

Аналитические выражения для коэффициента отражения от однородного радиопоглощающего слоя

А.О. Ширяев,^{1,*} К.Н. Розанов,^{1,†} Д.А. Петров^{1,‡}

¹Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук
Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 6

(Поступила в редакцию 12.05.2023; после доработки 26.05.2023; принята к публикации 30.05.2023)

Проведено теоретическое и численное исследование критериев качества радиопоглощающих покрытий (РПП). Получены простые выражения для глубины минимума коэффициента отражения однородного поглощающего слоя. Показано, что эта величина не является корректной характеристикой радиопоглощения. Для описания качества РПП необходимо использовать либо относительную ширину его рабочего диапазона, либо отношение ширины рабочего диапазона длин волн к толщине слоя. Первая из этих величин может быть полезна, когда важно получение высокой широкополосности поглотителя, вторая — его малой толщины.

PACS: 84.40.-x УДК: 537.86

Ключевые слова: радиопоглощающие покрытия, композитные материалы, СВЧ магнитная проницаемость.

DOI: 10.55959/MSU0579-9392.78.2340301

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время СВЧ-свойства композитных материалов (КМ) привлекают большое внимание. В большинстве работ, опубликованных в данной области, авторы упоминают радиопоглощающие покрытия (РПП) как возможное применение полученных результатов (см., например, обзор [1]). Стандартный подход к изучению СВЧ-свойств КМ заключается в следующем: измерение комплексной диэлектрической $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ и магнитной проницаемостей $\mu = \mu' - i\mu''$ КМ с определенной концентрацией включений; расчет частотной зависимости коэффициента отражения (КО) от слоя исследуемого КМ, помещенного на металлическую подложку при нормальном падении электромагнитной волны; выбор толщины слоя таким образом, чтобы получить глубокий минимум КО на какой-либо частоте СВЧ-диапазона. Получение глубокого минимума КО порядка -30 , -40 или даже -60 дБ считается доказательством «хорошей поглощательной способности» включений, входящих в состав КМ. Недавние примеры применения такого подхода можно найти в работах [2–4].

Для оценки качества РПП, наряду с глубиной минимума КО, часто используют такие характеристики, как относительная ширина рабочего диапазона W или отношение ширины рабочего диапазона к толщине покрытия $\Delta\lambda/d$. Величина W одинаково определяется из крайних частот или длин волн

рабочего диапазона:

$$W = 2 \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}} = 2 \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + f_{\min}} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta f}{f_0}, \quad (1)$$

где λ_0 — середина рабочего диапазона длин волн, f_0 — середина рабочего диапазона частот. Согласно (1) абсолютно широкополосное РПП с $f_{\max} = \infty$ характеризуется величиной $W = 200\%$.

Ограничение на отношение ширины рабочего диапазона к толщине РПП $\Delta\lambda/d$ было предложено в [5]. Ограничение следует из правила сумм для соотношений Крамерса–Кронига, которым подчиняется зависимость от длины волны комплексного КО, $R(\lambda)$ и записывается в виде

$$\left| \int_0^\infty \ln R(\lambda) d\lambda \right| \leq 2\pi^2 d \langle \mu_s \rangle, \quad (2)$$

где $\langle \mu_s \rangle$ — статическая магнитная проницаемость многослойной структуры, усредненная по всем входящим в нее слоям, а d — полная толщина структуры.

Комплексный КО R для однородного слоя толщиной d , расположенного на бесконечной проводящей подложке, может быть рассчитан для случая нормального падения электромагнитной волны как

$$R = \frac{\sqrt{\mu/\epsilon} i \operatorname{tg}(2\pi d \sqrt{\epsilon\mu}/\lambda) - 1}{\sqrt{\mu/\epsilon} i \operatorname{tg}(2\pi d \sqrt{\epsilon\mu}/\lambda) + 1}, \quad (3)$$

где $\lambda = c/f$ — длина волны в свободном пространстве, f — частота, c — скорость света. В (3) R представляет собой отношение амплитуд отраженной и падающей волн.

* E-mail: artemshiryaev@mail.ru

† E-mail: k.rozanov@yandex.ru

‡ E-mail: dpetrov-itae@yandex.ru

Стандартной постановкой задачи о РПП является получение значения модуля КО ниже заданного уровня, R_0 , в заданном частотном диапазоне, от f_{min} до f_{max} . Так как в (3) входит трансцендентная функция, аналитическое определение модуля КО представляет собой непростую задачу. Известны два подхода к ее решению. Первый из них, впервые рассмотренный Поттелем [6], использует разложение тангенса в ряд вблизи рабочей частоты. В результате получаются простые аналитические выражения, но их область применимости ограничена достаточно узким диапазоном частот. Однако во многих случаях это не имеет значения, т.к. радиопоглощающие свойства, например магнитных КМ, всегда проявляются также в достаточно узком частотном диапазоне.

Второй подход основан на известном разложении тангенса комплексного аргумента на действительную и мнимую части, что позволяет легко рассчитать модуль комплексного КО [7, 8]. На первый взгляд, такой метод не приводит к появлению ограничений на частотный диапазон, в котором он применим. Однако поглощение электромагнитной энергии предполагает наличие материальных потерь в материале РПП что, в свою очередь, неизбежно приводит к появлению частотной дисперсии материальных параметров, диэлектрической и магнитной проницаемостей. Для частотной зависимости материальных параметров реальных материалов в СВЧ-диапазоне трудно подобрать аналитическое выражение для зависимости от частоты; даже если такое выражение можно найти, его применение в большинстве случаев усложняет математическую задачу настолько, что ее аналитическое решение становится невозможным. Таким образом, этот подход также не позволяет получать и анализировать аналитические выражения для частотной зависимости модуля КО. Обычно его применение сводится к получению номограмм, аналогичных диаграммам Коула–Коула для магнитной проницаемости [9].

Ниже применен первый из описанных выше подходов. При таком рассмотрении следует различать два различных случая, разложение тангенса вблизи нуля и разложение вблизи $\pi/2$. РПП, которое соответствует первому из этих случаев, принято называть магнитным экраном Солсбери. Разложение зависимости КО от длины волны, которое легко получить из (3) при $d \rightarrow 0$,

$$R = \frac{2\pi i \mu d / \lambda - 1}{2\pi i \mu d / \lambda + 1}, \quad (4)$$

широко используется в научной литературе. Однако для анализа РПП формулу (4) следует использовать с осторожностью, даже если оптическая толщина РПП, $\sqrt{\varepsilon\mu} d$, мала. Для получения хороших поглощающих свойств необходимо, чтобы величина $2\pi\mu d/\lambda$ была близка к единице, а в этом случае разложение в ряд сходится медленно.

Хорошо известно, что магнитная проницаемость любого магнитного материала уменьшается с ро-

стом частоты в СВЧ-диапазоне [10]. По этой причине РПП, имеющие достаточную эффективность в СВЧ-диапазоне и характеризующиеся частотной зависимостью КО, которая подчиняется (4), встречаются редко. В качестве примера таких материалов можно привести спеченные ферриты, работоспособные на частотах до сотен мегагерц [11] и РПП на основе искусственных магнетиков [12]. Большинство РПП, эффективных в СВЧ-диапазоне, относятся ко второму типу; их называют экранами Доленбаха или интерференционными (четвертьволновыми) РПП.

Случай, когда разложение тангенса необходимо проводить вблизи $\pi/2$ (случай четвертьволнового радиопоглотителя), в литературе рассмотрен только в отношении немагнитного материала [13]. При этом условии нулевого отражения в четвертьволновом минимуме КО получено в виде:

$$\varepsilon'' = \frac{\lambda}{\pi d}. \quad (5)$$

Целью проведенного исследования является поиск простых аналитических выражений для КО однородного поглощающего слоя из магнитоэлектрического материала, которые позволили бы определять глубину четвертьволнового минимума КО в зависимости от параметров слоя. Показано, что получение глубокого минимума КО является результатом согласования параметров слоя, а не хорошей способности к поглощению электромагнитной энергии. Поэтому присутствие такого минимума не является свидетельством «хорошей поглощательной способности» материала и не может быть использовано для оценки качества РПП. Для этого необходимы другие характеристики, такие как относительная ширина рабочего диапазона или отношение ширины рабочего диапазона к толщине покрытия.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВОГО РПП

Для четвертьволнового РПП тангенс в (3) при его аргументе, близком к $\pi/2$, при сохранении только первого члена может быть представлен как

$$\operatorname{tg}(x) \approx \frac{1}{\pi/2 - x}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (3), получим для комплексного КО от однородного слоя выражение

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon}\pi (4d\sqrt{\varepsilon}\sqrt{\mu} - \lambda) - 2i\sqrt{\mu}\lambda}{\sqrt{\varepsilon}\pi (4d\sqrt{\varepsilon}\sqrt{\mu} - \lambda) + 2i\sqrt{\mu}\lambda}. \quad (7)$$

Первое слагаемое в числителе и знаменателе правой части (7) является резонансным членом, действительная часть которого определяет частотную зависимость КО. Если при рассмотрении резонансного поведения пренебречь действительной частью

вторых слагаемых в числителе и знаменателе, получится хорошо известное условие для длины волны, на которой возникает четвертьволновой резонанс:

$$4d\operatorname{Re}[\sqrt{\varepsilon}\sqrt{\mu}] = \lambda. \quad (8)$$

Добротность четвертьволнового резонанса определяется мнимыми частями обоих слагаемых в числителе и знаменателе (7): здесь уже влиянием второго слагаемого пренебречь нельзя. Для упрощения вычислений подставим условие резонанса (8) в (6), что приводит к следующему условию нулевого от-

$$|R|^2 = \frac{(\pi\operatorname{Re}\sqrt{\varepsilon}(4d\operatorname{Re}(\sqrt{\varepsilon}\sqrt{\mu}) - \lambda))^2 + \left(2\lambda\operatorname{Re}\sqrt{\mu}\left(1 - \frac{2\pi d}{\lambda} \frac{\operatorname{Re}\sqrt{\varepsilon}}{\operatorname{Re}\sqrt{\mu}} \operatorname{Im}(\sqrt{\varepsilon}\sqrt{\mu})\right)\right)^2}{(\pi\operatorname{Re}\sqrt{\varepsilon}(4d\operatorname{Re}(\sqrt{\varepsilon}\sqrt{\mu}) - \lambda))^2 + \left(2\lambda\operatorname{Re}\sqrt{\mu}\left(1 + \frac{2\pi d}{\lambda} \frac{\operatorname{Re}\sqrt{\varepsilon}}{\operatorname{Re}\sqrt{\mu}} \operatorname{Im}(\sqrt{\varepsilon}\sqrt{\mu})\right)\right)^2}. \quad (10)$$

Сравнение частотных зависимостей модуля КО, даваемых точным уравнением (3) и приближениями (7) и (10), показаны на рис. 1, а для случая, когда параметры поглощающего слоя равны $\varepsilon = 26.5 - i3.8$, $\mu = 2 - i0.5$ и $d = 1$ мм. Из рисунка видно, что приближение (7) дает результат, близкий к точному расчету; большее расхождение, полученное между (10) и (3), вызвано приближениями, принятыми при выводе (10). Тем не менее, принимая во внимание высокую добротность интерференционного минимума, использованного в качестве примера, и низкое значение модуля КО в его минимуме, можно считать полученное согласие вполне разумным. С учетом этого полученные выражения могут быть успешно использованы при анализе радиопоглощающих свойств материалов.

Полученное выше уравнение (10) может быть неудобно для практического использования, т.к. в него входят квадратные корни диэлектрической и магнитной проницаемостей. Для упрощения получаемого результата может быть использовано разложение в ряд Лорана, которое учитывает, что аргумент тангенса является комплексной величиной. При таком разложении дополнительно сохранены ноль и полюс КО:

$$\operatorname{tg}(x) \approx \frac{2x}{(\pi/2 - x)(\pi/2 + x)}. \quad (11)$$

Уравнение (11) учитывает четвертьволновой минимум КО при $x = \pi/2$, ноль тангенса при $x = 0$ и полюс, расположенный симметрично рабочему,

$$|R|^2 = \frac{(16d^2(\varepsilon'\mu' - \varepsilon''\mu'') - \lambda^2)^2 + \left(\frac{16d\mu'\lambda}{\pi}\right)^2 \left(1 - \frac{\pi d(\varepsilon'\mu'' + \varepsilon''\mu')}{\lambda\mu'}\right)^2}{(16d^2(\varepsilon'\mu' - \varepsilon''\mu'') - \lambda^2)^2 + \left(\frac{16d\mu'\lambda}{\pi}\right)^2 \left(1 + \frac{\pi d(\varepsilon'\mu'' + \varepsilon''\mu')}{\lambda\mu'}\right)^2}. \quad (15)$$

Для немагнитных КМ разложение в ряд (12) и аппроксимация лоренцевой зависимостью (15) дают одинаковый результат. Кроме того, они точнее опи-

ражения в четвертьволновом минимуме:

$$\frac{2\pi d}{\lambda} \frac{\operatorname{Re}\sqrt{\varepsilon}}{\operatorname{Re}\sqrt{\mu}} \operatorname{Im}[\sqrt{\varepsilon}\sqrt{\mu}] = 1. \quad (9)$$

Уравнение (9) позволяет найти величину материальных потерь в слое, при которых КО на частоте четвертьволнового минимума равен нулю.

Вблизи четвертьволнового резонанса использованный подход приводит к лоренцевой зависимости модуля КО от частоты:

при $x = -\pi/2$. Включение дополнительных нуля и полюса позволяет сохранить аналитические свойства КО как функции длины волны (т.е. четность фазы и нечетность модуля), что может быть существенно для оценки диапазонных свойств РПП.

Соответствующее уравнение для комплексного КО записывается в виде

$$R = -\frac{16d^2\varepsilon\mu\pi + 16id\mu\lambda - \pi\lambda^2}{16d^2\varepsilon\mu\pi - 16id\mu\lambda - \pi\lambda^2}. \quad (12)$$

Длина волны, на которой возникает четвертьволновой минимум КО, может быть получена из (12) также в виде (8). Коэффициент отражения тождественно равен нулю, если выполнено условие

$$\frac{\pi d}{\lambda\mu'}(\varepsilon'\mu'' + \varepsilon''\mu') = 1, \quad (13)$$

что при $\mu = 1$ согласуется с (5).

Если модуль КО не равен нулю в минимуме отражения, положение этого минимума по-прежнему определяется формулой (8), а глубина минимума R_{min} может быть найдена как

$$R_{min} = \left| \frac{(\pi d/\lambda\mu')(\varepsilon'\mu'' + \varepsilon''\mu') - 1}{(\pi d/\lambda\mu')(\varepsilon'\mu'' + \varepsilon''\mu') + 1} \right|. \quad (14)$$

Лоренцева зависимость для минимума КО может быть получена тем же путем, как и при выводе формулы (10); результат записывается в виде

ссылают модуль коэффициента отражения для диэлектрических покрытий по сравнению с лоренцевой аппроксимацией (10), приведенной выше. На

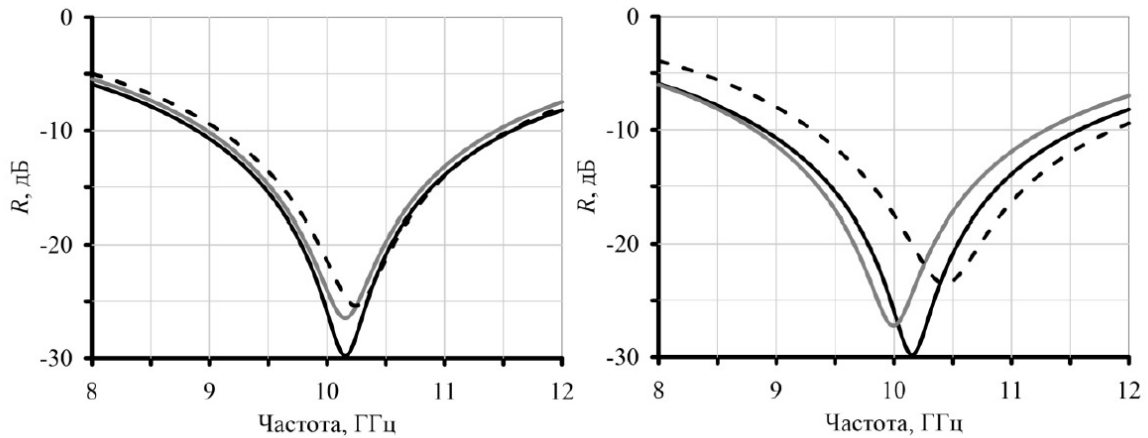


Рис. 1. *а* — Модуль КО для однородного РПП с параметрами $\varepsilon = 26.5 - i3.8$, $\mu = 2 - i0.5$, $d = 1$ мм. Черная кривая — расчет при помощи точного уравнения (3), серая кривая — результат разложения в ряд (6), штриховая кривая — аппроксимация лоренцевой частотной зависимостью (10). *б* — Результаты расчета, проведенного для тех же значений параметров слоя при помощи (3) (точное уравнение, сплошная линия), (10) (результат разложения в ряд (11), серая кривая) и (15) (аппроксимация лоренцевой частотной зависимостью, штриховая кривая)

рис. 2 показаны зависимости модуля коэффициента отражения для РПП из немагнитного материала, полученные из уравнений (3), (7), (10) и (12).

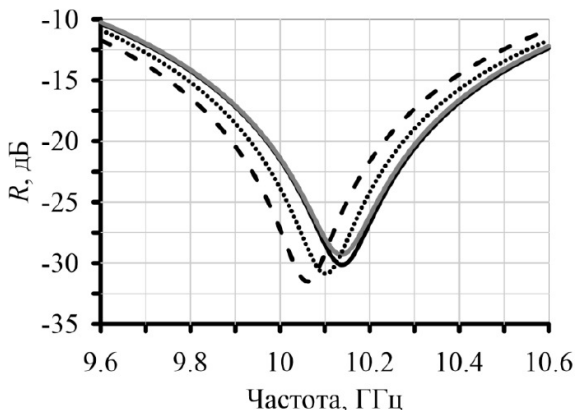


Рис. 2. Модуль КО для однородного немагнитного РПП с параметрами $\varepsilon = 55 - i10$, $\mu = 1$, $d=1$ мм. Черная кривая — расчет при помощи точного уравнения (3); серая кривая — результат разложения в ряд (6); штриховая кривая — аппроксимация лоренцевой частотной зависимостью (10); пунктирная кривая — результат разложения в ряд (11)

По сравнению с (10) в уравнение (15) входят более высокие степени λ . С другой стороны, в (15) отсутствуют квадратные корни из материальных параметров, что существенно облегчает его анализ. Глубина минимума отражения прямо связана со значениями материальных параметров и толщины слоя. Точность полученной формулы ниже по сравнению с результатом разложения (7), рассмотренного выше, как следует из данных на рис. 1, *б*. Причиной этого является то, что дополнительные нуль и полюс, которые сохранены в (11), расположены

несимметрично относительно рабочей частоты. Однако это компенсируется более простой формой получаемых выражений.

Отметим, что отклонения аппроксимаций от точного результата ясно видны на рис. 1 потому, что параметры расчета выбраны так, что добротность четвертьволнового резонанса высока, а получаемый минимум КО близок к нулю. Чувствительность глубины минимума к параметрам задачи в этом случае очень высока, как легко можно видеть из уравнения (15). Именно по этой причине в работах [2–4], а также других работах, использующих аналогичный подход, в качестве иллюстрации «высокой поглощательной способности включений» использованы расчетные, а не измеренные частотные зависимости модуля КО от слоя. В эксперименте на реальных материалах такие малые значения КО вряд ли могут быть зафиксированы, принимая во внимание погрешность определения толщины образца, неоднородность композита и другие неизбежные погрешности задания параметров задачи.

Таким образом, получение низкого модуля КО от однородного слоя на металлической подложке зависит от близости параметров слоя к оптимальным значениям. Чем более точно выполняются условия (8) и (9) или (8) и (13), тем ниже значение, достигаемое в четвертьволновом минимуме КО. Слой может иметь диэлектрические потери, магнитные потери либо и те и другие. Вклад от диэлектрических и магнитных потерь просто суммируется друг с другом (с весовым множителем, равным действительной части сопряженной проницаемости). Поглощение ЭМВ не может быть приписано «синергетическому эффекту диэлектрических и магнитных потерь», как это часто предполагается в литературе, например, [11, 12, 14]. Также, как это ясно видно из (13), в КМ с наполнением ферромагнитными прово-

дьящими включениями магнитные потери доминируют, т.к. действительная часть диэлектрической проницаемости, как правило, существенно больше действительной части магнитной проницаемости.

Следовательно, создание композитных РПП является задачей, которая сводится в основном к хорошему согласованию параметров слоя, а не к получению «хорошей поглощательной способности» включений в композите. Для получения низкого КО на заданной частоте и действительные, и мнимые части комплексных материальных параметров должны иметь вполне определенные значения.

Полученные выше выражения строго выполняются для узкополосных РПП. Заметим еще раз, что анализ широкополосных РПП не может быть проведен в рамках аналитического подхода из-за наличия частотной дисперсии материальных параметров. На рис. 3 показаны рассчитанные зависимости модуля КО для покрытия с дисперсией магнитной проницаемости. Зависимость КО характеризуется наличием двух связанных минимумов КО внутри рабочего диапазона. Низкочастотный минимум соответствует четвертьволновому, высокочастотный — магнитному минимуму, свойственному магнитному экрану Солсбери. Полученные аналитические выражения для КО описывают только четвертьволновой минимум, при этом точность описания довольно низка.

Уравнения, полученные выше, могут служить хорошими начальными приближениями для численного анализа узкополосных РПП. Кроме того, они могут быть с успехом использованы для получения качественных заключений. Например, из (8) и (14) ясно видно, что глубина четвертьволнового минимума отражения РПП может изменяться с толщиной поглощающего слоя только в том случае, когда материальные параметры слоя характеризуются частотной дисперсией. В противном случае зависимость от d в правой части (14) полностью компенсируется зависимостью от длины волны, на которой возникает четвертьволновой минимум и которая, согласно (8), также пропорциональна d . Кроме того, для любого заданного значения R_{min} , за исключением $R_{min} = 0$, могут быть найдены два набора соответствующих потерь, которые соответствуют случаям, когда величина $(\pi d / \lambda \mu')(\varepsilon' \mu'' + \varepsilon'' \mu')$ больше или меньше единицы.

Изменение в широких пределах эффективных материальных параметров КМ возможно путем изменения концентрации включений в КМ, модификации формы включений или морфологии композита, например при помощи размола или создания непрозрачной оболочки на включениях. Использование нескольких типов включений в КМ обеспечивает больше степеней свободы для подстройки материальных параметров КМ и сможет быть использовано для получения хорошего согласования композитного слоя на заданной частоте. Примером этого может служить один из первых РПП, который был запатентован в Голландии в 1936 г. [14] и представлял собой четвертьволновый слой с рабочей частотой

2 ГГц, содержащий частицы сажи для обеспечения поглощения электромагнитной энергии и двуокиси титана для обеспечения работоспособности в нужном частотном диапазоне.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РПП

Простые аналитические выражения позволяют подобрать параметры поглощающего слоя таким образом, чтобы получить глубокий минимум КО на требуемой частоте. Однако наличие глубокого минимума КО, как правило, не обеспечивает необходимого качества РПП. Приоритетной задачей является получение высокой эффективности радиопоглощения в пределах некоторого диапазона частот необходимой ширины. Сама по себе ширина рабочего диапазона частот также не может служить в качестве числовой характеристики. Действительно, при ширине рабочего диапазона частот, равной 2 ГГц, этот диапазон может быть расположен между 0.1 и 2.1 ГГц или между 18 и 20 ГГц, что является качественно различными ситуациями с точки зрения конструирования РПП.

Другая важная проблема состоит в получении высокой эффективности на элементах конечного размера, где снижение эффективной поверхности рассеяния лимитировано эффектами краевого рассеяния [15] (см. также результаты численных расчетов, приведенные в [16]). И наконец, ожидаемый уровень эффективности РПП может не быть достигнут вследствие неизбежных технологических допусков на параметры поглощающего слоя. Вследствие этих факторов оценка качества РПП требует других критериев, таких как относительная ширина рабочего диапазона или отношение ширины рабочего диапазона к толщине покрытия.

Из выражения (2), полученного в [5] из соотношений Крамерса–Кронига, может быть получено ограничение на отношение ширины рабочего диапазона к толщине РПП. Если РПП характеризуется модулем КО, меньшим некоторого значения R_0 в пределах некоторого диапазона длин волн от λ_{min} до λ_{max} , то

$$\frac{\Delta\lambda}{d} < \frac{2\pi^2 \langle \mu_s \rangle}{|\ln R_0|}, \quad (16)$$

где $\Delta\lambda = \lambda_{max} - \lambda_{min}$. Отметим, что в (16) входит именно статическая магнитная проницаемость. Поэтому корректная оценка может быть получена только если магнитные потери и, следовательно, частотная дисперсия магнитной проницаемости на частотах ниже рабочего диапазона пренебрежимо малы и, следовательно, большая часть магнитных потерь сконцентрирована в пределах рабочего диапазона. Если низкочастотные потери существенны, то в качестве множителя в правой части (16) следует брать значение действительной части магнитной проницаемости на нижней границе рабочего диапазона частот [17].

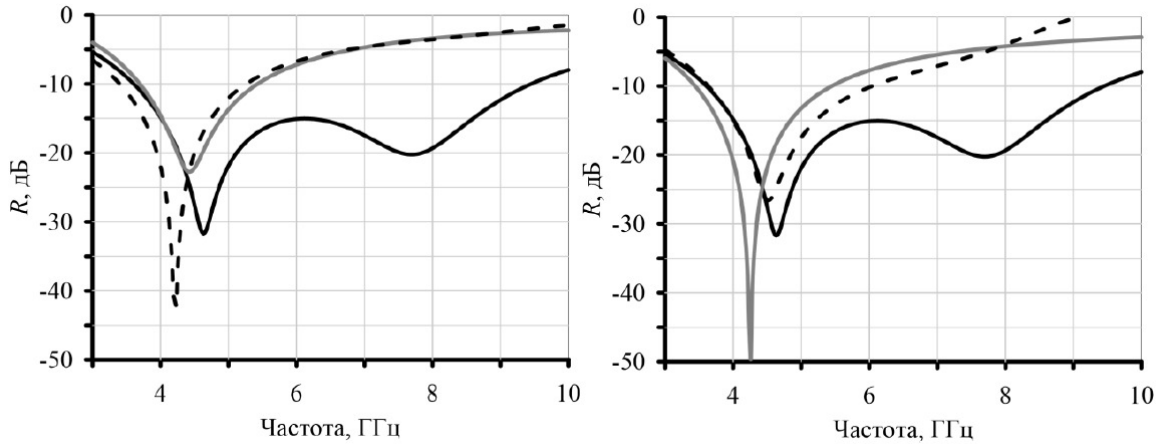


Рис. 3. *а* — Модуль КО для однородного РПП с дисперсией магнитной проницаемости: черная кривая — расчет при помощи точного уравнения (3); серая кривая — результат разложения в ряд (6); штриховая кривая — аппроксимация лоренцевой частотной зависимостью (10). *б* — Те же результаты при использовании разложения (11): черная кривая — расчет при помощи точного уравнения (3); серая кривая — результат разложения в ряд (11); штриховая кривая — аппроксимация лоренцевой частотной зависимостью (15)

Уравнение (16) ограничивает ширину рабочего диапазона покрытия с любым числом слоёв и любой дисперсией материальных параметров, удовлетворяющей соотношениям Крамерса–Кронига. Для однослойного РПП, дисперсией материальных параметров которого можно пренебречь, отношение ширины рабочего диапазона к толщине РПП определяется формулой [18]:

$$\frac{\Delta\lambda}{d} \leq \frac{32}{\pi} \frac{R_0}{1 - R_0^2} \mu_s \quad (17)$$

вместо (16). Значения $\Delta\lambda/d$, удовлетворяющие (17), как правило, значительно ниже предела, установленного (16). Например, для $R_0 = 0.316$ (-10 дБ) отношение ширины рабочего диапазона к толщине РПП $\Delta\lambda/d$ не может превышать $17.2(\mu_s)$ для (16) и $3.58(\mu_s)$ для (17). Таким образом, значения $\Delta\lambda/d$, даваемые (16) и (17), различаются в 4.8 раз.

Рабочая ширина длин волн РПП может быть расширена по сравнению с (17) за счет использования частотной дисперсии материальных параметров и применения многослойных РПП. Для чисто диэлектрических материалов численное исследование этих методов расширения рабочего диапазона РПП было проведено в [17], в предположении, что частотная зависимость диэлектрической проницаемости подчиняется закону частотной дисперсии Лоренца. Показано, что предельные значения $\Delta\lambda/d$ существенно зависят от уровня КО R_0 и количества минимумов частотной зависимости модуля КО, расположенных в пределах рабочего диапазона, n .

Аналогичные результаты получены в [18] для РПП, для которых характерна частотная зависимость магнитной проницаемости и, соответственно, магнитные потери. Заметим, что резкая частотная дисперсия материальных параметров, как правило, нехарактерна для композитных материалов,

содержащих проводящие порошки. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости может наблюдаться только при концентрациях включений вблизи порога протекания. Частотная дисперсия магнитной проницаемости часто наблюдается в таких КМ, но обычно эта дисперсия слишком слаба для того, чтобы обеспечить наличие нескольких минимумов КО в пределах рабочего диапазона, особенно если этот диапазон относительно узок. Применение многослойных композитных структур для расширения рабочего диапазона РПП было предложено в [19, 20], но получаемое в реальных материалах увеличение широкополосности радиопоглощения значительно меньше, чем это следует из (17). Причиной является то, что преимущества многослойных РПП могут быть полностью реализованы в случае, если значения материальных параметров соседствующих слоев значительно различаются. Из этого следует, что часть слоев, входящих в многослойную структуру, должны быть КМ с малой концентрацией включений. Это снижает усредненную магнитную проницаемость структуры, что, в свою очередь, в соответствии с (2) снижает отношение $\Delta\lambda/d$.

Получение большей эффективности и широкополосности РПП во многих случаях имеет более высокое практическое значение, чем достижение малой толщины покрытия. В этом случае качество радиопоглотителя можно характеризовать относительной шириной рабочего диапазона W . Для РПП, построенных на основе КМ с наполнением ферромагнитными порошками, частотная дисперсия материальных параметров на СВЧ обычно слаба. В этом случае ширина рабочего диапазона записывается в виде (17) и для четвертьволнового поглотителя $\lambda_0 = 4d\sqrt{\epsilon\mu}$. Тогда, в предположении, что $R_0 \ll 1$,

из (1) следует

$$W = \frac{8}{\pi} R_0 \sqrt{\mu/\varepsilon}. \quad (18)$$

В КМ с высоким содержанием магнитных включений диэлектрическая и магнитная проницаемости должны удовлетворять одной и той же формуле смещения. Поэтому если обе эти величины велики по сравнению с единицей, то, так как магнитная проницаемость матрицы КМ обычно равна единице, отношение ε/μ больше или равно диэлектрической проницаемости матрицы КМ. Обычно применяют полимерные матрицы, диэлектрическая проницаемость которых близка к 2, за счет чего относительная ширина рабочего диапазона, в соответствии с (18), не превышает 60% на уровне минус 10 дБ. На практике отношение ε/μ в КМ с высоким наполнением магнитными включениями обычно еще выше, а относительная ширина рабочего диапазона, соответственно, ниже.

Следовательно, в КМ с высоким содержанием ферромагнитных частиц не может быть получена высокая относительная ширина рабочего диапазона. При снижении концентрации наполнителя и диэлектрическая и магнитная проницаемости стремятся к единице, и относительная ширина рабочего диапазона растет. При этом оценкой (18) пользоваться уже нельзя, т.к. КО в полуволновом антирезонансе также снижается, и рабочая полоса частот может включать в себя не только четвертьволновой резонанс, но и $3\pi/4$ и более высокие резонансы. В этом случае $\lambda_{min} \rightarrow 0$ и $W \rightarrow 200\%$. Такие поглотители включают в себя пористую матрицу и поглощающие включения с малой концентрацией, обычно частицы сажи, и используются, в частности, при оборудовании безэховых камер СВЧ [16]. Отношение ширины рабочего диапазона к толщине РПП для таких материалов низко.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе разложения коэффициента отражения от четвертьволнового поглощающего слоя в ряд получены приближенные аналитические выражения, но область их применимости ограничена узким диапазоном частот. Использованы два набора разложений в ряд: один из них дает более точную аппроксимацию, а другой — более наглядный результат. Использованный подход позволяет определить положение минимума модуля коэффициента отражения и глубину этого минимума.

Из рассмотрения, проведенного выше, видно, что глубина интерференционного минимума частотной зависимости КО не является корректной характеристикой радиопоглощающих свойств материалов. Для описания качества РПП необходимо характеризовать ширину частотного диапазона, связанного с минимумом отражения. Корректными характеристиками, действительно позволяющими описать качество РПП, могут являться либо относительная ширина рабочего диапазона (равная абсолютной ширине рабочего диапазона частот, нормированной на центральную частоту рабочего диапазона), либо отношение ширины рабочего диапазона длин волн к толщине РПП. Первая характеристика применяется в тех случаях, когда толщина РПП не очень важна с точки зрения его применения, а вторая может быть применена, если требование малой толщины РПП существенно. Дополнительно показано, что увеличению широкополосности покрытий способствует использование частотной дисперсии материальных параметров, применение многослойных РПП и снижение диэлектрической проницаемости материалов.

- [1] Qin F.X., Peng M.Y., Estevez D., Brosseau C. // *J. Appl. Phys.* **132**. 101101. (2022).
- [2] Qiu Y., Yang H., Wen B. et al. // *J. Colloid Interface Sci.* **590**. 561. (2021).
- [3] Abdolmajidi M., Cheraghi A., Joshaghani A.H., Mazaheri H. // *Nano-Structures & Nano-Objects.* **32**. 100911. (2022).
- [4] Yadav R., Panwar R. // *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **63**. 996. (2021).
- [5] Rozanov K.N. // *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **48**. 1230. (2000).
- [6] Pottel // *Z. Angewandte Physik.* **11**. 46. (1959).
- [7] Knott E.F. // *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **27**. 698. (1979).
- [8] Valenzuela A.Q., Fernandez F.A. // *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **44**. 822. (1993).
- [9] Musal H.M., Smith D.C. // *IEEE Trans. Magn.* **26**. 1462. (1990).
- [10] Rozanov K.N., Koledintseva M.Y. // *J. Appl. Phys.* **119**. 073901. (2016).
- [11] Naito Y., Suetake K. // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* **19**. 65. (1971).
- [12] Lagarkov A.N., Semenenko N., Kisel N., Chistyayev A. // *J. Magn. Magn. Mater.* **258–259**. 161. (2003).
- [13] Старостенко С.Н., Виноградов А.П., Кубец С.Т. // *РЭ.* **44**, № 7. 817. (1999).
- [14] Emerson W.H. // *IEEE Trans Antennas Propagat.* **21**. 484. (1973).
- [15] Perini J., Cohen L.S. // *IEEE Trans. EMC.* **35**. 223. (1993).
- [16] Mosallaei H., Rahmat-Samii Y. // *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **48**. 1594. (2000).
- [17] Rozanov K.N., Starostenko S.N. // *The European Phys. J. Appl. Phys.* **8**. 147. (1999).
- [18] Розанов К.Н., Старостенко С.Н. // *РЭ.* **48**, № 6. 715. (2003).
- [19] Wang T., Qiao L., Han R., Zhang Z.Q. // *J. Magn. Magn. Mater.* **324**. 3209. (2012).
- [20] Kim S.S. // *IEEE Trans. Magn.* **47**. 4314. (2011).

Approximate equations for the reflection coefficient from a homogeneous quarter-wavelength radar absorbing layer

A.O. Shiryayev^a, K.N. Rozanov^b, D.A. Petrov^c

Institute for theoretical and applied electromagnetics. Moscow 125412, Russia
E-mail: ^aartemshiryayev@mail.ru, ^bk.rozanov@yandex.ru, ^cdpetrov-itae@yandex.ru

The paper proposes a theoretical and numerical study of the quality criteria of radar absorbing layer. Simple analytical expressions for the minimum of the reflection coefficient of a homogeneous absorbing layer are obtained. It is shown that this quantity is not a correct characteristic of absorption. To describe the quality of an absorber, other quality criteria are needed, such as relative bandwidth of operating waveband or the ratio of the operating waveband to the layer thickness. The first of these values may be useful in obtaining a broadband absorber, and the second, in obtaining a small thickness of an absorber.

PACS: 84.40.-x

Keywords: radar absorbers, composite materials, microwave permeability.

Received 12 May 2023.

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2023. 78, No. 4. Pp. 470-477.*

Сведения об авторах

1. Ширяев Артем Олегович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 485-83-22, e-mail: artemshiryayev@mail.ru.
2. Розанов Константин Николаевич — доктор физ.-мат. наук, директор ИТПЭ РАН; тел.: (495) 939-11-00, e-mail: k.rozanov@yandex.ru.
3. Петров Дмитрий Александрович — науч. сотрудник; тел. (495) 485-83-22, e-mail: dpetrov-itae@yandex.ru.