

## Дифракция электромагнитных волн на многослойной структуре из бесконечных металлических экранов с прямоугольными отверстиями

А. В. Грибовский, Л. Н. Литвиненко, С. Л. Просвирнин

Радиоастрономический институт НАН Украины,  
61002, Харьков, ул. Краснознаменная, 4  
E-mail: grib@rian.kharkov.ua

Статья поступила в редакцию 30 ноября 1999 г.

Построены операторы отражения и прохождения электромагнитной волны для системы из конечного числа толстых металлических экранов с прямоугольными отверстиями. Отверстия расположены периодически в двух ортогональных направлениях. Исследованы зависимости коэффициента отражения электромагнитной волны от геометрических параметров структуры. Показано, что при изменении в определенных интервалах расстояния между экранами, коэффициент отражения принимает максимальное значение, при этом слабо изменяясь.

Побудовано оператори відбиття та проходження електромагнітної хвилі структури із скінченної кількості товстих металевих екранів з прямокутними отворами. Отвори розташовані періодично у двох ортогональних напрямках. Досліджено залежності коефіцієнту відбиття електромагнітної хвилі від геометричних параметрів структури. Доведено, що при змінюванні у визначених інтервалах відстані між екранами, коефіцієнт відбитку стає максимальним, слабо при цьому змінюючись.

Многослойные структуры в зависимости от параметров “элементарного” слоя, входящего в их состав, обладают рядом свойств, которые успешно используются при конструировании радиопрозрачных оболочек, согласующих (неотражающих) покрытий, искусственных сред со специальными свойствами и других объектов.

В работах [1,2] предложен и развит метод анализа дифракции волн на многослойных периодических структурах. Суть метода заключается в следующем. Будем считать, что известно решение задачи дифракции плоской волны на одиночном (“элементарном”) слое. Это значит, что известны операторы, которые дают возможность найти по характеристикам падающего поля отраженное и прошедшее поля, операторы отражения и прохождения. Вид этих операторов (матричный или интегральный) зависит от свойств “элементарного” слоя и вида падающего поля. По известным операторам отражения и прохождения одиночного слоя находится оператор отражения полубесконечной структуры таких слоев. При этом учитываются свойства электромагнитных волн, распространяющихся в бесконечной периодической структуре “элементарных” слоев. Далее, основываясь на использовании известных операторов прохождения и отражения “элементарного” слоя и полубесконечной структуры, можно построить решение задачи дифракции волн на многослойной структуре.

Будем рассматривать многослойную структуру, состоящую из  $n$  одинаковых бесконечных экранов конечной толщины  $h$  с периодически расположенными в двух направлениях ( $x$  и  $y$ ) волноводными каналами прямоугольного поперечного сечения (рис. 1). Центры каналов расположены в узлах прямоугольной сетки, а их поперечные сечения выбраны такими, чтобы в волноводах мог распространяться только основной тип волны.

Требуется найти электромагнитное поле, отраженное многослойной структурой при нормальном падении ТЕ-волны, вектор  $\vec{E}$  которой параллелен узким стенкам волноводных каналов. Этот случай наиболее интересен, так как при выбранной поляризации падающего поля происходит оптимальное возбуждение основной волны в волноводных ячейках. Для простоты величины периодов “элементарного” слоя  $d_1$  и  $d_2$  выберем такими, чтобы вне экрана распространялась только нулевая отраженная пространственная гармоника. В случае, когда вектор  $\vec{E}$  падающей волны параллелен широким стенкам волноводов, наблюдается максимальное отражение электромагнитной волны.

Для нахождения операторов отражения и прохождения “элементарного” слоя воспользуемся операторным методом [3]. С этой целью предварительно введем операторы отражения и прохождения для вспомогательной пери-

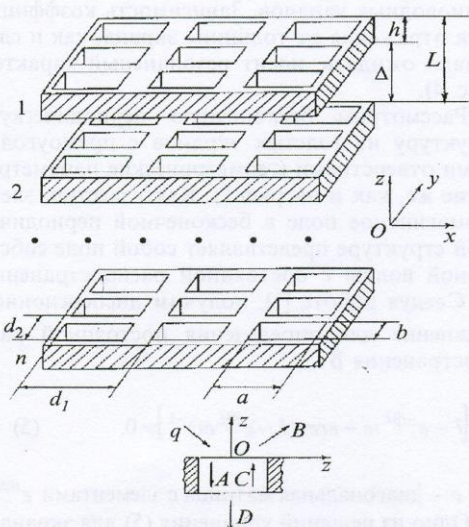


Рис. 1. Многослойная структура из металлических экранов с прямоугольными отверстиями

одической структуры. В качестве таковой выберем двумерно-периодическую решетку из полубесконечных прямоугольных волноводов, расположенных в идеально проводящем полупространстве  $z < 0$ . Обозначим через  $R_+$  и  $T_+$  соответственно оператор отражения и оператор прохождения решетки из полубесконечных волноводов в случае падения на нее плоских волн со стороны полупространства  $z > 0$ , а через  $R_-$  и  $T_-$  – операторы отражения и прохождения решетки в случае возбуждения ее волноводными модами со стороны полупространства  $z < 0$ , занятого волноводными каналами. Алгоритм вычисления элементов матричных операторов  $R_{\pm}, T_{\pm}$  основан на методе решения задач дифракции волн на периодических структурах волноводных излучателей и описан в работах [4,5]. Операторы  $R_{\pm}, T_{\pm}$  представляют собой бесконечные матрицы, элементы которых есть амплитуды распространяющихся и нераспространяющихся пространственных и волноводных гармоник при возбуждении структуры волнами с единичными амплитудами.

Перейдем к построению операторов отражения и прохождения “элементарного” слоя, представляющего собой металлический экран толщиной  $h$  с прямоугольными отверстиями, расположенными периодически в двух ортогональных направлениях. Сечение “элементарной” волноводной ячейки экрана со всеми обозначениями изображено в нижней части

рис. 1. Найдем связь между амплитудами Фурье электромагнитного поля в свободном пространстве и амплитудами волноводных мод при произвольном падении на экран спектра плоских линейно поляризованных волн с вектором амплитуд  $q$ :

$$\begin{aligned} B &= R_+ q + T_- C, \\ A &= T_+ q + R_- C \\ C &= e_0 R_- e_0 A, \\ D &= T_- e_0 A, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $B$  – вектор амплитуд отраженного поля в области  $z > 0$ ;  $A$  и  $C$  – векторы амплитуд волноводных мод;  $D$  – вектор амплитуд прошедшего поля;  $R_{\pm}, T_{\pm}$  – операторы отражения и прохождения решетки полубесконечных волноводов;  $e_0$  – оператор, учитывающий изменение фазы поля волноводных волн на длине  $h$ . Элементы оператора  $e_0$  вычисляются по формуле:

$$e_0 = \|\delta_{Mm} \delta_{Nn} \exp\{i\gamma_{mn} h\}\|, \quad M, m, N, n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

где  $\delta_{lp}$  – символ Кронекера;  $\gamma_{mn}$  – постоянная распространения волноводной моды.

Решение системы уравнений (1) имеет вид:

$$\begin{aligned} A &= Q^{-1} T_+ q, \\ C &= e_0 R_- e_0 Q^{-1} T_+ q, \end{aligned} \quad (3)$$

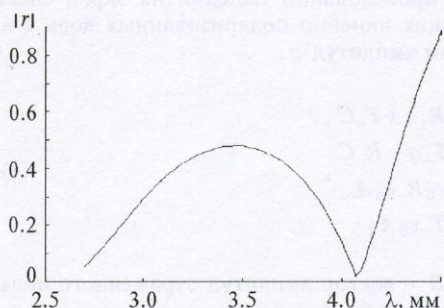
$$\begin{aligned} B &= R_+ q + T_- e_0 R_- e_0 Q^{-1} T_+ q, \\ D &= T_- e_0 Q^{-1} T_+ q, \end{aligned}$$

где  $Q = (I - R_- e_0 R_- e_0)$ ,  $I$  – единичный оператор. Из (3) найдем оператор отражения  $r$  и оператор прохождения  $t$  “элементарного” слоя:

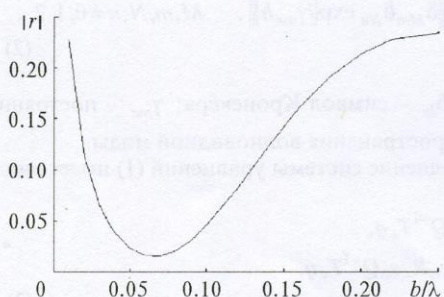
$$\begin{aligned} r &= R_+ + T_- e_0 R_- e_0 Q^{-1} T_+, \\ t &= T_- e_0 Q^{-1} T_+. \end{aligned} \quad (4)$$

С помощью операторов  $r$  и  $t$  для “элементарного” слоя можно исследовать электродинамические характеристики толстого экрана с прямоугольными отверстиями. В качестве примеров приведем некоторые из них. На рис. 2 представлена зависимость модуля коэффициента отражения ТЕ-волны от длины волны  $\lambda$ , а на рис. 3 – зависимость модуля коэффициента отражения от размера узкой стенки

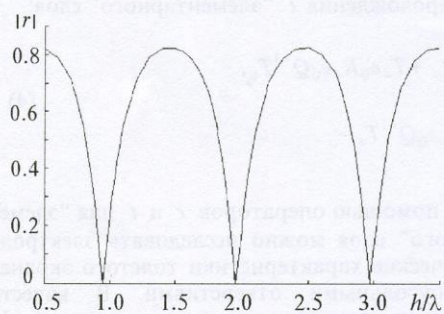
волновода при нормальном падении на экран плоской линейно поляризованной волны,



**Рис. 2.** Зависимость модуля коэффициента отражения ТЕ-волны от длины волны при нормальном падении на одиночный экран плоской волны, вектор  $\vec{E}$  которой параллелен узким стенкам волноводов:  $a=2.3$  мм;  $b=1$  мм;  $d_1=2.6$  мм;  $d_2=1.5$  мм;  $h=4$  мм



**Рис. 3.** Зависимость модуля коэффициента отражения ТЕ-волны от размера волновода  $b$ :  $a=0.575\lambda$ ;  $d_1=0.625\lambda$ ;  $d_2=0.3\lambda$ ;  $h=\lambda$



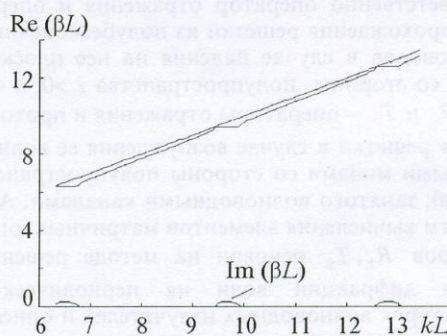
**Рис. 4.** Зависимость модуля коэффициента отражения от толщины экрана (геометрические параметры те же, что и для зависимости на рис. 3)

вектор  $\vec{E}$  которой параллелен узким стенкам волноводных каналов. Зависимость коэффициента отражения от толщины экрана, как и следовало ожидать, носит резонансный характер (рис. 4).

Рассмотрим бесконечную периодическую структуру из толстых экранов с прямоугольными отверстиями (геометрические параметры такие же, как и на рис. 1). Как известно, электромагнитное поле в бесконечной периодической структуре представляет собой поле собственной волны с постоянной распространения  $\beta$ . Следуя работе [1], получим дисперсионное уравнение для определения постоянной распространения  $\beta$ :

$$\det[I - e^{-i\beta L}te - erer(I - e^{i\beta L}et)^{-1}] = 0, \quad (5)$$

где  $e$  – диагональная матрица с элементами  $e^{ik\Delta}$ . Одно из решений уравнения (5) для экрана с параметрами:  $a=0.575\lambda$ ,  $b=0.25\lambda$ ,  $d_1=0.625\lambda$ ,  $d_2=0.3\lambda$ ,  $h=\lambda$  – в зависимости от расстояния между экранами  $kL$ , где  $k=2\pi/\lambda$ , показано на рис. 5. Прямая линия соответствует значениям  $\beta L = kL$ . Из графика видно, что в такой периодической структуре существуют зоны “запирания”, когда  $\text{Im}(\beta L) \neq 0$  и собственная электромагнитная волна не распространяется.



**Рис. 5.** Дисперсионные кривые периодической системы толстых экранов, перфорированных прямоугольными волноводами:

$a=0.575\lambda$ ;  $b=0.25\lambda$ ;  $d_1=0.625\lambda$ ;  $d_2=0.3\lambda$ ;  $h=\lambda$

После определения постоянной распространения собственной волны периодической структуры из (5), может быть построен оператор отражения  $R$  полубесконечной структуры по формуле:

$$R = (I - tee^{i\beta L})^{-1}r. \quad (6)$$

На рис. 6 представлена зависимость модуля коэффициента отражения ТЕ-волны от расстояния между экранами для полубесконечной структуры с такими же параметрами как и на рис. 5. Из графика видно, что в зонах “запирания” происходит полное отражение падающей электромагнитной волны от полубесконечной структуры.

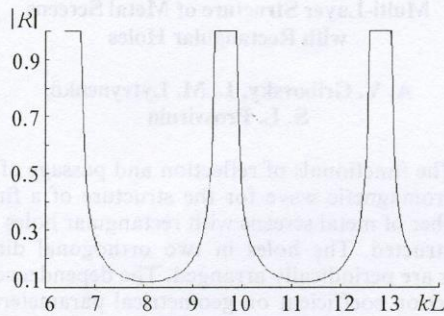


Рис. 6. Зависимость модуля коэффициента отражения ТЕ-волны от расстояния между экранами для полубесконечной структуры

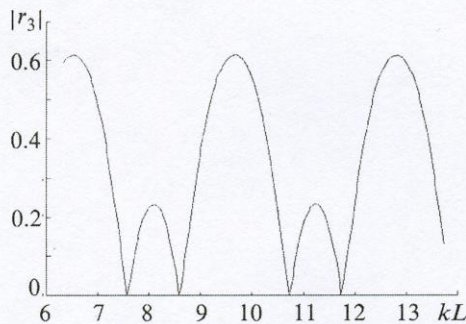


Рис. 7. Зависимость модуля коэффициента отражения ТЕ-волны от расстояния между экранами для структуры из трех ( $n=3$ ) слоев

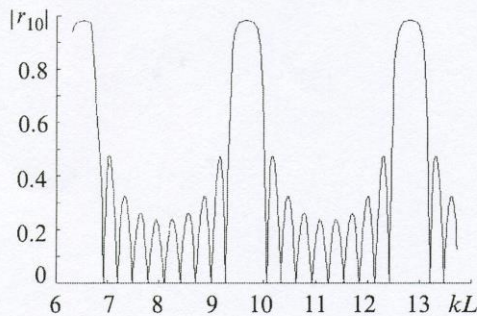


Рис. 8. Зависимость модуля коэффициента отражения ТЕ-волны от расстояния между экранами для структуры из десяти ( $n=10$ ) слоев

Вернемся к исходной задаче и рассмотрим нормальное падение плоской линейно поляризованной волны на структуру, состоящую из  $n$  слоев (рис. 1). Следуя работам [1,2], получим выражение для оператора отражения  $r_n$  и оператора прохождения  $t_n$  структуры, состоящей из  $n$  экранов:

$$r_n = R + \tau e_n \rho e_n (I - \rho e_n \rho e_n)^{-1} T, \quad (7)$$

$$t_n = \tau e_n (I - \rho e_n \rho e_n)^{-1} T, \quad n \geq 2,$$

где  $R$  – оператор отражения полубесконечной структуры;  $e_n$  – диагональная матрица с элементами  $e^{i\beta L(n-2)}$ ;  $\rho$  – оператор отражения собственной волны на границе полубесконечной структуры:

$$\rho = (I - r e R e)^{-1} (r - R) e; \quad (8)$$

$\tau$  – оператор преобразования амплитуд парциальных волн, составляющих собственную волну, в амплитуды поля в свободном пространстве:

$$\tau = t e (I + R e \rho); \quad (9)$$

$T$  – оператор преобразования амплитуд падающего поля в амплитуды парциальных составляющих собственной волны периодической структуры:

$$T = e_L e^{-1}, \quad (10)$$

где  $e_L$  – диагональная матрица с элементами  $e^{i\beta L}$ .

Таким образом, выражения (6)-(10) есть решение поставленной задачи дифракции волн на многослойной структуре из экранов конечной толщины с прямоугольными отверстиями, расположенными периодически в двух ортогональных направлениях.

На рис. 7 и рис. 8 представлены зависимости модулей коэффициентов отражения от расстояния между экранами для структуры из трех ( $n=3$ ) и десяти ( $n=10$ ) экранов соответственно с параметрами:  $a = 0.575\lambda$ ;  $b = 0.25\lambda$ ;  $d_1 = 0.625\lambda$ ;  $d_2 = 0.3\lambda$ ;  $h = \lambda$ . Из рисунков видно, что в зонах “запирания” значение коэффициента отражения многослойной структуры при увеличении числа слоев приближается к значению коэффициента отражения полубесконечной структуры. Наличие экстремумов в областях между зонами “запирания” связано с интерференцией электромагнитной волны в областях

между слоями, а число этих экстремумов равно числу промежутков между экранами.

Применение метода анализа дифракции волн на многослойных структурах для расчета электродинамических характеристик системы из конечного числа толстых металлических экранов с прямоугольными отверстиями дало возможность получить результаты при значительно меньших затратах вычислительного характера по сравнению с другими методами, например, с методом частичных областей. Очевидно, что этот выигрыш становится наиболее существенным при большом числе слоев.

#### Литература

1. Л. Н. Литвиненко, С. Л. Просвирнин. Труды IV Международного симпозиума "Методы дискретных особенностей в задачах математической физики". Феодосия, 1997, с. 206-208
2. Д. Л. Литвиненко, Л. Н. Литвиненко, С. Л. Просвирнин. Радиофизика и радиоастрономия. 1997, 2, №4, с. 485-491.
3. Л. Н. Литвиненко, С. Л. Просвирнин. Спектральные операторы рассеяния в задачах дифракции

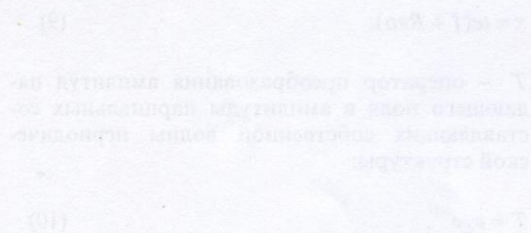
волн на плоских экранах. Киев: Наук. думка, 1984, 240 с.

4. А. В. Грибовский, С. Л. Просвирнин, И. И. Резник. Радиофизика и радиоастрономия. 1997, 2, №1, с. 52-60.
5. А. В. Грибовский, С. Л. Просвирнин. Радиотехника и электроника. 1997, 42, №9, с. 1036-1041.

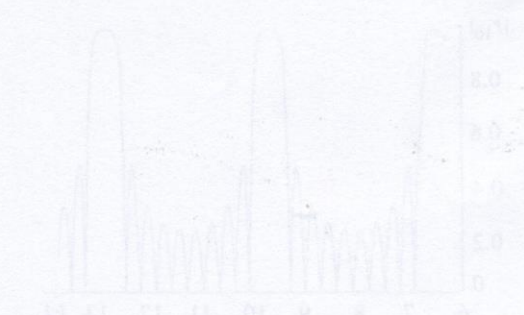
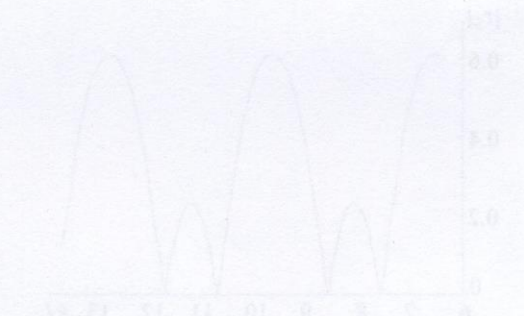
### Diffraction of Electromagnetic Waves on a Multi-Layer Structure of Metal Screens with Rectangular Holes

A. V. Gribovsky, L. M. Lytvynenko, S. L. Prosvirnin

The functionals of reflection and passage of an electromagnetic wave for the structure of a finite number of metal screens with rectangular holes are constructed. The holes in two orthogonal directions are periodically arranged. The dependence of reflection coefficient on geometrical parameters is presented. It is shown that the reflection coefficient has a maximum and changes slowly with the distance variation between screens in some intervals.



Таким образом, в работе рассмотрены вопросы дифракции электромагнитных волн на многослойных структурах с периодически расположенными отверстиями. Показано, что коэффициент отражения имеет максимум и медленно меняется с изменением расстояния между экранами в некоторых интервалах.



Таким образом, в работе рассмотрены вопросы дифракции электромагнитных волн на многослойных структурах с периодически расположенными отверстиями. Показано, что коэффициент отражения имеет максимум и медленно меняется с изменением расстояния между экранами в некоторых интервалах.