

Дифракционные свойства экрана с волноводными каналами прямоугольного поперечного сечения

А. В. Грибовский

Радиоастрономический институт НАН Украины
310002, Украина, Харьков, ул. Краснознаменная, 4

Статья поступила в редакцию 4 декабря 1997 г.

Операторным методом исследованы характеристики рассеяния плоской линейно поляризованной электромагнитной волны на сложном составном экране. Экран состоит из трех отдельных слоев. Нижний и верхний слои представляют собой экраны разной толщины с волноводными каналами прямоугольного поперечного сечения, центры которых расположены периодически вдоль осей косоугольной сетки. Средний слой представляет собой экран конечной толщины с волноводными каналами произвольной длины, плавно соединяющими волноводы в двух других экранах. На основании рассчитанных характеристик сделан вывод о том, что исследуемая модель экрана может быть использована либо в качестве облучателя гибридной зеркальной антенны, либо в качестве антенного укрытия.

Операторним методом досліджено характеристики розсіювання плоскої лінійно поляризованої електромагнітної хвилі на складному екрані. Екран складається з трьох окремих шарів. Нижній та верхній шари являють собою екрани різної товщини з хвильоводними каналами прямокутного поперечного перерізу, центри яких розташовано періодично вздовж вісей косокутної сітки. Середній шар являє собою екран скінченної товщини з хвильоводними каналами, що плавно з'єднують хвильоводи у двох інших екранах. На підставі розрахованих характеристик зроблено висновок, що досліджувана модель екрану може бути використана як опромінювач гібридної дзеркальної антени, або як антенне укриття.

Исследуемая модель экрана построена на основе известных конструкций фазированных антенных решеток (ФАР) из открытых концов волноводов. Такие решетки являются основным типом сканирующих антенн с большим уровнем передаваемой мощности, а также могут применяться в качестве облучателей гибридных зеркальных антенн (ГЗА). Приведенная в работе модель сложного составного экрана с волноводными каналами прямоугольной формы рассматривается как устройство, которое может применяться либо в качестве облучателя ГЗА, где требуется электронное сканирование лучом, либо в качестве антенного укрытия.

Сечение элементарной ячейки исследуемой модели экрана представлено на рис. 1. Экран состоит из трех частей. Две из них представляют собой экраны толщиной h_1 и h_3 , перфорированные волноводными каналами прямоугольного поперечного сечения, расположенными периодически вдоль осей косоугольной системы координат $XO\xi$ (рис. 2). Поперечное сечение волноводов выбрано так, что в них может распространяться только основной тип колебаний – волна TE_{10} , а положение центров волноводов определяется углом ψ . Эти экраны (на рис. 1 их поперечные сечения заштрихованы) сдвинуты относительно друг друга на величины Δx и Δy соответственно.

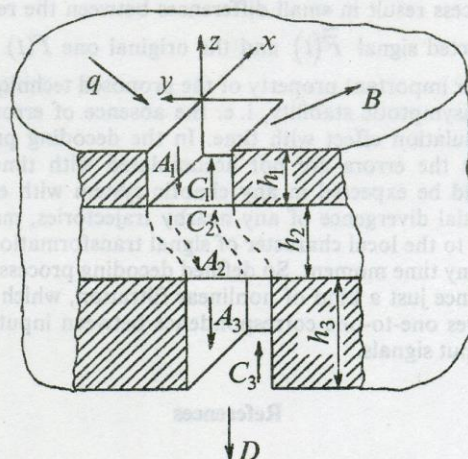


Рис. 1. Сечение элементарной ячейки

Третья часть экрана (незаштрихованная область на рис. 1) представляет собой экран толщиной h_2 с волноводными каналами прямоугольного поперечного сечения произвольной длины, в которых может распространяться только основной тип колебаний. Эти волноводные каналы плавно соединяются с волноводами в двух других экра-

нах. Предположим, что волноводные каналы в этом экране выполнены таким образом, что при возбуждении поверхности экрана плоской линейно поляризованной волной амплитуда электромагнитного поля в волноводах при переходе от одной волноводной ячейки к другой изменяется по закону

$$V_{pt} = V_{00} \exp\{i(\psi_x p + \psi_\xi t)\},$$

где (p, t) – номер волноводной ячейки, а ψ_x и ψ_ξ – фиксированные сдвиги фаз соответственно по направлениям осей Ox и $O\xi$. Как известно [1], в этом случае электромагнитное поле в свободном пространстве за экраном будет сфазированным в направлении углов ϑ и φ , определяемом соотношениями

$$\psi_x = kd_1 \sin \vartheta \cdot \cos \varphi,$$

$$\psi_\xi = kd_2 \sin \vartheta (\sin \varphi + \cos \varphi \cdot \operatorname{ctg} \psi),$$

и для его анализа можно применять методы расчетов периодических структур волноводных излучателей, возбуждение которых отвечает условиям теоремы Флоке.

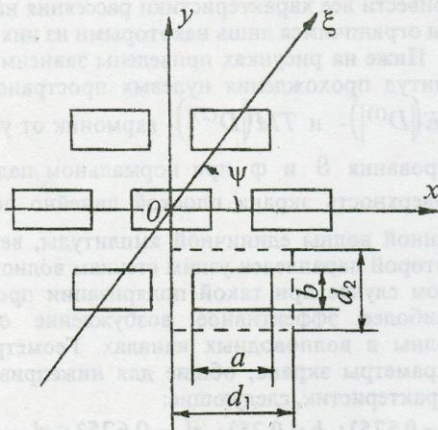


Рис. 2. Сечение экрана в плоскости $z=0$

Пусть на экран из полупространства $z>0$ (см. рис. 1) падает произвольным образом плоская линейно поляризованная волна с амплитудой q . Требуется найти электромагнитное поле, рассеянное экраном в свободное пространство. Для решения поставленной задачи воспользуемся операторным методом [2]. С учетом обозначений на

рис. 1, найдем связь между амплитудами Фурье электромагнитных волн свободного пространства и амплитудами Фурье волноводных волн:

$$B = R_+ q + T_- C_1,$$

$$A_1 = T_+ q + R_- C_1,$$

$$C_1 = e_1 T C_3 + e_1 R e_1 A_1, \quad (1)$$

$$A_3 = T e_1 A_1 + R C_3,$$

$$C_3 = e_3 R e_3 A_3,$$

$$D = e^- s^- T_- s^+ e_3 A_3,$$

где B – амплитуда Фурье отраженного поля в области $z>0$; A_k, C_k ($k=1, 3$) – амплитуды волноводных волн в экранах толщиной h_1 и h_3 ; D – амплитуда Фурье прошедшего поля; R_+, T_+ – обобщенные матрицы отражения и прохождения ФАР из полубесконечных волноводов со стороны свободного пространства; R_-, T_- – обобщенные матрицы отражения и прохождения аналогичной ФАР со стороны волноводов; R, T – обобщенные матрицы отражения и прохождения области, занятой волноводными каналами в среднем слое. Заметим, что если матрицы R_\pm, T_\pm не изменяются при переходе от одной волноводной ячейки к другой, то матрицы R, T в общем случае зависят от номера волноводной ячейки.

Операторы e_1, e_3 представляют собой диагональные матрицы, учитывающие фазовые набеги волн в волноводных каналах длиной h_1 и h_3 . Элементы этих матриц вычисляются по формулам:

$$e_1 = [\delta_{Mm} \delta_{Nn} \exp\{i\gamma_{mn} h_1\}],$$

$$e_3 = [\delta_{Mm} \delta_{Nn} \exp\{i\gamma_{mn} h_3\}],$$

где δ_{ij} – символ Кронекера; γ_{mn} – постоянная распространения волноводной волны; e^\pm, s^\pm – диагональные матрицы, учитывающие сдвиги экрана относительно соответствующих осей системы координат xuz :

$$e^{\pm} = [\delta_{Qq} \delta_{Ss} \exp\{\pm i \Gamma_{qs} H\}],$$

$$s^{\pm} = [\delta_{Qq} \delta_{Ss} \exp\{\pm i(\kappa_x \Delta_x + \kappa_y \Delta_y)\}],$$

где $H = h_1 + h_2 + h_3$; Γ_{qs} , κ_x , κ_y – постоянные распространения электромагнитных волн в свободном пространстве вдоль осей Oz , Ox и Oy соответственно.

Решение системы операторных уравнений (1) сведем к решению операторного уравнения относительно амплитуды A_1 :

$$A_1 = T_+ q + R_+ e_1 (T(I - e_3 R_+ e_3 R_+)^{-1} e_3 R_+ e_3 T e_1 + R e_1) A_1, \quad (2)$$

где I – единичный оператор. Найдя амплитуду A_1 из уравнения (2) и амплитуду C_3 из выражения

$$C_3 = (I - e_3 R_+ e_3 R_+)^{-1} e_3 R_+ e_3 T e_1 A_1, \quad (3)$$

мы тем самым найдем все неизвестные амплитуды полей, входящие в систему (1), при условии, что нам известны все обобщенные матрицы отражения и прохождения.

Матрицы R_{\pm} , T_{\pm} могут быть рассчитаны с помощью алгоритмов, разработанных в [3], где приведены результаты расчета обобщенных матриц рассеяния ФАР из полубесконечных волноводов прямоугольного поперечного сечения, центры которых размещены в узлах косоугольной сетки. Обобщенные матрицы R и T могут быть также рассчитаны с помощью известных методов решения волноводных задач, если заданы конкретные условия соединения волноводных каналов в различных экранах.

Рассмотрим случай идеального сочленения волноводных каналов в плоскостях $z = -h_1$ и $z = -(h_1 + h_2)$ и предположим, что обобщенная матрица отражения $R=0$, а элементы матрицы прохождения вычисляются по формуле

$$T = e_2 = [\delta_{Mm} \delta_{Nn} \exp\{i \psi_{pl}\}],$$

где величина ψ_{pl} определяет заданный фазовый набег в волноводных каналах среднего экрана, обеспечивающий линейный закон изменения фазы электромагнитного поля при переходе от одной

волноводной ячейки к другой. В этом случае система уравнений (1) упрощается и ее решение имеет вид:

$$A_1 = T_+ q + R_+ e_1 e_2 e_3 R_+ e_3 e_2 e_1 A_1, \quad (4)$$

$$C_1 = e_1 e_2 e_3 R_+ e_3 e_2 e_1 A_1,$$

$$B = R_+ q + T_+ C_1, \quad (5)$$

$$D = e^- s^- T_+ s^+ e_3 e_2 e_1 A_1.$$

Решения уравнения (4) и соотношения (5) позволяют найти амплитуды электромагнитных полей во всем пространстве, включая волноводные каналы.

На основе алгоритма расчета обобщенных матриц рассеяния ФАР из полубесконечных волноводов [3] и соотношений (4), (5) был разработан алгоритм, с помощью которого исследовались электродинамические характеристики рассеяния плоской линейно поляризованной электромагнитной волны на модели составного экрана с волноводными каналами прямоугольного поперечного сечения. Так как данная задача является многопараметрической задачей математической физики и в рамках настоящей работы нет возможности привести все характеристики рассеяния на экране, мы ограничимся лишь некоторыми из них.

Ниже на рисунках приведены зависимости амплитуд прохождения нулевых пространственных $TE(D^{(1)})$ - и $TM(D^{(2)})$ -гармоник от углов фазирования ϑ и φ при нормальном падении на поверхность экрана плоской линейно поляризованной волны единичной амплитуды, вектор \vec{E} которой параллелен узким стенкам волноводов. В этом случае при такой поляризации происходит наиболее эффективное возбуждение основной волны в волноводных каналах. Геометрические параметры экрана, общие для нижеприведенных характеристик, следующие:

$$a = 0,575\lambda; \quad b = 0,25\lambda; \quad d_1 = 0,625\lambda; \quad d_2 = 0,3\lambda;$$

$$\psi = 90^\circ; \quad h_1 = h_2 = h_3 = 5\lambda; \quad \Delta_x = \Delta_y = 0.$$

Углы фазирования ϑ и φ – углы сферической системы координат. При численных расчетах смещения экранов не учитывались, так как величины Δ_x , Δ_y не влияют на амплитудные характеристики прошедшего поля, поскольку смещение экранов относительно друг друга равносильно преобразованию системы координат в области $z < -H$.

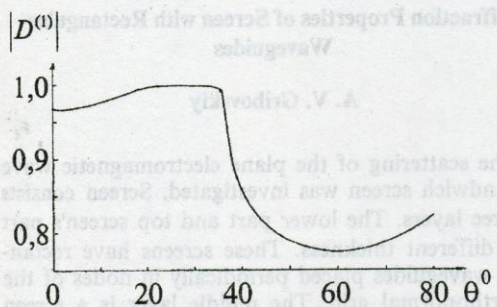


Рис. 3. Зависимость амплитуды $|D^{(1)}|$ прохождения нулевой пространственной гармоники ТЕ-волны от угла фазирования в плоскости $\varphi = 0^\circ$

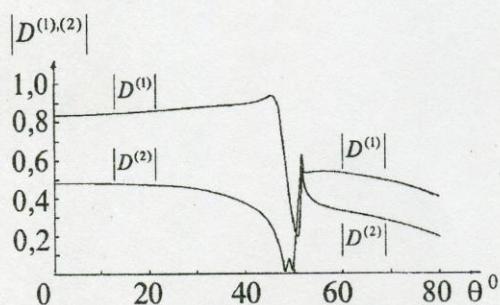


Рис. 4. Зависимость амплитуд $|D^{(1)}|$, $|D^{(2)}|$ прохождения нулевых гармоник ТЕ-, ТМ-волн от угла фазирования в плоскости $\varphi = 30^\circ$

На рис. 3 представлена зависимость амплитуды прохождения нулевой пространственной гармоники ТЕ-волны от угла фазирования ϑ в плоскости $\varphi = 0^\circ$. Амплитуда прохождения ТМ-волны в этой плоскости равна нулю. На рис. 4 представлена зависимость амплитуд прохождения ТЕ- и ТМ-волн от угла ϑ при $\varphi = 30^\circ$. На рис. 5 представлены аналогичные зависимости амплитуд прохождения от угла ϑ при $\varphi = 60^\circ$. Из графиков видно, что исследуемая модель экрана может быть использована в качестве антенного укрытия, либо в качестве облучателя гибридной зеркальной антенны, эффективно работающих в широком диапазоне изменения углов. Резкое уменьшение амплитуд прохождения вблизи углов $\varphi = 30^\circ$ и $\vartheta = 50^\circ \pm 5^\circ$ связано с теми же эффектами, что и в фазированных антенных решетках, у которых на-

блюдаются провалы в диаграмме направленности при некоторых значениях углов, называемых углами "ослепления" ФАР [1].

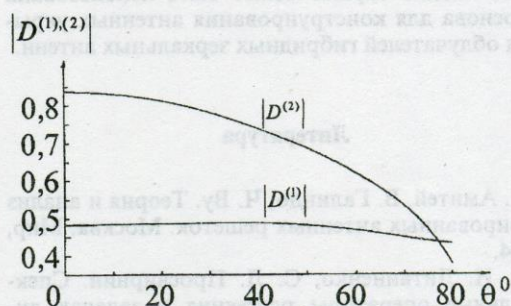


Рис. 5. Зависимость амплитуд $|D^{(1)}|$, $|D^{(2)}|$ прохождения нулевых гармоник ТЕ-, ТМ-волн от угла фазирования в плоскости $\varphi = 60^\circ$

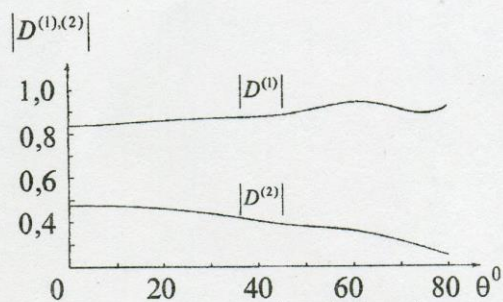


Рис. 6. Зависимость амплитуд $|D^{(1)}|$, $|D^{(2)}|$ прохождения нулевых гармоник ТЕ-, ТМ-волн от угла фазирования в плоскости $\varphi = 30^\circ$ для экрана с неортогональной сеткой

На рис. 6 представлена зависимость амплитуд прохождения ТЕ- и ТМ-волн в плоскости $\varphi = 30^\circ$ для экрана, у которого центры волноводов размещены в узлах неортогональной сетки, т. е. при $\psi = 70^\circ$. Из графиков, приведенных на рис. 4 и рис. 6 видно, что, располагая центры волноводных каналов в узлах косоугольной сетки, можно исключить пространственные резонансы электромагнитных полей, приводящие к появлению эффекта "ослепления" у экрана с прямоугольной сеткой расположения центров волноводных каналов.

Применение операторного метода для решения многопараметрической задачи рассеяния позволило разработать эффективный алгоритм расчета основных электродинамических характеристик

сложного составного экрана с волноводными каналами прямоугольного поперечного сечения, центры которых расположены в узлах неортогональной системы координат. Показано, что исследуемая модель экрана может быть использована как основа для конструирования антенных укрытий и облучателей гибридных зеркальных антенн.

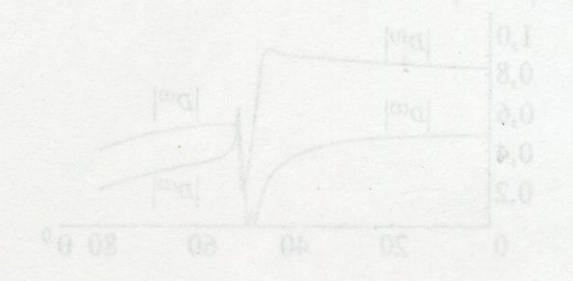
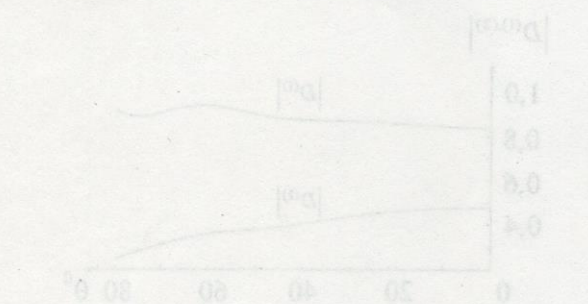
Diffraction Properties of Screen with Rectangular Waveguides

A. V. Gribovskiy

The scattering of the plane electromagnetic wave by sandwich screen was investigated. Screen consists of three layers. The lower part and top screen's part have different thickness. These screens have rectangular waveguides placed periodically in nodes of the nonorthonormal grid. The middle layer is a screen with rectangular waveguides which join smoothly the waveguides in other screens. This model of the sandwich screen may be used as the irradiator of hybrid reflector antenna or antenna's shelter.

Литература

1. Н. Амтей, В. Галиндо, Ч. Ву. Теория и анализ фазированных антенных решеток. Москва, Мир, 1974.
2. Л. Н. Литвиненко, С. Л. Просвирнин. Спектральные операторы рассеяния в задачах дифракции волн на плоских экранах. Киев, Наук. думка, 1984.
3. А. В. Грибовский, С. Л. Просвирнин, И. И. Резник. Радиофизика и радиоастрономия. 1997, 2, №1, с. 52-60.



На рис. 6 представлена зависимость амплитуды прохождения TM -волн от угла формирования θ в плоскости $\phi = 30^\circ$ для экранов с волноводными каналами. Видно, что амплитуда $|D_0|$ уменьшается с увеличением угла, а амплитуда $|D_1|$ увеличивается. На рис. 7 представлено сравнение амплитуды $|D_0|$ для экранов с волноводными каналами и для экрана без волноводных каналов. Видно, что амплитуда $|D_0|$ для экрана с волноводными каналами значительно превышает амплитуду $|D_0|$ для экрана без волноводных каналов.

На рис. 7 представлена зависимость амплитуды прохождения TM -волн от угла формирования θ в плоскости $\phi = 30^\circ$. Амплитуда $|D_0|$ увеличивается с увеличением угла, а амплитуда $|D_1|$ уменьшается. На рис. 8 представлено сравнение амплитуды $|D_0|$ для экранов с волноводными каналами и для экрана без волноводных каналов. Видно, что амплитуда $|D_0|$ для экрана с волноводными каналами значительно превышает амплитуду $|D_0|$ для экрана без волноводных каналов.