

Оценка статистического предела разрешения отслоения радиопоглощающих покрытий методом поверхностных электромагнитных волн путем имитационного моделирования

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

П. А. Федюнин, email: fpa1@yandex.ru

Д.А. Рябов

В.А. Манин, email: fanni.05@mail.ru

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

***Аннотация.** Представлены результаты исследования, подтверждающие высокую эффективность применения поверхностных электромагнитных волн СВЧ диапазона для оценки величины отслоения радиопоглощающих покрытий от металлического основания. Обоснован и введен статистический предел разрешения двух величин отслоений радиопоглощающего покрытия от металлического основания, что позволяет оценить возможность различения двух близких величин отслоений в зависимости от ширины полосы частот измерений, их количества и отношения «сигнал–шум».*

***Ключевые слова:** радиопоглощающее покрытие, метод поверхностных электромагнитных волн, отслоение, статистический предел разрешения отслоения, имитационная модель*

Введение

Радиопоглощающие покрытия (РПП) применяются для снижения радиолокационной заметности (РЛЗ) современных образцов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) [1,2]. При этом снижение РЛЗ образцов ВВСТ различными способами и с помощью РПП, в частности, представляет собой комплексную проблему государственного уровня [1,2].

Эффективно реализовать свойства современных РПП 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 РПП 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.

В [3] показано, что повышение эффективности контроля ЭФП и оценки дефектов РПП возможно путем применения многочастотного метода поверхностных электромагнитных волн (ПЭМВ). В качестве информативного параметра 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 $\dot{\alpha}(f, \xi_n, \xi_d)$.

1. Электродинамическая модель оценки величины отслоения РПП от металлического основания

На рис. 1 приведена геометрия однослойного РПП 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 .

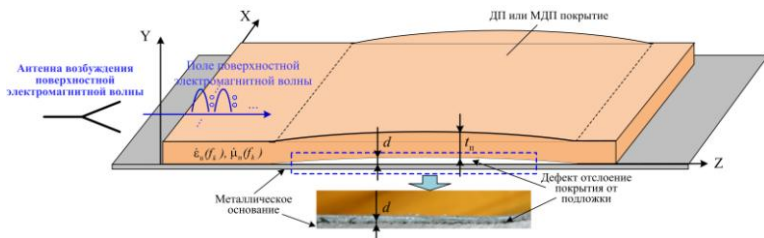


Рис. 1. Геометрия однослойного РПП при отслоении его от металлической подложки

Так как рассматривается однослойное РПП с диэлектрическими и магнитными потерями, вектор ЭФП покрытия представим пятикомпонентным $\xi_n = \varepsilon'_n(f_k), \varepsilon''_n(f_k), \mu'_n(f_k), \mu''_n(f_k), t_n$, где $\varepsilon'_n(f_k), \mu'_n(f_k)$ действительные и $\varepsilon''_n(f_k), \mu''_n(f_k)$ мнимые части

диэлектрической и магнитной 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 $\dot{\alpha}(f, \xi_n, d)$.

Мнимую часть коэффициента ослабления включим в целевую функцию в виде дополнительного параметра оптимизации. С учетом этого, выражение для целевой функции, обеспечивающей оценку отслоения РПП, представим в следующем виде:

$$\hat{d} = \arg \min_{d \in d_{\text{доп}}} \rho(d, \alpha''(f, \xi_n, d)) = \sum_{k=1}^L \left| \dot{\alpha}'_3(f_k, \xi_n, d) - \dot{\alpha}'_T(f_k, \xi_n, d) \right|^2, \quad (1)$$

где $\rho(\xi_d)$ – расстояние между экспериментально полученными $\dot{\alpha}'_3(f_k, \xi_n, \xi_d)$ и вычисленными теоретическими значениями $\dot{\alpha}'_T(f, \xi_n, \xi_d)$ коэффициентов ослабления поля ПЭМВ в области допустимых значений $\xi \in \xi_{\text{доп}}$.

Теоретические значения коэффициента ослабления $\dot{\alpha}(f, \xi_n, d)$ ПЭМВ рассматриваемого двухслойного покрытия «отслоение-покрытие» получали путем решения дисперсионного уравнения по известному вектору ЭФП ξ_n и пробным значениям величин отслоений d на частотах $f_k, k = 1, 2, \dots, L$ [3]:

$$D \dot{\alpha}(f, \xi_n, d); f_k = 0, \quad (2)$$

2. Оценка статистического предела разрешения отслоения

Экспериментальные значения действительной части коэффициента ослабления ПЭМВ $\alpha'_3(f, \xi_n, d)$, как функции частоты и величины отслоения d , наблюдаются в эксперименте при наличии аддитивных случайных помех, и были представлены в виде [3]:

$$\alpha'_3(f_k, \xi_n, d) = \alpha'_T(f_k, \xi_n, d) + n(f_k); \quad k = 1, 2, \dots, L, \quad (3)$$

где $\alpha'_3(f, \xi_n, d)$ – экспериментальное значение действительной части коэффициента ослабления поля ПЭМВ, $\alpha'_T(f, \xi_n, d)$ – 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.

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 $\Delta_d = \int \hat{d} - d \int^2$ оценки величины отслоения d достигает минимального значения [3].

Функционал для оценки МСПРВ представили в виде [3]:

$$\hat{d} = \arg \min_{d_n} Z(d_n), \quad (4)$$

где

$$Z(d_n) = \frac{1}{L} |\mathbf{A}_s - \mathbf{A}_r|^2. \quad (5)$$

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.

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 $\Delta_d = \int \hat{d} - d \int^2$, которую обеспечивает функционал оценки МСПРВ (4) и доверительной вероятности.

Среднее значение Δ_d по всем возможным расслоениям $d \in d_1, d_2, \dots, d_N$ представим следующим образом:

$$\Delta_d = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\hat{d}_n - d_n|^2, \quad (6)$$

где \hat{d}_n – n-величина отслоения полученная при минимизации функционала МСПРВ (4).

Предел статистического разрешения ϖ для полученной оценки Δ_d с учетом заданной доверительной вероятности p , $0 \leq p \leq 1$ представим в следующем виде:

$$\varpi = 2\zeta \sqrt{\Delta_d}, \quad (7)$$

при этом ζ определяется путем решения уравнения

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x-\zeta}^{x+\zeta} e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \quad (8)$$

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

Предел статистического разрешения в (7) 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.

3. Реализация электродинамической модели в системе Matlab

Значение функционала (4) представляет собой квадрат евклидова расстояния между экспериментальными и теоретическими коэффициентами ослабления. Численная оптимизация осуществлялась с помощью генетического алгоритма, реализованного в виде функции «ga» приложения Global Search пакета Matlab. Проведенные исследования позволили оптимальным образом подобрать параметры генетического алгоритма, обеспечивающие гарантированное нахождение глобального минимума целевой функции (4). Основные из них следующие: размер популяции: 5000, вероятность скрещивания 90 %, вероятность мутации 10 %. Среднее время минимизации целевой

функции (4) составляет не более 1,5–2 минуты на компьютере с процессором типа intel core i5, с тактовой частотой 2,33 ГГц и 4 Гбайт оперативной памяти.

4. Результаты численных экспериментов по оценке статистического предела разрешения

В качестве материала для численных исследований выбрали образец реального РПП с ЭФП, приведенными в [4]. Комплексная диэлектрическая проницаемость данного образца в диапазоне частот от 9 до 18 ГГц почти постоянная $\varepsilon' = 20,45$, а $\varepsilon'' = 0,73$. Дисперсия комплексной магнитной проницаемости РПП описывается зависимостями [4]

$$\begin{aligned} \mu'(f_k) &= 1,56 \exp(-3.867 \cdot 10^{-11} f_k); \\ \mu''(f_k) &= 1,299 \exp(-4.659 \cdot 10^{-11} f_k) \end{aligned} \quad (9)$$

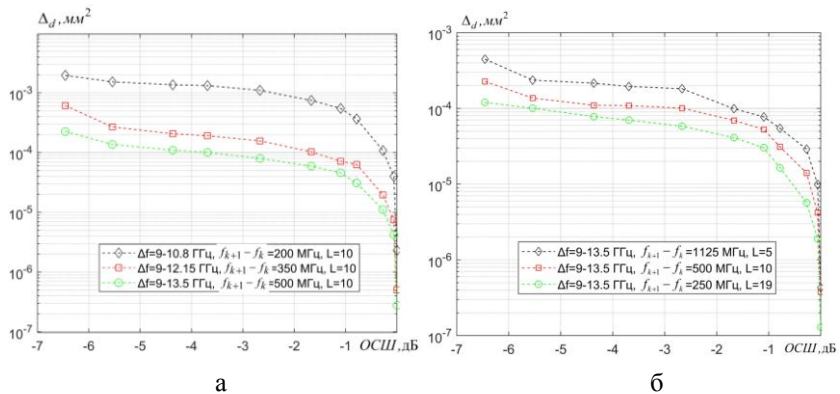
Моделирование осуществлялось для образца РПП толщиной 1 мм, с ЭФП описанными выше, при величине отслоений от 0 до 0,5 мм с шагом 0,01 мм.

Для моделирования экспериментальных коэффициентов ослабления $\alpha'_s(f, \xi_n, d)$ к теоретическим значениям $\alpha'_t(f_k, \xi_n, d)$, на основе модели (3), был добавлен аддитивный некоррелированный гауссовский шум с известной мощностью N_0 . Фактически значения шума представляли в виде значений СКО $\sigma(\alpha'_t(f_k, \xi_n, d)) = \sqrt{N_0 / 2}$ коэффициентов ослабления.

На рис. 2а представлены зависимости среднего квадрата ошибки Δ_d оценки отслоения в РПП при возрастании значений ОСШ, при измерениях 10 частотах, для трех значений полосы частот измерений: $\Delta f_1 = 9 - 10,8 \text{ ГГц}$, $\Delta f_2 = 9 - 12,15 \text{ ГГц}$ и $\Delta f_3 = 9 - 13,5 \text{ ГГц}$. На рисунке 2б представлены зависимости среднего квадрата ошибки Δ_d при возрастании значений ОСШ, при фиксированной полосе частот измерений $\Delta f = 9 - 13,5 \text{ ГГц}$, для трех значений количества частот измерений: $L_1 = 5$, $L_2 = 10$, $L_3 = 19$.

Анализ зависимостей рис. 2 показывает очевидный результат, что средний квадрат ошибки Δ_d оценки величины отслоения уменьшается при возрастании ОСШ, увеличения ширины Δf полосы частот измерений и их количества.

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



а – при возрастании ширины полосы частот измерений; *б* – при возрастании количества частот измерений

Рис. 2. Зависимости среднего квадрата ошибки Δ_d оценки отсложения в РПП

На основании полученных зависимостей оценки Δ_d оценивали статистический предел разрешения ϖ , как функцию от значений доверительной вероятности. На рис. 3 приведены зависимости предела разрешения для ОСШ $-0,27 \text{ дБ}$ и $-2,67 \text{ дБ}$ для диапазона $9-13,5 \text{ ГГц}$ при измерениях на $L = 19$ частотах.

Анализ зависимостей рис. 3 показывает, что с увеличением ОСШ, разрешение увеличивается для всех значений доверительной вероятности. Это в основном связано с тем, что Δ_d монотонно уменьшается при возрастании ОСШ (рис. 2). При доверительной вероятности $0,95$ минимально достижимые уровни разрешения составляют около 9 и 30 мкм при ОСШ $-0,27 \text{ дБ}$ и $-2,67 \text{ дБ}$, соответственно.

Таким образом, оценка МСПРВ при ОСШ $-2,67 \text{ дБ}$, с доверительной вероятностью $0,95$ не будет чувствительна к изменению отсложения с шагом менее чем 30 мкм . Если требуется уменьшить разрешение менее 30 мкм , необходимо увеличить ОСШ в системе.

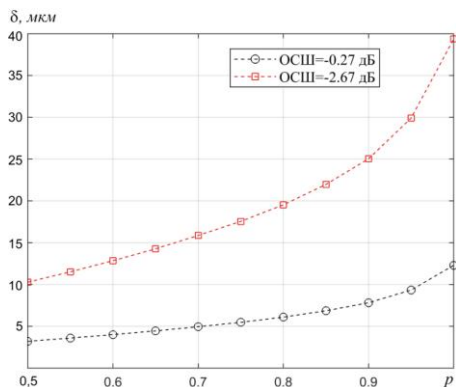


Рис. 3. Зависимости среднего квадрата ошибки Δ_d оценки отслоения в РПП

Заключение

Многочастотное измерение коэффициента ослабления ПЭМВ в полосе частот, с учетом частотной дисперсии электрофизических параметров покрытия, позволяет производить высокоточную оценку величины его отслоения от металлического основания. Проведенное имитационное моделирование показало принципиальную возможность обеспечить значения регистрируемых величин отслоений РПП 20 мкм и менее при измерениях в полосе частот $\Delta f = 9 - 13,5 \text{ ГГц}$. Для повышения точности оценки следует увеличивать ширину полосы частот измерений и уменьшать мощность шума.

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. Kaz'min, A.I., Estimating the Extent of Exfoliation of Dielectric and Magnetodielectric Coatings with Surface Microwaves / A.I. Kaz'min, P.A. Fedyunin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2020. – Vol. 56. – No. 9. – pp. 727–741.
4. Fh P.Ya. Ufimtsev, R.T. Ling New Results for the Properties of TE Surface Waves in Absorbing Layers // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – vol. 49. – Issue 10. – pp. 1445–1452. – Oct 2001.