

УДК 537.874.72

В. А. АРТЕМЕНКО, канд. техн. наук, *Б. В. ДЗЮНДЗЮК*, канд. техн. наук,
А. В. КОНОВКО, канд. техн. наук

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОХОЖДЕНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ

Прохождение плоской электромагнитной волны через один слой рассмотрено в работе [1]. Расчет основывался на решении одномерного скалярного волнового уравнения для обобщенного вектора Герца, удовлетворяющего соответствующим условиям непрерывности на границах раздела. В общем виде были получены коэффициенты отражения и прохождения сквозь однослойную структуру [1], однако метод обобщения, предложенный автором, не позволил получить такой важный параметр, как коэффициент прохождения для многослойной структуры. Полученные формулы для многослойной структуры выведены в предположении, что параметры сред по обе стороны структуры одинаковы [2]. Это предположение накладывает определенные ограничения, так как, если параметры сред неодинаковы, разными оказываются и коэффициенты прохождения по \vec{E} и \vec{H} .

Приводим простой метод получения коэффициентов отражения и прохождения для N -слойной структуры, удобной для практических расчетов и лишенный указанного ограничения. Для этого воспользуемся методом отражений [3].

Рассмотрим электромагнитную волну магнитного типа, компоненты поля которой определяются следующими соотношениями [1]:

$$\vec{E} = -i\omega\mu \operatorname{rot} \vec{\Pi}^M; \quad \vec{H} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{\Pi}^M - \kappa^2 \vec{\Pi}^M,$$

где $\vec{\Pi}^M$ — магнитный вектор Герца; $\kappa = i(2\pi/\lambda) \sqrt{\mu_r(\epsilon_r - i60\sigma\lambda)}$ —

полное число среды; $\mu = \mu_r \mu_0$ — абсолютная магнитная проницаемость; μ_r — относительная магнитная проницаемость; ω — круговая частота; λ — длина волны; σ — проводимость; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость.

Полагаем, что магнитные проницаемости всех сред одинаковы и равны магнитной проницаемости воздуха μ_0 . Коэффициент прохождения и отражения определим для вектора \vec{H} .

Вначале рассмотрим двухслойную структуру, состоящую из слоев 1 и 2 с волновыми числами κ_1 и κ_2 (рис. 1). Верхнее и нижнее полупространства характеризуются соответственно волновыми числами κ_3 и κ_0 . Пусть плоская волна падает из полупространства 3 нормально к поверхности структуры. Первый слой (волновое число κ_1) согласно [1] определяется следующими величинами:

коэффициентом отражения

$${}_1W_{21} = (K_{21} + K_{10} e^{-2\kappa_1 d_1}) / (1 + K_{21} K_{10} e^{-2\kappa_1 d_1}) \quad (1)$$

и коэффициентом прохождения

$${}_1S_{21} = (1 + K_{21})(1 + K_{10}) e^{-\kappa_1 d_1} / (1 + K_{21} K_{10} e^{-2\kappa_1 d_1}), \quad (2)$$

где $K_{10} = (\kappa_0 - \kappa_1) / (\kappa_0 + \kappa_1)$; $K_{21} = (\kappa_1 - \kappa_2) / (\kappa_1 + \kappa_2)$ — коэффициенты отражения от соответствующих границ.

В предыдущих выражениях двойные индексы справа указывают на направление движения электромагнитной волны, а индекс слева — на количество экранирующих слоев. Так как слой 1 характеризуется полными коэффициентами отражения и прохождения, переотражения будут происходить только в слое 2.

Проходя через границу раздела сред 3 и 2 (точка 1), электромагнитная волна испытывает ослабление, пропорциональное коэффициенту преломления на границе сред $(1 + K_{32})$. В точке 2 необходимо учесть поглощение волны и набег фазы, характеризующийся множителем $e^{-\kappa_2 d_1}$. Часть излучения, пропорциональная коэффициенту отражения, от первого слоя ${}_1W_{21}$ отразится обратно (точка 4), а оставшая часть, пройдя сквозь первый слой, выйдет в нижнее полупространство (точка 3). В точке 5 набег фазы удвоится. Часть излучения, пропорциональная коэффициенту отражения K_{23} отразится обратно (точка 6), а часть выйдет в верхнее полупространство (точка 15).

Дальнейшие переотражения происходят аналогично. Выпишем коэффициенты во всех точках, указанных на рис. 1:

$$\begin{aligned} 1 & - (1 + K_{32}); \quad 2 - (1 + K_{32}) e^{-\kappa_2 d_1}; \\ 3 & - {}_1S_{21} (1 + K_{32}) e^{-\kappa_2 d_1}; \quad 4 - {}_1W_{21} (1 + K_{32}) e^{-\kappa_2 d_1}; \\ 5 & - {}_1W_{21} (1 + K_{32}) e^{-2\kappa_2 d_1}; \quad 6 - {}_1W_{21} (1 + K_{32}) K_{23} e^{-2\kappa_2 d_1}; \end{aligned}$$

Рис. 1

$$\begin{aligned}
7 - {}_1W_{21}(1 + K_{23})K_{23}e^{-3\kappa_2 d_2}; & \quad 8 - {}_1S_{21} {}_1W_{21}(1 + K_{32})K_{23}e^{-3\kappa_2 d_2}; \\
9 - {}_1W_{21}^2(1 + K_{32})K_{23}e^{-3\kappa_2 d_2}; & \quad 10 - {}_1W_{21}^2(1 + K_{32})K_{23}e^{-4\kappa_2 d_2}; \\
11 - {}_1W_{21}^2(1 + K_{32})K_{23}^2e^{-4\kappa_2 d_2}; & \quad 12 - {}_1W_{21}^2(1 + K_{32})K_{23}^2e^{-5\kappa_2 d_2}; \\
13 - {}_1S_{31} {}_1W_{31}(1 + K_{32})K_{23}^2e^{-5\kappa_2 d_2}; & \\
14 - K_{32}; & \quad 15 - {}_1W_{21}(1 + K_{32})(1 + K_{23})e^{-2\kappa_2 d_2}; \\
16 - {}_1W_{21}^2(1 + K_{32})(1 + K_{23})K_{23}e^{-4\kappa_2 d_2}. &
\end{aligned}$$

Коэффициент прохождения (прозрачности) двуслойной структуры ${}_2S_{32}$ определяется суммированием коэффициентов на лучах, вышедших в нижнее полупространство (точки 3, 8, 13 и т. д.):

$${}_2S_{32} = \sum_{n=0}^{\infty} (1 + K_{32}) {}_1S_{21} e^{-\kappa_2 d_2} (K_{23} {}_1W_{21} e^{-2\kappa_2 d_2})^n.$$

Суммирование этой бесконечно убывающей геометрической прогрессии дает

$$\begin{aligned}
{}_2S_{32} &= {}_1S_{21}(1 + K_{32})e^{-\kappa_2 d_2} / (1 - K_{23} {}_1W_{21} e^{-2\kappa_2 d_2}) = \\
&= {}_1S_{21}(1 + K_{32})e^{-\kappa_2 d_2} / (1 + K_{32} {}_1W_{21} e^{-2\kappa_2 d_2}).
\end{aligned}$$

Аналогично коэффициент отражения двухслойной структуры определяется суммированием коэффициентов на лучах, вышедших обратно в верхнее полупространство (точки 14, 15, 16 и т. д.):

$$\begin{aligned}
{}_2W_{32} &= K_{32} + \sum_{n=0}^{\infty} (1 - K_{32}^2) {}_1W_{21} e^{-2\kappa_2 d_2} ({}_1W_{21} K_{23} e^{-2\kappa_2 d_2})^n = \\
&= K_{32} + {}_1W_{21}(1 - K_{32}^2)e^{-2\kappa_2 d_2} / (1 - K_{23} {}_1W_{21} e^{-2\kappa_2 d_2}) = \\
&= (K_{32} + {}_1W_{21} e^{-2\kappa_2 d_2}) / (1 + K_{32} {}_1W_{21} e^{-2\kappa_2 d_2}).
\end{aligned}$$

В предыдущих выражениях учтено, что $K_{32} = -K_{23}$. В случае трехслойного экрана нижние два слоя заменяются эквивалентной двухслойной структурой с параметрами ${}_2S_{32}$ и ${}_2W_{32}$ аналогично рассматриваются.

Применяя метод математической индукции для N -слойной структуры, легко получаем коэффициент прохождения

$$\begin{aligned}
{}_N S_{(N+1)N} &= ({}_{N-1} S_{N(N-1)} (1 + K_{(N+1)N}) e^{-\kappa_2 N d_N} / (1 + K_{(N+1)N} \times \\
&\quad \times ({}_{N-1} W_{N(N-1)} e^{-2\kappa_2 N d_N})) \quad (3)
\end{aligned}$$

и коэффициент отражения

$${}_N W_{(N+1)N} = (K_{(N+1)N} + {}_{(N-1)} W_{N(N-1)} e^{-2\kappa_N d_N}) / (1 + K_{(N+1)N} \times {}_{(N-1)} W_{N(N-1)} e^{-2\kappa_N d_N}). \quad (4)$$

Полученные формулы очень удобны при машинной реализации.

Полагая в выражениях (3), (4) параметры всех слоев одинаковыми, нетрудно найти известные формулы для однослойной структуры с суммарной толщиной, с помощью которых удобно проверять правильность полученных выражений.

Заметим, что выражение (3) было получено для вектора \vec{H} . Чтобы найти коэффициент прохождения по вектору \vec{E} , достаточно (3) домножить на величину κ_N/κ_0 .

При этом выражение (4) приобретает множитель (-1) . В случае, когда по обе стороны экранирующей структуры среды будут одинаковыми, коэффициенты прохождения по \vec{E} и \vec{H} совпадут.

В качестве примера был приведен расчет коэффициента экранирования в зависимости от длины волны для трехслойной структуры с параметрами: $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 2$; $d_1 = d_3 = 0,01$ м; $\sigma_1 = \sigma_3 = 1$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$; $\varepsilon_2 = 3,4$; $\sigma_2 = 0,2$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$; $d_2 = 0,25$ м. Параметры σ_0 , σ_4 и ε_0 , ε_4 соответствуют значениям проводимости и электрической проницаемости воздуха.

Кривая 1 на рис. 2 показывает зависимость изменения коэффициента прохождения от длины волны для трехслойной структуры в целом, 2 — соответствует изменению коэффициента прохождения для второго слоя. Ослабление первого и третьего слоев практически не зависит для выбранных параметров в данном диапазоне частот от длины волны и составляет 9,9 дБ. Из рис. 2 видно, что три изолированных экрана в сумме экранируют несколько эффективнее, чем один трехслойный экран из тех же материалов. В работе [3] также отмечено это обстоятельство, что связано, по мнению автора, со значительным обратным действием слоев друг на друга.

Список литературы: 1. Краев А. П. Основы геоэлектрики. М., 1965. 587 с. 2. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М., 1973. 373 в. 3. Каден Г. Электромагнитные экраны. М., 1957. 327 с.

Поступила в редколлегию 15.09.88

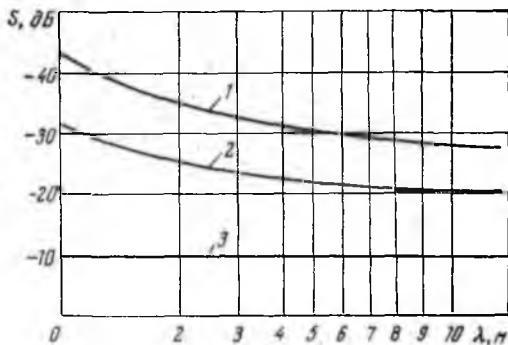


Рис. 2