

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЯХ НА ОСНОВЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ

А.И. Казьмин, П.А. Федюнин

ФГКВБОУ ВПО «Военный авиационный инженерный университет»
Министерства обороны Российской Федерации, г. Воронеж

Рецензент д-р техн. наук, профессор И.В. Милосердов

Ключевые слова и фразы: источник тока; математическая модель; радиопоглощающее покрытие; четырехполюсники; эквивалентные параметры; электрические и магнитные поля; электромагнитное поле.

Аннотация: Рассмотрен метод моделирования электромагнитных полей в многослойных радиопоглощающих покрытиях на основе эквивалентных схем четырехполюсников. Предложенный подход применим к расчету электромагнитных полей в многослойных радиопоглощающих покрытиях с произвольным числом слоев и позволяет рассчитать в нем составляющие электромагнитного поля.

В настоящее время в целях снижения радиолокационной заметности вооружения и военной техники находят широкое применение многослойные радиопоглощающие покрытия (РПП) [1], которые представляют собой набор слоев разных по структуре, толщине и электрофизическим свойствам, нанесенных на металлическое основание (рис. 1, а).

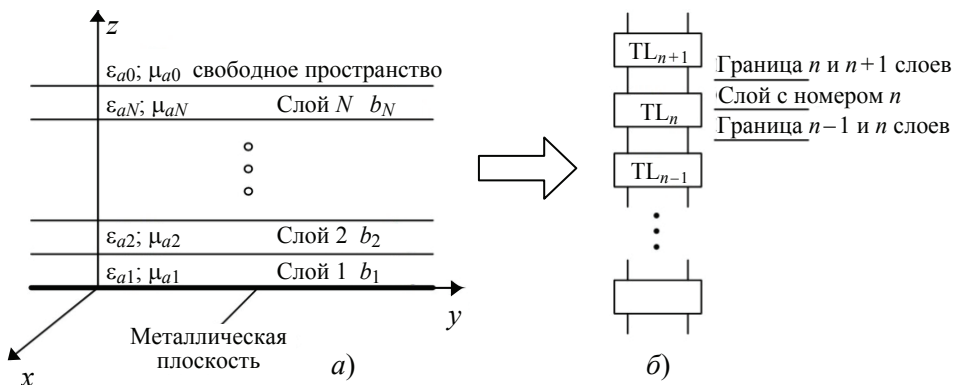


Рис. 1. Модель многослойного РПП

Казьмин Александр Игоревич – кандидат технических наук, преподаватель; Федюнин Павел Александрович – доктор технических наук, начальник кафедры, e-mail: fpa1@yandex.ru; ФГКВБОУ ВПО «Военный авиационный инженерный университет» Министерства обороны Российской Федерации, г. Воронеж.

Определение параметров и структуры электромагнитных полей в многослойных РПП является весьма актуальной задачей.

Для анализа электромагнитных процессов в многослойных средах в настоящее время используется ряд различных методов (волновой, интегральных уравнений, функций Грина, алгебраических уравнений, рекуррентных соотношений, эквивалентной схемы слоистой структуры и др.) [2].

Для расчета и анализа электромагнитных полей в многослойных РПП широкое применение нашел подход, основанный на использовании эквивалентной схемы слоистой структуры (рис. 1, б) [3].

Каждому слою РПП ставится в соответствие четырехполюсник TL_n , который представляет собой отрезок линии передачи с длиной, равной толщине слоя. Анализ распределения токов и напряжений в линиях передач, который осуществляется методами теории цепей СВЧ, позволяет определить их значения для любой координаты z .

В многослойном РПП существуют два решения уравнений Максвелла – для Е- и Н-волн. Их распространение вдоль оси Oz происходит независимо друг от друга. Существование волн двух типов предполагает необходимость рассмотрения двух эквивалентных схем отдельно для Е- и Н-волн. Введем индекс $\beta = e$, если речь идет о Е-волнах, и $\beta = m$ – для Н-волн.

Таким образом, в каждой линии передачи существуют токи и напряжения J_n^β, U_n^β , являющиеся функциями координаты z . Каждая линия характеризуется своей постоянной распространения γ_n и волновым сопротивлением Z_n , для которых могут быть получены следующие выражения [3]

$$\gamma_n^\beta = \sqrt{k_1^2 + k_2^2 - k_n^2}; \quad Z_n^\beta = \begin{cases} \frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 - k_n^2}}{i\omega\epsilon_{an}}, & \beta = e; \\ \frac{i\omega\mu_{an}}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 - k_n^2}}, & \beta = m, \end{cases} \quad (1)$$

где k_n – волновое число n -го слоя; k_1, k_2 – некоторые параметры, меняющиеся от $-\infty$ до $+\infty$.

Каскадно соединенные четырехполюсники удобнее всего описывать ABCD-матрицами, которые для n -го слоя покрытия определяются выражением

$$A_n^\beta = \begin{bmatrix} \text{ch}(\gamma_n^\beta b_n) Z_n^\beta \text{sh}(\gamma_n^\beta b_n) \\ \frac{1}{Z_n^\beta} \text{sh}(\gamma_n^\beta b_n) \text{ch}(\gamma_n^\beta b_n) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Чтобы найти матрицу всего многослойного РПП достаточно перемножить матрицы отдельных четырехполюсников

$$A_\Sigma^\beta = \prod_n A_n^\beta. \quad (3)$$

Присутствие токов, возбуждающих РПП, отображается на эквивалентной схеме источниками тока и напряжения. Электрические токи соответствуют параллельно включенному источнику тока, а магнитные токи – последовательно включенному источнику напряжения (рис. 2).

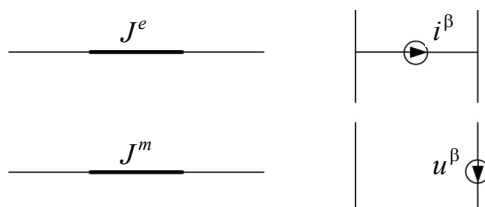


Рис. 2. Эквивалентные схемы электрических и магнитных токов

Таким образом, задача сводится к анализу возбуждения некоторого многослойного РПП заданными источниками тока и напряжения. Рассмотрим показанное на рис. 3, а типичное многослойное РПП, нанесенное на металлическое основание. Сверху РПП нагружено на свободное пространство, которое моделируется двухполюсником с номером 0, а снизу оно экранировано металлическим основанием, которое отображается закороткой. Между ней и четырехполюсником с номером 1 расположен источник тока. Этот источник моделирует электрические токи, текущие по металлическому основанию.

Найдем напряжение в линии передачи в точке подключения источника тока. Для этого нам надо найти матрицу передачи цепочки четырехполюсников с номерами 1 – N . Это легко сделать, используя выражение (3). В результате приходим к новой эквивалентной схеме, показанной на рис. 3, б.

Двухполюсники, расположенные выше и ниже источника тока, можно заменить их входными сопротивлениями. Входное сопротивление свободного пространства – Z_0^β , а входное сопротивление четырехполюсника с матрицей A_Σ^β и одним закороченным входом пространства выражается следующим образом

$$Z_{in}^\beta = \frac{A_{\Sigma 12}^\beta}{A_{\Sigma 22}^\beta}. \quad (4)$$

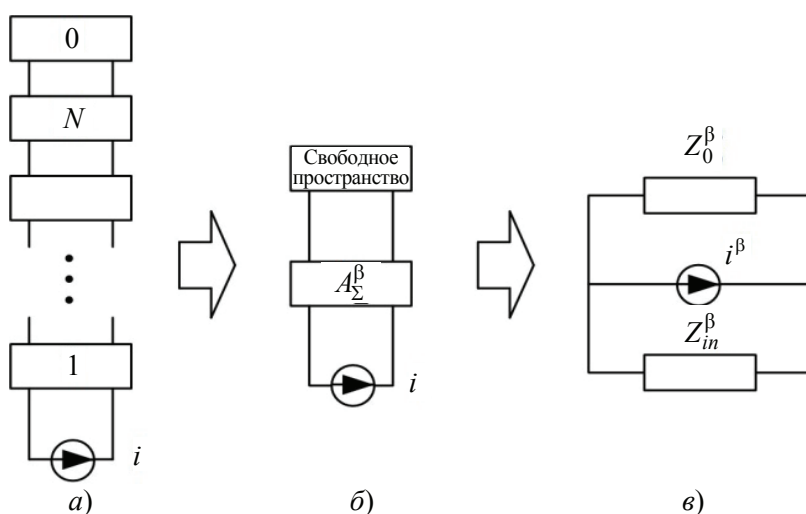


Рис. 3. Эквивалентные модельные схемы многослойного РПП

Анализируя схему на рис. 3, в, можно найти напряжение в точке подключения источника тока

$$U^\beta = i^\beta \left(\frac{Z_0^\beta Z_{in}^\beta}{Z_0^\beta + Z_{in}^\beta} \right). \quad (5)$$

Для записи интегральных уравнений нам необходима связь токов и напряжений в линиях передачи с полями в РПП. Эта связь определяется следующими соотношениями:

$$\Phi^\beta(x, y, z) = \iint_{k_1 k_2} J^\beta(k_1, k_2, z) e^{-i\bar{k}r} dk_1 dk_2; \quad \Psi^\beta(x, y, z) = \iint_{k_1 k_2} U^\beta(k_1, k_2, z) e^{-i\bar{k}r} dk_1 dk_2;$$

$$E_x = \frac{\partial \Psi^e}{\partial x} + \frac{\partial \Psi^m}{\partial y}; \quad H_x = -\frac{\partial \Psi^e}{\partial y} + \frac{\partial \Psi^m}{\partial x}; \quad E_y = \frac{\partial \Psi^e}{\partial y} - \frac{\partial \Psi^m}{\partial x}; \quad H_y = \frac{\partial \Psi^e}{\partial x} + \frac{\partial \Psi^m}{\partial y}, \quad (6)$$

где $\bar{k}r = k_1 x + k_2 y$, интегрирование в полученных зависимостях ведется в бесконечных пределах.

Связь электрических и магнитных токов с источниками тока и напряжения имеет следующий вид:

$$J_\alpha^\beta(x, y) = \iint_{k_1 k_2} \xi_\alpha^\beta(k_1, k_2) e^{-i\bar{k}r} dk_1 dk_2;$$

$$\xi_x^e = i(k_1 i^e + k_2 i^m); \quad \xi_y^e = i(k_2 i^e - k_1 i^m); \quad (7)$$

$$\xi_x^m = i(k_1 u^m - k_2 u^e); \quad \xi_y^m = i(k_1 u^e + k_2 u^m),$$

где индекс α принимает значения x и y .

Объединяя соотношения (5) – (7), и подставляя их в граничные условия на поверхности металлической подложки

$$E_x = 0, \quad E_y = 0, \quad x, y \in S, \quad (8)$$

где S – площадь металлической подложки, получаем искомую систему интегральных уравнений

$$\iiint_{S k_1 k_2} \begin{bmatrix} G_{xx} & G_{xy} \\ G_{yx} & G_{yy} \end{bmatrix} e^{-i\bar{k}(r-r')} dk_1 dk_2 \begin{bmatrix} J_x^e(s') \\ J_y^e(s') \end{bmatrix} ds' + \begin{bmatrix} E_{xi} \\ E_{yi} \end{bmatrix} = 0, \quad (9)$$

где вектор $\begin{bmatrix} E_{xi} \\ E_{yi} \end{bmatrix}$ соответствует полю источника возбуждения, а матрица

$\begin{bmatrix} G_{xx} & G_{xy} \\ G_{yx} & G_{yy} \end{bmatrix}$ находится из формул (5) – (7).

Введем следующие обозначения:

$$\hat{G}(V', V) = \iiint_{k_1 k_2} \begin{bmatrix} G_{xx} & G_{xy} \\ G_{yx} & G_{yy} \end{bmatrix} e^{-i\bar{k}(r-r')} dk_1 dk_2; \quad \bar{J}^e = \begin{bmatrix} J_x^e(s') \\ J_y^e(s') \end{bmatrix}; \quad \bar{E}_i = \begin{bmatrix} E_{xi} \\ E_{yi} \end{bmatrix}.$$

С их помощью удается привести систему интегральных уравнений к компактной форме

$$\int_S \hat{G}(s', V) \bar{J}^e(s') ds' + \bar{E}_i = 0.$$

Таким образом, предложенный в данной статье подход позволяет получить интегральные уравнения для многослойного РПП, а также рассчитать в нем составляющие электромагнитного поля. Рассмотренный подход применим к расчету электромагнитных полей в многослойных РПП с произвольным числом слоев, различными параметрами и является универсальным.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 14.741.12.0150 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Список литературы

1. Казанцева, Н.Е. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысококалостотного диапазона / Н.Е. Казанцева, Н.Г. Рывкина, И.А. Чмутин // Радиотехника и электроника. – 2003. – № 2. – С. 56–64.
2. Острейко, В.Н. Расчет электромагнитных полей в многослойных средах / В.Н. Острейко. – Л. : Изд-во Ленинград. ун-та, 1981. – 151 с.
3. Бодров, В.В. Математическое моделирование устройств СВЧ и антенн / В.В. Бодров, В.И. Сурков. – М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 1994. – 350 с.

Modeling of Electromagnetic Fields in Multilayer Radio-Absorbing Coatings on the Basis of Equivalent Scheme

A.I. Kazmin, P.A. Fedyunin

Military Aviation Engineering University, Voronezh

Key words and phrases: current source; electric and magnetic fields; electromagnetic field; equivalent parameters; mathematical model; quadripoles; radio-absorbing coating.

Abstract: The paper examines the method for modeling of electromagnetic fields in a multilayered radio-absorbing coating on the basis of equivalent circuits of quadripoles. The proposed approach is applicable to the calculation of electromagnetic fields in a multilayered radio-absorbing coating with an arbitrary number of layers and enables to calculate the components of electromagnetic field.

© А.И. Казьмин, П.А. Федюнин, 2011