

Наклонное падение электромагнитной волны на плоский двухэлементный экран конечной толщины с прямоугольными отверстиями

А. В. Грибовский

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

Статья поступила в редакцию 30 ноября 2009 г.

Установлено, что частотная зависимость модуля коэффициента отражения электромагнитной волны от поверхности экрана при наклонном падении подобна той, что наблюдается при нормальном падении. Значения резонансных частот высокочастотных резонансов полного прохождения, полного отражения и “аномального” прохождения через заперделные отверстия сдвигаются либо в область более высоких частот, либо в область более низких частот в зависимости от способа возбуждения экрана и способа размещения центров базовых ячеек в плоскости раскрытия. При наклонном падении электромагнитной волны обнаружен еще один “аномальный” резонанс полного прохождения через заперделные прямоугольные отверстия. Использование экрана с косоугольной сеткой позволяет получить более широкий диапазон рабочих частот, чем у экрана с прямоугольной сеткой.

1. Введение

В работах [1, 2] представлены результаты исследований частотно-избирательных свойств двумерно периодического двухэлементного идеально проводящего экрана конечной толщины h с прямоугольными отверстиями при нормальном падении на его поверхность плоской линейно поляризованной электромагнитной волны. Поперечное сечение базовой ячейки и фрагмент экрана с косоугольной сеткой изображены на рис. 1, где $a_{1,2}$, $b_{1,2}$ – размеры широких и узких стенок отверстий соответственно, а точками обозначены координаты центров отверстий $(x_{1,2}, y_{1,2})$ на базовой ячейке экрана. Отверстия в экране конечной толщины рассматриваются как отрезки волноводов прямоугольного сечения. В исследуемом частотном диапазоне либо в волноводах распространяется только основная TE_{10} -волна, либо волноводы являются заперделными. Центры базовых ячеек экрана располагаются в узлах прямоугольной сетки.

Исследование электродинамических свойств двухэлементного экрана из отрезков прямоугольных волноводов открыло широкие перспективы для использования такой структуры в различных устройствах СВЧ в качестве фильтров, частотно-селективных поверхностей и преобразователей поляризации электромагнитных волн. Обнаружен “аномальный” резонанс полного прохождения электромагнитной волны через заперделные прямоугольные отверстия. Наличие высокочастотных резонансов полного прохождения и полного отражения электромагнитных волн и возможность их получения с помощью изменения только геометрических параметров экрана, простота в изготовлении и механическая прочность позволяют использовать эту структуру в многочастотных антенных системах. Преимуществом многоэлементных частотно-селективных поверхностей является возможность получения высокой добротности резонансов при очень малой по сравнению с длиной волны толщине структуры.

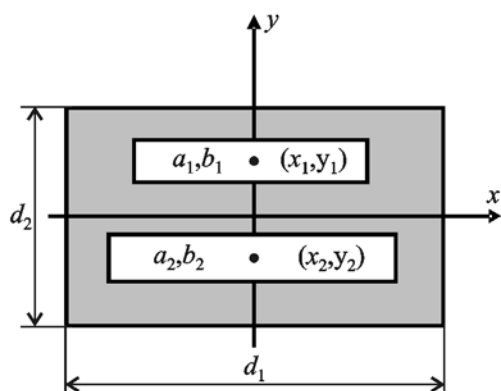
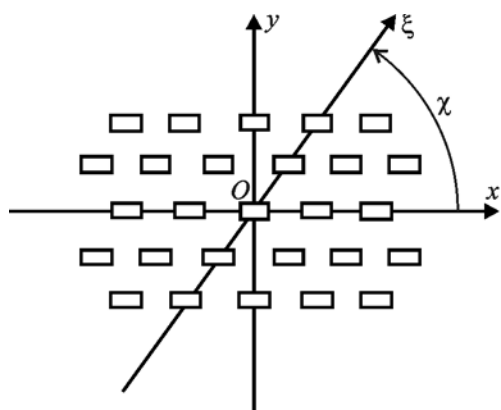


Рис. 1. Фрагмент решетки с косоугольной сеткой и базовая ячейка экрана

В работе [3] было проведено более детальное исследование частотно-селективных свойств экрана с прямоугольной сеткой. На рис. 2 представлена зависимость модуля коэффициента отражения от частоты при нормальном падении на экран плоской линейно поляризованной волны. Цифрами пронумерованы резонансы начиная с самого высокочастотного. На основании анализа амплитудно-частотного распределения ближнего поля двухэлементного экрана конечной толщины с прямоугольными отверстиями установлено следующее. Природа высокочастотных резонансов полного прохождения (3, 7), полного отражения (2, 5) и “аномального” прохождения электромагнитных волн через запердельные отверстия (8) (на рисунке этот резонанс обозначен сплошной вертикальной стрелкой) одна и та же и связана с возбуждением поверхностных гармоник

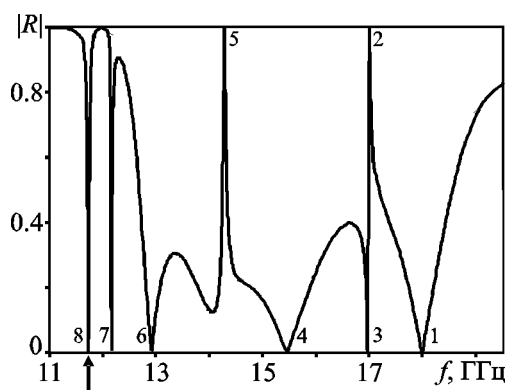


Рис. 2. Зависимость модуля коэффициента отражения от частоты при нормальном падении на экран плоской линейно поляризованной волны

большой амплитуды, распространяющихся парами навстречу друг другу вдоль всей поверхности экрана с обеих сторон. На частотах низкодобротных резонансов полного прохождения электромагнитных волн (1, 4, 6), связанных с толщиной экрана, поверхностные гармоники возбуждаются с амплитудами, величины которых на порядок меньше, чем в случае высокочастотных резонансов.

Исследования, проведенные в вышеупомянутых работах, проводились исключительно для случаев нормального падения плоской линейно поляризованной волны на поверхность экрана. Кроме того, рассматривалась модель экрана, центры базовых ячеек которого располагались в узлах прямоугольной сетки ($\chi = 90^\circ$ на рис. 1).

Представляет значительный интерес исследование частотно-избирательных свойств экрана при наклонном падении плоской линейно поляризованной TE - или TM -волны при условии, что вектор напряженности электрического поля падающей волны ортогонален широким стенкам волноводных каналов. При таком направлении вектора поляризации падающей волны происходит наиболее эффективное возбуждение основной волны в отрезках прямоугольных волноводов. Кроме того, как показали проведенные ранее исследования [4], существенное влияние на амплитудно-частотную характеристику такого экрана может оказывать выбор способа размещения центров базовых

ячеек в плоскости раскрыва экрана. Подобные исследования на двухэлементных экранах с заперделными прямоугольными отверстиями, расположенными в узлах косоугольной сетки, ранее не проводились.

Поэтому целью настоящей работы является исследование электродинамических свойств двумерно периодического двухэлементного идеально проводящего экрана конечной толщины с прямоугольными отверстиями при наклонном падении на его поверхность плоской линейно поляризованной *TE*- или *TM*-волны.

2. Постановка задачи и метод решения

Будем исследовать электромагнитное поле, рассеянное экраном, при произвольном падении на его поверхность плоской линейно поляризованной электромагнитной волны единичной амплитуды. Поперечную компоненту электрического поля падающей волны представим в виде суммы *TE*- и *TM*-волны:

$$\vec{E}_t^i(x, y, z) = \cos \alpha \vec{\Psi}_{00}^{(1)} e^{-i\Gamma_{00}z} + \sin \alpha \cos \theta_0 \vec{\Psi}_{00}^{(2)} e^{-i\Gamma_{00}z}, \quad z > 0. \quad (1)$$

А поперечную компоненту электрического поля отраженной волны представим в виде разложения по полной системе ортонормированных векторных пространственных *TE*- и *TM*-гармоник:

$$\vec{E}_t^r(x, y, z) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sum_{s=-\infty}^{\infty} r_{qs}^{(1)} \vec{\Psi}_{qs}^{(1)} e^{i\Gamma_{qs}z} + \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sum_{s=-\infty}^{\infty} r_{qs}^{(2)} \vec{\Psi}_{qs}^{(2)} e^{i\Gamma_{qs}z}, \quad z > 0.$$

Здесь $r_{qs}^{(1)}$ и $r_{qs}^{(2)}$ – неизвестные амплитуды пространственных *TE*- и *TM*-гармоник соответственно, зависимость от времени выбрана в виде $e^{-i\omega t}$, ортонормированные векторные пространственные гармоники определяются по формулам:

$$\vec{\Psi}_{qs}^{(l)} = \exp\{i(\kappa_x x + \kappa_y y)\} (S_0)^{-0.5} \kappa_r^{-1} \times$$

$$\times \begin{cases} \kappa_y \vec{e}_x - \kappa_x \vec{e}_y, & l=1 \\ \kappa_x \vec{e}_x + \kappa_y \vec{e}_y, & l=2 \end{cases},$$

$$\kappa_x = k \sin \theta_0 \sin \phi_0 - 2\pi q/d_1;$$

$$\kappa_y = k \sin \theta_0 \cos \phi_0 - 2\pi s/d_2 + 2\pi q/(d_1 \operatorname{tg} \chi);$$

$$\Gamma_{qs} = (k^2 - \kappa_r^2)^{0.5}; \quad \kappa_r = (\kappa_x^2 + \kappa_y^2)^{0.5}; \quad k = 2\pi/\lambda;$$

$\Gamma_{00} = k \cos \theta_0$; $S_0 = d_1 d_2$ – площадь поперечного сечения волноводной ячейки; \vec{e}_x, \vec{e}_y – единичные орты в декартовой системе координат xOy . Углы θ_0 и ϕ_0 – углы падения плоской волны в сферической системе координат. Угол поляризации α определен в плоскости, в которой лежат векторы \vec{E}^i и \vec{H}^i полного электромагнитного поля. Угол α отсчитывается против часовой стрелки от прямой, параллельной плоскости xOy , до вектора \vec{E}^i . *TE*-волне соответствует значение угла $\alpha = 0^\circ$ (180°), *TM*-волне – $\alpha = 90^\circ$ (270°).

Для нахождения неизвестных амплитуд пространственных гармоник и неизвестных амплитуд волноводных волн применим операторный метод решения задач дифракции [5]. Система операторных уравнений и ее решение относительно неизвестных амплитуд пространственных гармоник для модели исследуемой решетки приведены в работе [1].

3. Анализ численных результатов

Исследуем вначале частотно-селективные свойства экрана с прямоугольной сеткой. Параметры экрана выберем такие же, как и в работе [3]: $a_1 = 12.5$ мм, $b_1 = 2.5$ мм, $x_1 = 0$, $y_1 = 2.5$ мм, $a_2 = 12$ мм, $b_2 = 2.5$ мм, $d_1 = d_2 = 15$ мм, $x_2 = 0$, $y_2 = -2.5$ мм, $\chi = 90^\circ$. Толщина экрана $h = 30$ мм.

В выбранном диапазоне частот распространяется только одна пространственная гармоника, а значение критической частоты для прямоугольного волновода с большим поперечным сечением $a_1 \times b_1$ составляет 12 ГГц.

На рис. 3, а представлены зависимости от частоты модуля коэффициента отражения *TE*-волны, а на рис. 3, б – зависимости от частоты модуля поперечной составляющей отра-

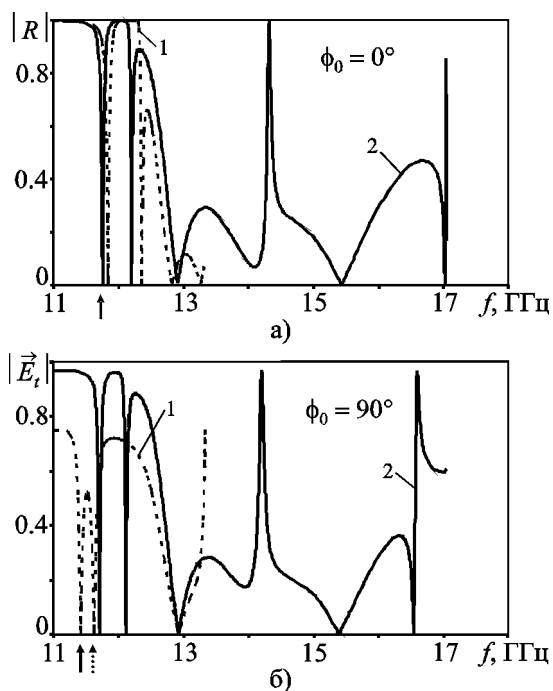


Рис. 3. Зависимости от частоты модуля коэффициента отражения *TE*-волны (а) и модуля поперечной составляющей отраженного электрического поля *TM*-волны (б) при наклонном падении: кривые 1 – $\theta_0 = 30^\circ$; кривые 2 – $\theta_0 = 10^\circ$

женного электрического поля *TM*-волны для различных углов падения. Кривые, рассчитанные для случаев наклонного падения, ограничены сверху при тех значениях частот, на которых возникает следующая, после основной волны, распространяющаяся пространственная гармоника. Из выражения (1) видно, что амплитуда поперечной составляющей электрического поля падающей *TM*-волны зависит от угла падения θ_0 . Поэтому на рис. 3, б значение модуля амплитуды поперечной составляющей отраженного электрического поля *TM*-волны, при углах падения $\theta_0 \neq 0$ меньше единицы на частотах резонансов полного отражения электромагнитного поля.

Из рисунков видно, что при наклонном падении плоской *TE*-волны графики частотных зависимостей сдвигаются в область более высоких частот, а при падении *TM*-волны – в область более низких частот. Значения частот “аномальных” резонансов полного прохождения

электромагнитной волны через запердельные прямоугольные отверстия (на рисунках обозначены сплошными вертикальными стрелками) также сдвигаются. При возбуждении экрана *TE*-волной – в область более высоких частот, а при возбуждении *TM*-волной – в область низких частот. Кроме того, при наклонном падении *TM*-волны под углом $\theta_0 = 30^\circ$ обнаружен еще один “аномальный” резонанс полного прохождения электромагнитной волны через запердельные прямоугольные отверстия. Этот резонанс на рис. 3, б обозначен пунктирной стрелкой, он также связан с возбуждением поверхностных гармоник большой амплитуды, распространяющихся парами навстречу друг другу вдоль всей поверхности экрана с обеих сторон.

Электродинамический анализ свойств перфорированного экрана с косоугольной сеткой показал, что при нормальном падении плоской волны на его поверхность зависимость модуля коэффициента отражения от частоты такая же, как и для экрана, у которого центры базовых ячеек расположены в узлах прямоугольной сетки. Результаты численных расчетов селективных свойств экрана с косоугольной сеткой при наклонном падении плоской волны представлены на рис. 4. Здесь также кривые ограничены по частоте сверху в точках возникновения следующей распространяющейся пространственной гармоники.

Видно, что значения резонансных частот полного прохождения электромагнитной волны через запердельные прямоугольные отверстия в экране с косоугольной сеткой сдвигаются относительно соответствующих значений для экрана с прямоугольной сеткой. Однако они сдвигаются в область более низких частот как при возбуждении *TE*-волной, так и при возбуждении *TM*-волной. Причем при возбуждении экрана *TM*-волной этот сдвиг больше, чем при возбуждении экрана *TE*-волной. Более того, как видно из зависимостей на рис. 4, а, применение экрана с косоугольной сеткой в качестве частотно-селективной поверхности позволяет получить более широкий рабочий одноволновый диапазон частот, чем у экрана с прямоугольной сеткой.

Значительный интерес представляет исследование зависимости амплитуды прошедшего за экран поля от угла падения волны на частоту

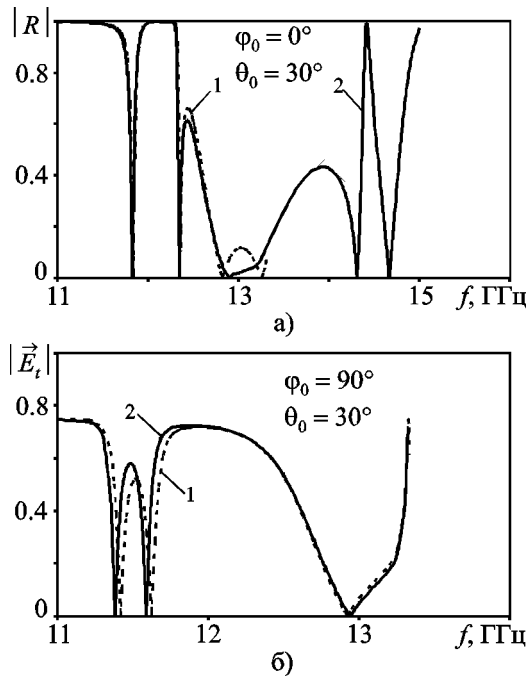


Рис. 4. Зависимости от частоты модуля коэффициента отражения TE -волны (а) и модуля поперечной составляющей отраженного электрического поля TM -волны (б) при наклонном падении на экран с косоугольной сеткой: кривые 1 – $\chi = 90^\circ$; кривые 2 – $\chi = 60^\circ$

те “аномального” резонанса полного прохождения электромагнитной волны. На рис. 5 приведены зависимости модулей поперечных составляющих электрического поля прошедших TE ($|E_t^{(1)}|$) и TM ($|E_t^{(2)}|$) волн от угла падения θ на частоте $f = 11.7333$ ГГц, соответствующей частоте “аномального” полного прохождения электромагнитной волны через запредельные прямоугольные отверстия. Из рисунка видно, что при углах падения $\theta \leq 5^\circ$ наблюдается практически полное прохождение электромагнитного поля через запредельные отверстия как в случае падения TE -волны, так и в случае падения TM -волны.

4. Выводы

Таким образом, результаты исследований частотно-селективных свойств двумерно периодического двухэлементного идеально про-

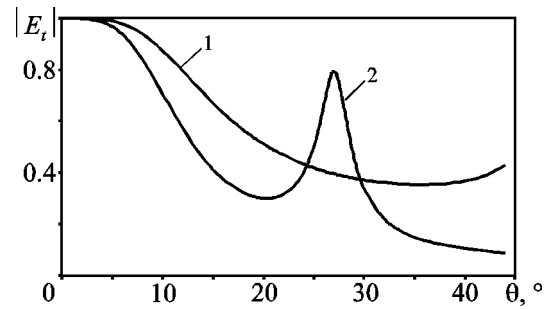


Рис. 5. Зависимости модулей амплитуд поперечных составляющих электрического поля прошедших волн от угла падения на частоте “аномального” резонанса полного прохождения $f = 11.7333$ ГГц: кривая 1 – $E_t^{(1)}$; кривая 2 – $E_t^{(2)}$

водящего экрана конечной толщины с запредельными прямоугольными отверстиями позволяют сделать следующие выводы. Закон изменения модуля коэффициента отражения электромагнитной волны от поверхности экрана при наклонном падении волны остается таким же, как и при нормальном падении. Однако значения резонансных частот высокочастотных резонансов полного прохождения, полного отражения и “аномального” прохождения через запредельные отверстия сдвигаются либо в область более высоких частот, либо в область более низких частот в зависимости от способа возбуждения экрана и способа размещения центров базовых ячеек в плоскости раскрыва. Кроме того, при наклонном падении электромагнитной волны обнаружен еще один “аномальный” резонанс полного прохождения через запредельные прямоугольные отверстия. Значения резонансных частот низкочастотных резонансов полного прохождения электромагнитных волн, связанных с толщиной экрана, изменяются незначительно. Использование косоугольной сетки вместо прямоугольной позволяет расширить диапазон рабочих частот экрана.

Литература

1. Грибовский А. В., Просвирнин С. Л. Частотно-избирательные свойства многоэлементного экрана с волноводными каналами прямоугольного сечения //

Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. – 2004. – Т. 9, №2. – С. 341-346.

2. Грибовский А. В. Частотно-избирательные и поляризационные свойства двухэлементных периодических экранов конечной толщины с прямоугольными отверстиями и волноводными нагрузками // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – Т. 11, №2-3. – С. 84-92.
3. Грибовский А. В. Аномальное прохождение электромагнитных волн через прямоугольные запердельные отверстия в идеально проводящем экране конечной толщины // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, №3. – С. 287-292.
4. Грибовский А. В. Дифракционные свойства экрана с волноводными каналами прямоугольного поперечного сечения // Радиофизика и радиоастрономия. – 1997. – Т. 2, №4. – С. 480-484.
5. Литвиненко Л. Н., Просвирнин С. Л. Спектральные операторы рассеяния в задачах дифракции волн на плоских экранах. – Киев: Наук. Думка, 1984. – 240 с.

Похи́ле па́діння електромагнітної хвилі на плоский двоелементний екран скінченної товщини з прямокутними отворами

О. В. Грибовський

Встановлено, що частотна залежність модуля коефіцієнта відбиття електромагнітної хвилі від поверхні екрану при похилому падінні залишається подібною до такої за нормального падіння. Значення резонансних частот високودобротних резонансів повного проходження, повного відбиття та “аномального” проходження через позамежні отвори зсуваються або в область вищих частот, або в область нижчих частот залежно від способу збудження екрану і способу розташування центрів базових комірок у площині розкриву. При похилому падінні електромагнітної хвилі знайдено ще один “аномальний” резонанс повного проходження через позамежні прямокутні отвори. Використання екрана з косокутною сіткою дозволяє отримати ширший діапазон робочих частот ніж у екрана з прямокутною сіткою.

Electromagnetic Wave Oblique Incidence on a Planar Double-Element Finite-Depth Screen with Rectangular Holes

A. V. Gribovsky

Frequency dependence of the coefficient of oblique incident electromagnetic wave reflection from a screen surface is shown to be similar to that at normal incidence. Values of resonant frequencies of high-Q resonances of the total transmission, total reflection and “abnormal” transmission through evanescent-mode holes shift to higher or lower frequencies depending on screen feeding method and on method of basic cell center arrangement in an aperture plane. At oblique incidence of electromagnetic wave one more “abnormal” resonance of the total propagation through evanescent-mode rectangular holes has been revealed. Use of the screen with a nonrectangular array allows to widen a screen operating range against that of the screen with a rectangular array.