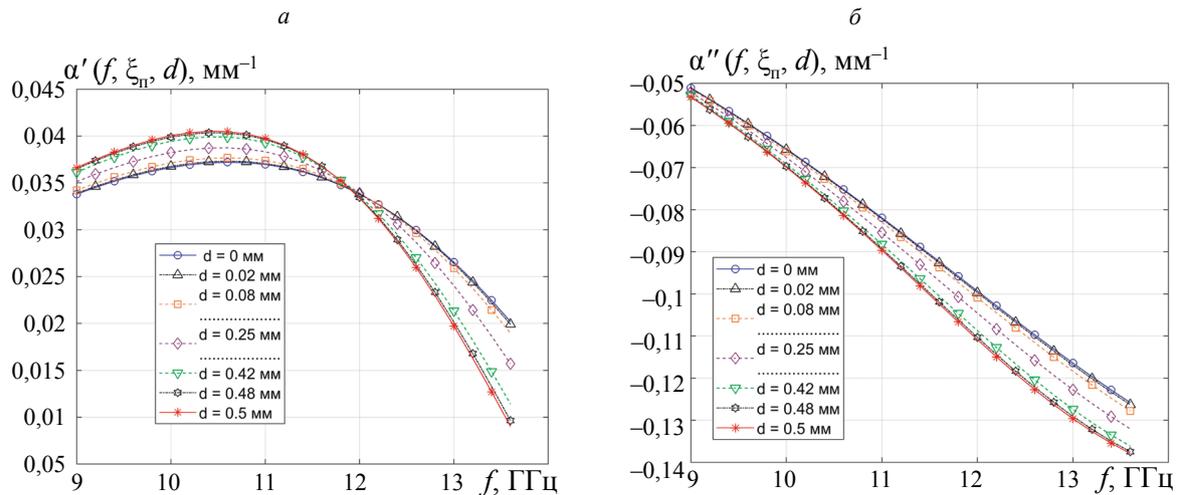


Рис. 4. Частотные зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей комплексного коэффициента ослабления исследуемого РПП для отслоений от 0 до 0,5 мм.

Для моделирования экспериментальных коэффициентов ослабления  $\alpha'_\Delta(f_k, \xi_{\text{п}}, d)$  к теоретическим значениям  $\alpha'_T(f_k, \xi_{\text{п}}, d)$  на основе модели (11) был добавлен аддитивный некоррелированный гауссовский шум с известной мощностью  $N_0$ . Фактически значения шума представляли в виде значений СКО  $\sigma(\alpha'_T(f_k, \xi_{\text{п}}, d)) = \sqrt{N_0/2}$  коэффициентов ослабления.

Для получения результатов оценки отслоения в общем виде отношение сигнал/шум (ОСШ) представили в дБ:

$$\text{ОСШ}_{\text{дБ}} = 10 \lg \left( \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L |\alpha'_T(f_k, \xi_{\text{п}}, d)|^2 / \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L |\alpha'_\Delta(f_k, \xi_{\text{п}}, d)|^2 \right). \quad (22)$$

На рис. 5а представлены зависимости среднего квадрата ошибки  $\Delta_d$  оценки отслоения в РПП при возрастании значений ОСШ при измерениях 10 частотах, для трех значений полосы частот измерений:  $\Delta f_1 = 9\text{--}10,8$  ГГц ( $f_{k+1} - f_k = 200$  МГц),  $\Delta f_2 = 9\text{--}12,15$  ГГц ( $f_{k+1} - f_k = 350$  МГц) и  $\Delta f_3 = 9\text{--}13,5$  ГГц ( $f_{k+1} - f_k = 500$  МГц). На рисунке 5б представлены зависимости среднего квадрата ошибки  $\Delta_d$  при возрастании значений ОСШ при фиксированной полосе частот измерений  $\Delta f = 9\text{--}13,5$  ГГц, для трех значений количества частот измерений:  $L_1 = 5$ ,  $L_2 = 10$ ,  $L_3 = 19$ .

Анализ зависимостей рис. 5 показывает очевидный результат, что средний квадрат ошибки  $\Delta_d$  оценки величины отслоения уменьшается при возрастании ОСШ, увеличении ширины  $\Delta f$  полосы частот измерений и их количества. При этом уменьшение  $\Delta_d$  за счет увеличения ширины полосы частот измерений достигается быстрее, чем при увеличении количества частот.

Проведенные численные эксперименты показали, что при ширине полосы частот  $\Delta f = 9\text{--}13,5$  ГГц предельный прирост повышения точности обеспечивается при измерениях на 19 частотах.

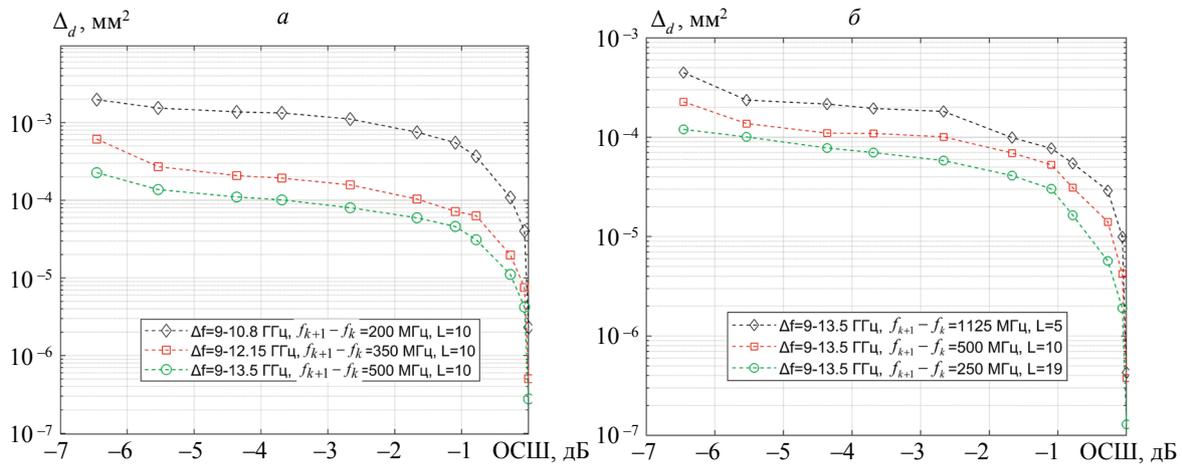


Рис. 5. Зависимости среднего квадрата ошибки  $\Delta_d$  оценки отсложения в РПП при возрастании значений ОСШ при возрастании ширины полосы частот измерений (а) и при возрастании количества частот измерений (б).

На основании полученных зависимостей оценки  $\Delta_d$  оценивали статистический предел разрешения  $\varpi$  как функцию от значений доверительной вероятности. На рис. 6 приведены зависимости предела разрешения для ОСШ  $-0,27$  и  $-2,67$  дБ для диапазона  $9-13,5$  ГГц при измерениях на  $L=19$  частотах.

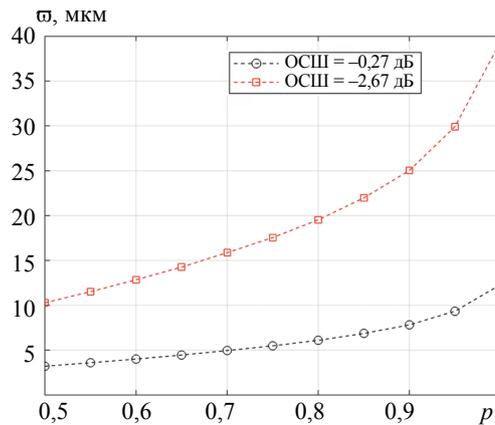


Рис. 6. Зависимость предела разрешения от доверительной вероятности.

Анализ зависимостей рис. 6 показывает, что с увеличением ОСШ разрешение увеличивается для всех значений доверительной вероятности. Это в основном связано с тем, что  $\Delta_d$  монотонно уменьшается при возрастании ОСШ (см. рис. 5). Анализ зависимостей рис. 6 показывает, что при доверительной вероятности  $0,95$  минимально достижимые уровни разрешения составляют около  $9$  и  $30$   $\mu\text{м}$  при ОСШ  $-0,27$  и  $-2,67$  дБ соответственно.

Таким образом, оценка МСПРВ при ОСШ  $-2,67$  дБ с доверительной вероятностью  $0,95$  не будет чувствительна к изменению отсложения с шагом менее, чем  $30$   $\mu\text{м}$ . Если требуется уменьшить разрешение менее  $30$   $\mu\text{м}$ , необходимо увеличить ОСШ в системе. Например, из анализа графиков рис. 4 следует, что увеличение ОСШ в  $13$  раз до  $-2,67$  дБ обеспечивает разрешение около  $9$   $\mu\text{м}$  с доверительной вероятностью  $0,95$ .

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОЦЕНКЕ ПРЕДЕЛА СТАТИСТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ОТСЛОЕНИЯ

Покрyтия на основе полутвердой резины и RO3010 были исследованы при возрастающих значениях величины отсложения  $d = 0,2-0,3$  мм. С целью уменьшения случайных погрешностей из-

мерений (особенно погрешности установки заданной величины отслоения с помощью ПКМД), измерения проводились для 5 образцов каждого типа покрытия. После этого проводили усреднение результатов измерений. Кроме того, перед проведением измерений с новой величиной отслоения проводили калибровку векторного анализатора цепей.

Оценку величин отслоения проводили, как и в численном эксперименте, при возрастании количества частот измерений ( $L=5, L=10, L=19$ ), при фиксированной ширине полосы частот ( $\Delta f=9-13,5$  ГГц) и при фиксированном количестве частот ( $L=10$ ), при увеличении ширины полосы частот ( $\Delta f_1=9-10,8$  ГГц,  $\Delta f_2=9-12,5$  ГГц,  $\Delta f_3=9-13,5$  ГГц).

После оценки экспериментальных значений коэффициентов ослабления (21) производили оценку величины отслоения  $d$  на основе разработанного алгоритма и оценивали относительную погрешность его оценки путем сопоставления со значением отслоения, обеспечивающегося заданным номиналом ПКМД  $\delta d = |\hat{d} - d_{\text{ПКМД}}| / d_{\text{ПКМД}} \cdot 100 \%$ .

В качестве примера на рис. 7а приведена экспериментальная частотная зависимость коэффициента ослабления от частоты покрытия RO3010 без отслоения и для величины отслоения 0,2 мм. Для каждого набора коэффициентов ослабления алгоритм оценки МСПРВ выбирает отслоение, которое соответствует минимуму функционала (16). В качестве примера на рис. 7б показано, как при этом выглядит зависимость функционала (16) от величины отслоения.

Проведенные исследования показали, что при измерениях в полосе частот ( $\Delta f=9-13,5$  ГГц) при возрастании количества частот измерений получили для покрытия RO3010 следующие относительные погрешности оценки отслоений: при  $L=19, \delta d = 5 \%$ ; при  $L=10, \delta d \approx 10,1 \%$ ; при  $L=5, \delta d \approx 19 \%$ . Таким образом, экспериментальные средние разрешения по величине отслоения получили следующие: 20, 50 и 80 мкм, для  $L = 19, L = 10$  и  $L = 5$  соответственно. Для образца полутвердой резины погрешности оценки отслоения несколько выше (при  $L = 19, \delta d \approx 5,5 \%$ ; при  $L = 10, \delta d \approx 11 \%$ ; при  $L = 5, \delta d \approx 21 \%$ ), что связано с меньшим значением ее диэлектрической проницаемости по сравнению с RO3010.

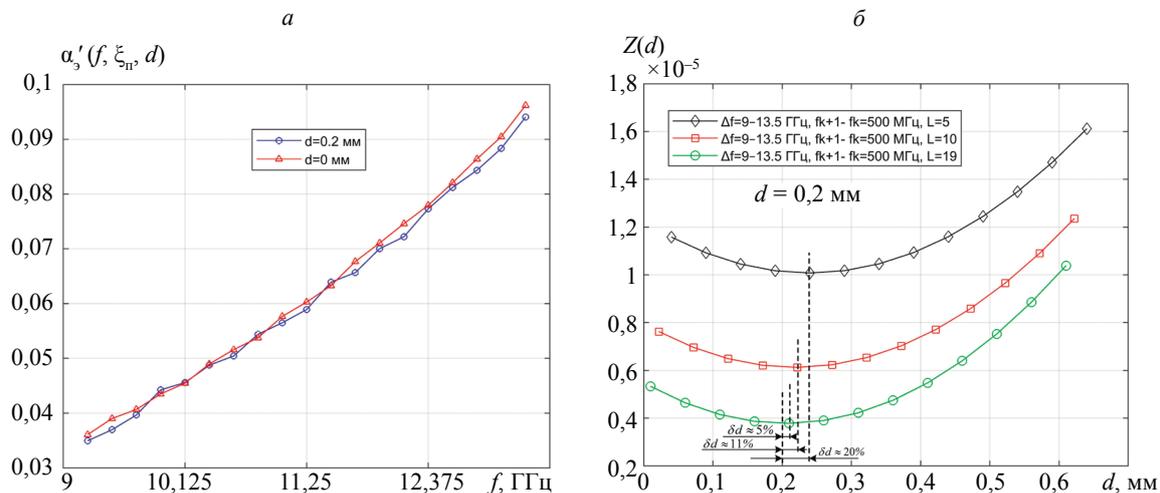


Рис. 7. Частотная зависимость коэффициента ослабления от частоты для отслоения  $d = 0,2$  мм (а) и соответствующий вид функционала оценки МСПРВ (б).

При фиксированном количестве частот измерений  $L = 10$  при возрастании ширины полосы частот измерений, получили для покрытия RO3010 следующие относительные погрешности оценки отслоений: при  $\Delta f_1=9-13,5$  ГГц,  $\delta d \approx 10 \%$ ; при  $\Delta f_2=9-12,5$  ГГц,  $\delta d \approx 13 \%$ ; при  $\Delta f_3=9-10,8$  ГГц,  $\delta d \approx 25 \%$ . Таким образом, экспериментальные средние разрешения по величине отслоения получили следующие: 50, 60 и 90 мкм соответственно.

Увеличение количества частот с 16 до 19 не приводит к существенному улучшению оценки величины отслоения. Таким образом, величина разрешения при измерениях коэффициента ослабления на 18—19 частотах в полосе частот  $\Delta f=9-13,5$  ГГц является предельным экспериментальным значением.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Многочастотное измерение коэффициента ослабления поверхностной электромагнитной волны в полосе частот с учетом частотной дисперсии электрофизических параметров покрытия позволяет производить высокоточную оценку величины его отслоения от металлического основания.

2. Для учета неопределенностей при измерениях коэффициентов ослабления поверхностной электромагнитной волны разработан алгоритм оценки величины отслоения диэлектрических и магнетодиэлектрических покрытий  $\hat{d}$  на основе поиска максимума совместной плотности распределения вероятности, позволяющий оценить нижний предел среднего квадрата ошибки  $\Delta_d$  оценки отслоения. Введено понятие о предельном разрешении по величине отслоения покрытия, что позволяет оценить метод в возможности различении двух близких величин отслоений.

3. Приведена структура измерительного комплекса на основе векторного анализатора электрических цепей, реализующего предложенные подходы оценки отслоения. Экспериментальные исследования показали принципиальную возможность обеспечить значения регистрируемых величин отслоений покрытий 20 мкм и менее при измерениях в полосе частот  $\Delta f = 9\text{—}13,5$  ГГц. Для повышения точности оценки следует увеличивать ширину полосы частот измерений и уменьшать мощность шума (повышать точность оценки коэффициентов ослабления).

Работа выполнена в ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж) в рамках подготовки диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук в докторантуре ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж). Казьмин А.И. хотел бы поблагодарить своего научного консультанта докторантуры доктора технических наук, профессора Федюнина Павла Александровича за помощь.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лагарьков А.Н., Федоренко А.И., Кисель В.Н. и др. Актуальные задачи стелс-технологии [Электронный ресурс] / Ин-т теоретической и прикладной электродинамики РАН: офиц. сайт. URL: [http://www.itae.ru/science/topics/№4%20\(стелс\).pdf](http://www.itae.ru/science/topics/№4%20(стелс).pdf) (дата обращения: 19.06.2020).
2. Лагарьков А.Н., Погосян М.А. Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий // Вестник РАН. 2003. Т. 73. № 9. С. 779—787.
3. Федюнин П. А., Казьмин А.И. Способы радиоволнового контроля параметров защитных покрытий авиационной техники. М.: Физматлит, 2013. 190 с.
4. Андреев М.В., Борулько В.Ф., Дробахин О.О. О реализации метода квазиразрешений при определении параметров слоев диэлектрических слоистых структур // Дефектоскопия. 1997. № 3. С. 39—53.
5. Андреев М.В., Борулько В.Ф., Дробахин О.О. Экспериментальные исследования метода квазиразрешений при определении параметров слоев диэлектрических слоистых структур // Дефектоскопия. 1997. № 4. С. 70—78.
6. Антропов О.С., Дробахин О.О. Повышение разрешающей способности метода фурье-преобразования коэффициента отражения путем экстраполяции спектра на основе принципа минимума длительности // Дефектоскопия. 2009. № 5. С. 72—80.
7. Lagarkov A.N., Matytsin S.M., Rozanov K.N., Sarychev A.K. Dielectric properties of fiber-filled composites // Journal of Applied Physics. 1998. V. 84. № 7. P. 3806—3814. doi: 10.1063/1.368559
8. Alekseev O. Yu., Borisov V.S., Davidovich M.V., Popova N.F. Waveguide Probe Structures for a Multilayer Magnetodielectric: An Inverse Problem // Journal of Communications Technology and Electronics. 2006. V. 51. No. 11. P. 1240—1247. doi: 10.1134/S1064226906110052
9. Гринев А.Ю., Темченко В.С., Багно Д.В. Радары подповерхностного зондирования. Мониторинг и диагностика сред и объектов. М.: Радиотехника, 2013. 391 с.
10. Конева В.Л., Михнев В.А. Многопараметровая диагностика листовых диэлектриков в открытых направляющих структурах // Дефектоскопия. 1992. № 12. С. 71—74.
11. Mikhnev V.A., Nyfors E., Vainkainen P. Reconstruction of the permittivity profile using a nonlinear guided wave technique // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Sep 1997. V. 45, No. 9. P. 1405—1410. doi: <https://doi.org/10.1109/8.623130>
12. Михнев В.А. Реконструкция профиля распределения диэлектрической проницаемости листовых материалов методом направляемых волн // Дефектоскопия. 1996. № 4. С. 56—62.
13. Baker-Jarvis J., Jones C., Riddle B., Janezic M., Geyer R.G., Grosvenor Jr. J.H., Weil C.M. Dielectric and Magnetic Measurements: A Survey of Nondestructive, Quasi-Nondestructive, and Process-Control Techniques // Journal of Research in Nondestructive Evaluation. 1995. V. 7. Is. 2—3. P. 117—136. doi: <https://doi.org/10.1080/09349849509409572>

14. *Ou Weiming, Gardner C.G., Long S.A.* Nondestructive Measurement of a Dielectric Layer Using Surface Electromagnetic Waves // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Mar 1983. V. 31 (3). P. 255—261. doi: 10.1109/TMTT.1983.1131472

15. *Казьмин А.И., Федюнин П.А.* Восстановление структуры электрофизических параметров многослойных диэлектрических материалов и покрытий по частотной зависимости коэффициента ослабления поля поверхностной электромагнитной волны // *Измерительная техника*. 2019. № 9. С. 39—45. doi: 10.32446/0368-1025it.2019-9-39-45

16. *Казьмин А.И., Федюнин П.А.* Контроль дефектов в многослойных диэлектрических материалах СВЧ-методом // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2020. Т. 86. № 2. С. 37—43. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-2-37-43>

17. *Ufimtsev P.Ya., Ling R.T.* New Results for the Properties of TE Surface Waves in Absorbing Layers // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Oct 2001. V. 49, Iss. 10. P. 1445—1452. doi: 10.1109/8.954933

18. *Уолтер К.* Антенны бегущей волны / Пер. с англ. Под общ. ред. А.Ф. Чаплина. М.: Энергия, 1970. 448 с.

19. *Patrovsky Andreas, Wu Ke.* Dielectric Slab Mode Antenna for Integrated Millimeter-wave Transceiver Front-ends // *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2013. № 1 (3). P. 87—93. doi: 10.13189/ujeee.2013.010305

20. *Valerio Guido, Jackson David R., Galli Alessandro.* Fundamental properties of surface waves in lossless stratified structures // *Proceedings of the Royal Society*. March 2010. V. 466. P. 2447—2469. doi: [10.1098/rspa.2009.0664](https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0664)

21. *FrezzaFabrizio, Tedeschi Nicola.* Electromagnetic inhomogeneous waves at planar boundaries: tutorial // *Journal of the Optical Society of America A*. Mar 2015. V. 32, No 8. P. 1485—1501. doi: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.32.001485>

22. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.

23. *Chen Zhuozhu, Shen Zhongxiang.* Surface Waves Propagating on Grounded Anisotropic Dielectric Slab // *Applied Sciences*. 2018. No 8 (1), P. 102. doi: 10.3390/app8010102

24. *Тихонов В.И., Бакаев Ю.Н.* Статистическая теория радиотехнических устройств. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1978. 419 с.

25. *Kay S.M.* Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1998. 348 p.

26. Data Sheet RO3000® Series Circuit Materials RO3003™, RO3006™, RO3010™ and RO3035™ High Frequency Laminates / <https://www.rogerscorp.com/>