

## **Преобразование поляризации электромагнитных волн на плоском двухэлементном экране конечной толщины с волноводными каналами прямоугольного сечения**

**А. В. Грибовский**

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

*Статья поступила в редакцию 23 сентября 2004 г.*

Исследованы частотные и поляризационные характеристики электромагнитного поля, рассеянного на плоском двухэлементном экране конечной толщины с периодически расположенными прямоугольными отверстиями. Проведен анализ поляризации отраженной и прошедшей волны для различных параметров падающей плоской волны и геометрических размеров экрана. Показана возможность преобразования линейно поляризованной волны в волну с круговой поляризацией.

Поляризационные эффекты используются в различных устройствах (поляризаторы, деполяризаторы, антенны для приема сигналов с вращающейся поляризацией и др.), связанных с излучением или приемом волн любой поляризации.

Поляризаторы и деполяризаторы представляют собой устройства, которые преобразуют эллиптическую (или круговую) поляризацию падающей волны в линейную поляризацию прошедшей волны и наоборот [1]. Эти устройства в настоящее время широко используются в приемно-передающих комплексах спутникового телевидения и в других системах [2].

В микроволновой технике широко применяются антенны, позволяющие излучать и принимать электромагнитные поля с вращающейся поляризацией. Большой интерес представляют антенны с круговой поляризацией, выполненные в виде крестообразных волноводно-щелевых излучателей. В работе [3] показано, что излучение с круговой поляризацией в системе крестообразных щелей можно получить, поместив в волновод нагрузку с управляемыми мо-

дулем и фазой коэффициента отражения. В [4] приведены результаты расчета волноводно-щелевого излучателя в виде двух близких определенным образом расположенных ортогональных прямоугольных щелей в широкой стенке прямоугольного волновода. Показано, что такая система излучателей может независимо излучать электромагнитную волну либо с левой, либо с правой круговой поляризацией.

В открытых системах для преобразования поляризации электромагнитных волн применяют различные экраны и покрытия. В режиме отражения часто используют покрытия в виде решеток из микрополосковых элементов сложной формы [5, 6]. К их недостаткам относятся низкая механическая прочность, изменение характеристик под воздействием атмосферных явлений и наличие потерь мощности в диэлектрической подложке.

Поляризационные характеристики экранов с крестообразными щелями не представляют большого интереса, так как с их помощью не удастся получить эффективно-

го преобразования поляризации электромагнитных волн. Известно, что для преобразования линейно поляризованной волны в эллиптически поляризованную или в волну с круговой поляризацией необходимо, чтобы амплитуды ортогональных компонент электрического поля в щелях  $E_x$  и  $E_y$  были приблизительно равны друг другу, а разность фаз между ними составляла  $\approx 90^\circ$ . Эти условия трудно выполнимы для бесконечно тонких экранов, перфорированных крестообразными отверстиями.

В настоящей работе предлагается и исследуется модель поляризационного преобразователя в виде идеально проводящего двухэлементного экрана конечной толщины с периодически расположенными в двух неортогональных направлениях волноводными каналами прямоугольного поперечного сечения. Базовая ячейка экрана содержит два прямоугольных волновода, широкие и узкие стенки которых взаимно ортогональны. На рис. 1 представлено поперечное сечение базовой ячейки двухэлементного экрана. Периоды структуры вдоль осей  $x$  и  $y$  равны  $d_1$  и  $d_2$ . Центры ячеек, в общем случае, размещены в узлах косоугольной сетки. Площади поперечных сечений волноводов равны  $a_1 \times b_1$  и  $a_2 \times b_2$ , где  $a_j$  – размер волновода вдоль оси  $x$ ,  $b_j$  – вдоль оси  $y$ . Размеры волноводов выбраны такими, что в них может распространяться только основная  $TE_{10}$ -волна. Положение волноводов на базовой ячейке в плоскости  $z=0$  определяется координатами их центров  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$ . Толщина экрана равна  $h$ .

Исследуем амплитудно-частотные и поляризационные характеристики экрана при

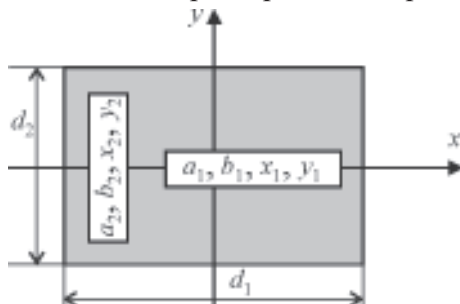


Рис. 1. Базовая ячейка двухэлементного экрана

произвольном падении на его поверхность плоской линейно поляризованной волны.

Пусть на экран из области  $z > 0$  под произвольным углом падает плоская линейно поляризованная электромагнитная волна единичной амплитуды. Поперечную компоненту электрического поля падающей волны представим в виде суммы  $TE$ - и  $TM$ -волн:

$$\vec{E}_t^i(x, y, z) = \cos \alpha_0 \vec{\psi}^{(1)} e^{-i\Gamma z} + \sin \alpha_0 \cos \vartheta \vec{\psi}^{(2)} e^{-i\Gamma z}, \quad z > 0, \quad (1)$$

где векторные функции  $\vec{\psi}^{(1,2)}$  являются ортонормированными на базовой ячейке периодической структуры, с нормировкой на величину  $1/\sqrt{S_0}$ , и вычисляются по формулам:

$$\vec{\psi}^{(1)} = \exp\{i(k_x x + k_y y)\} \frac{(k_y \vec{e}_x - k_x \vec{e}_y)}{\sqrt{S_0} k_r},$$

$$\vec{\psi}^{(2)} = \exp\{i(k_x x + k_y y)\} \frac{(k_x \vec{e}_x + k_y \vec{e}_y)}{\sqrt{S_0} k_r},$$

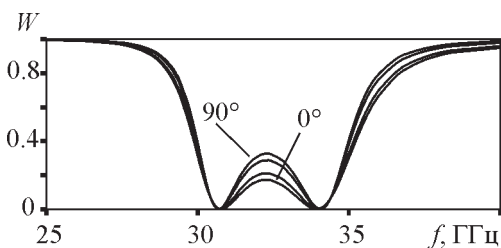
$$k_x = k \sin \vartheta \sin \varphi, \quad k_y = k \sin \vartheta \cos \varphi;$$

$\Gamma = k \cos \vartheta$ ;  $S_0 = d_1 d_2$  – площадь поперечного сечения волноводной ячейки;  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\vec{e}_x, \vec{e}_y$  – единичные орты декартовой системы координат. Углы  $\vartheta$  и  $\varphi$  – углы падения плоской волны в сферической системе координат. Угол поляризации  $\alpha_0$  определен в плоскости, содержащей векторы полного электрического  $\vec{E}^i$  и магнитного  $\vec{H}^i$  полей падающей плоской волны. Он отсчитывается в направлении против движения часовой стрелки от прямой, параллельной плоскости  $xOy$ , до вектора  $\vec{E}^i$ . Значение угла  $\alpha_0 = 0^\circ(180^\circ)$  соответствует  $TE$ -волне, значение  $\alpha_0 = 90^\circ(270^\circ)$  –  $TM$ -волне. В случае нормального падения плоской волны на экран векторы  $\vec{E}^i$  и  $\vec{H}^i$  лежат в плоскости, параллельной плоскости  $xOy$ .

Исследуем вначале амплитудно-частотную характеристику двухэлементного экрана в зависимости от угла поляризации  $\alpha_0$  падающей волны. Алгоритм расчета харак-

теристик рассеяния двумерно периодических экранов конечной толщины, перфорированных отверстиями разнообразной формы, основан на использовании операторного метода решения задач дифракции [7]. В работе [8] описан алгоритм расчета операторов рассеяния многоэлементного экрана с волноводными каналами прямоугольного сечения, а система операторных уравнений относительно неизвестных амплитуд пространственных гармоник и волноводных волн и способ ее решения представлены в работе [9].

На рис. 2 приведены графики зависимости коэффициента отражения по мощности  $W$  от частоты для различных углов поляризации при нормальном падении плоской волны на экран, центры волноводных ячеек которого расположены в узлах прямоугольной сетки. Параметры экрана имеют следующие значения:  $a_1 = 4.8$  мм,  $b_1 = 1$  мм,  $x_1 = 0.75$  мм,  $y_1 = 0$ ,  $a_2 = 1$  мм,  $b_2 = 4.8$  мм,  $x_2 = -2.65$  мм,  $y_2 = 0$ ,  $d_1 = 7.3$  мм,  $d_2 = 7$  мм,  $h = 6$  мм. Из рисунка видно, что исследуемая структура представляет собой частотно-селективную поверхность с двумя резонансами полного прохождения, не зависящими от поляризации падающей волны. Частотный диапазон выбран из условия распространения только одной пространственной гармоники. Частотная характеристика двухэлементного экрана конечной толщины при фиксированной поляризации падающего поля качественно совпадает с частотной характеристикой бесконечно



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента отражения по мощности от частоты для различных углов поляризации падающего поля

тонкого экрана с крестообразными щелями, помещенного в слой диэлектрика [6]. Частотно-селективные свойства бесконечно тонких экранов, перфорированных крестообразными отверстиями, исследовались также в работах [10, 11].

Эффективное преобразование поляризации на двухэлементном экране конечной толщины с ортогональными волноводными каналами различных поперечных сечений можно получить путем подбора соответствующей толщины экрана  $h$  и размеров широких стенок волноводных каналов  $a_1$  и  $b_2$ .

Для описания поляризационных характеристик воспользуемся параметрами Стокса  $S_a = S_0 \{1; S_1; S_2; S_3\}$  [12], где  $S_0$  – интенсивность электромагнитной волны. Для полностью поляризованной плоской монохроматической волны параметры Стокса, нормированные на интенсивность  $S_0$ , имеют вид:

$$S_1 = \cos 2\alpha \cos 2\beta; \quad S_2 = \cos 2\alpha \sin 2\beta; \\ S_3 = \sin 2\alpha,$$

где угол  $\beta$  определяет ориентацию эллипса поляризации, угол  $\alpha$  характеризует коэффициент эллиптичности и направление вращения вектора электрического поля в ортогональной системе координат  $\xi\eta\zeta$ , ось  $O\zeta$  совпадает с направлением волнового вектора. В случае нормального падения система координат  $\xi\eta\zeta$  совпадает с системой координат  $xuz$ . Для некоторых частных случаев полностью поляризованной волны параметры Стокса имеют следующие значения:

$S_a = S_0 \{1; 0; 0; 1\}$  – правая круговая поляризация;

$S_a = S_0 \{1; 0; 0; -1\}$  – левая круговая поляризация;

$S_a = S_0 \{1; 1; 0; 0\}$  – линейная поляризация вдоль оси  $O\xi$ ;

$S_a = S_0 \{1; -1; 0; 0\}$  – линейная поляризация вдоль оси  $O\eta$ ;

$S_a = S_0 \{1; 0; 1; 0\}$  – линейная поляризация под углом  $45^\circ$  к оси  $O\xi$ ;

$S_a = S_0 \{1; 0; -1; 0\}$  – линейная поляризация под углом  $-45^\circ$  к оси  $O\xi$ .

Удобство применения параметров Стокса на практике состоит в том, что все они имеют одинаковую размерность и могут быть определены экспериментальным путем.

На рис. 3 и 4 представлены частотные характеристики параметров Стокса отраженной  $S_R = S_0 \{1; S_1; S_2; S_3\}$  и прошедшей  $S_T = S_0 \{1; S_1; S_2; S_3\}$  волн при нормальном падении плоской линейно поляризованной волны с углом поляризации  $\alpha_0 = 45^\circ$  на экран с косоугольной сеткой. Параметры экрана имеют следующие значения:  $a_1 = 4.8$  мм,  $b_1 = 1$  мм,  $x_1 = 0.75$  мм,  $y_1 = 0$ ;  $a_2 = 1$  мм,  $b_2 = 5$  мм,  $x_2 = -2.65$  мм,  $y_2 = 0$ ;  $d_1 = 7.3$  мм,  $d_2 = 7$  мм,  $h = 3$  мм. Из графиков видно, что в диапазоне частот  $25.0$  ГГц  $< f < 28.57$  ГГц отраженная и прошедшая волны являются линейно поляризованными. Направление поляризации этих волн такое же, как и в падающей волне,  $S_2 = -1$ . При этом коэффи-

циент отражения по мощности изменяется в пределах от 1.0 до 0.38. В диапазоне частот  $32.97$  ГГц  $< f < 33.71$  ГГц поляризация отраженной волны остается линейной,  $S_2 = -1$ . Поляризация прошедшей волны, оставаясь линейной, изменяет свое направление от  $-45^\circ$  к оси  $Ox$  ( $S_2 = -1$ ), до направления вдоль оси  $Oy$  ( $S_1 = -1$ ). Таким образом, направление поляризации прошедшей линейно поляризованной волны в данной полосе частот изменяется по отношению к оси  $Ox$  от  $-45^\circ$  до  $90^\circ$ , т. е. на  $135^\circ$ . Коэффициент отражения по мощности в этом диапазоне изменяется в пределах  $0.61 \div 0.65$ . В диапазоне частот  $38.96$  ГГц  $< f < 39.09$  ГГц отраженная и прошедшая волны являются эллиптически поляризованными с правой и левой поляризациями соответственно. Коэффициент эллиптичности для обеих волн составляет 0.58, а коэффициент отражения по мощности изменяется в пределах  $0.25 \div 0.27$ .

Исследовались также поляризационные характеристики рассеянного поля в зависимости от угла падения плоской линейно поляризованной волны. На рис. 5 и 6 представлены графики зависимостей параметров Стокса отраженного и прошедшего полей от угла падения плоской линейно поляризованной волны на частоте  $f = 31.58$  ГГц. Плоская ТМ-волна с углом поляризации  $\alpha_0 = 90^\circ$  падает на экран в плоскости  $\varphi = 45^\circ$ , а угол  $\theta$  изменяется в пределах  $0^\circ \div 31.5^\circ$ . Область изменения угла  $\theta$  выбрана из условия распространения одной пространственной гармоники. Из рисунков

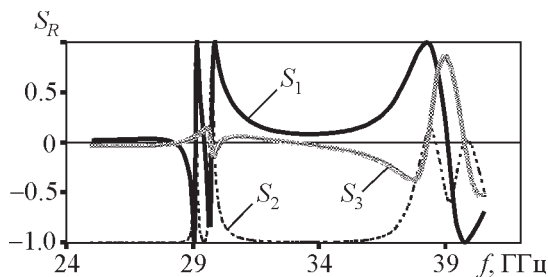


Рис. 3. Частотные зависимости параметров Стокса отраженной волны

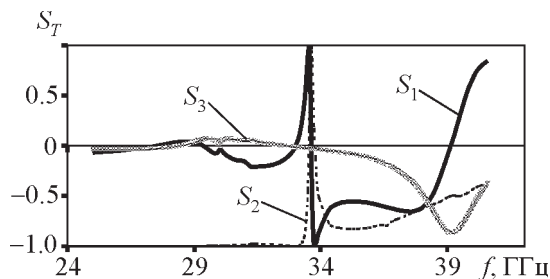


Рис. 4. Частотные зависимости параметров Стокса прошедшей волны

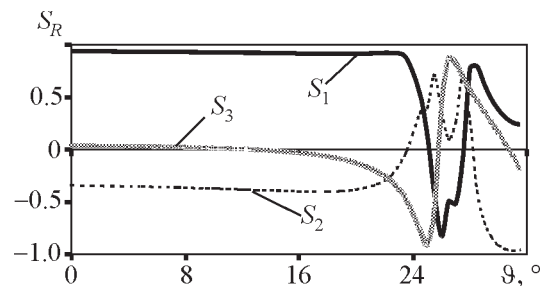
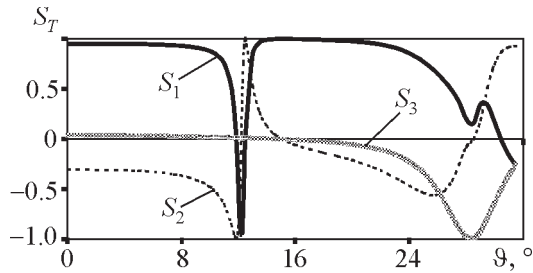


Рис. 5. Зависимости параметров Стокса отраженной волны от угла падения падающей волны



**Рис. 6.** Зависимости параметров Стокса прошедшей волны от угла падения падающей волны

видно, что в прошедшем поле в интервале углов  $12^\circ < \vartheta < 15^\circ$  наблюдается резкое изменение направления поляризации линейно поляризованной волны. При значении угла  $\vartheta = 28.5^\circ$  прошедшая волна является поляризованной по кругу с левым вращением вектора электрического поля,  $S_3 = -1$ . Коэффициент отражения по мощности во всем интервале изменения угла  $\vartheta$  лежит в пределах  $0.18 \div 0.42$ .

Проведенные исследования электродинамических свойств модели двухэлементного экрана конечной толщины с ортогональными волноводными каналами прямоугольного сечения показали, что такая поверхность может быть одновременно как частотно-селективной поверхностью, так и устройством для преобразования поляризации электромагнитных волн. Результаты анализа амплитудно-частотных и поляризационных характеристик экрана указывают на перспективность использования его в различных устройствах микроволновой техники.

### Литература

1. Канарейкин Д. Б., Павлов Н. Ф., Потехин В. А. Поляризация радиолокационных сигналов. – М.: Сов. радио, 1966. – 440 с.
2. Берсон В. Проблемы приема цифрового вещания НТВ-ПЛЮС // Телеспутник. – 1999. – Т. 44, №6. – С. 62-64.
3. Yatsuk L. P., Blinova N. K., Zhironkina A. V. Influence of Reflection Loading on the Polarization Properties of Cross-Like Slots in a Waveguide // Proc. International Conf. on Mathematical Methods

- in Electromagnetic Theory. – Kharkov (Ukraine). – 1998. – Vol. 2, P. 586-588.
4. Montisci G., Musa M., and Mazzarella G. Waveguide Slot Antennas for Circularly Polarized Radiated Field // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2004. – Vol. 52, No. 2. – P. 619-623.
5. Васильева Т. Д., Просвирнин С. Л. Дифракция электромагнитных волн на плоской решетке из киральных полосковых элементов сложной формы // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 1998. – Т. 1, №4. – С. 5-9.
6. Обуховец В. А. Микрополосковые отражательные антенные решетки // Тез. докл. Всероссийской научно-технической конференции “Излучение и рассеяние электромагнитных волн”. – Таганрог. – 2001. – С. 116-118.
7. Литвиненко Л. Н., Просвирнин С. Л. Спектральные операторы рассеяния в задачах дифракции волн на плоских экранах. – Киев: Наук. Думка, 1984. – 240 с.
8. Грибовский А. В., Просвирнин С. Л. Возбуждение многоэлементной ФАР из прямоугольных волноводов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2003. – Т. 6, №1. – С. 27-31.
9. 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.
10. Rubin V. J., Bertony N. L. Reflection from a Periodically Perforated Plane Using a Subsectional Current Approximation // IEEE Trans. Antennas Propag. – 1983. – Vol. 31, No. 6. – P. 829-836.
11. Миттра Р., Чжань Ч. Х., Куик Т. Методы анализа плоских частотно-избирательных решеток: Обзор // ТИИЭР. – 1988. – Т. 76, №12. – С. 46-70.
12. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 720 с.

**Перетворення поляризації  
електромагнітних хвиль на плоскому  
двохелементному екрані скінченної  
товщини з хвилеводними каналами  
прямокутного перерізу**

**О. В. Грибовський**

Досліджено частотні та поляризаційні характеристики електромагнітного поля, розсіяного на плоскому двухелементному екрані скінченної товщини з періодично розташованими прямокутними отворами. Проаналізовано поляризацію відбитої хвилі та хвилі, що пройшла за екран, для різних параметрів падаючої плоскої хвилі і геометричних розмірів екрану. Показана можливість перетворення лінійно поляризованої хвилі у хвилю з круговою поляризацією.

**Transformation of Electromagnetic Field  
Polarization by Flat Two-Element Screen  
of Finite Thickness Perforated by  
Waveguide Channels of Rectangular  
Cross-Section**

**A. V. Gribovsky**

Frequency behavior and polarization patterns of an electromagnetic field scattered by a flat two-element screen of finite thickness with periodically disposed rectangular apertures are investigated. Polarization of the reflected and transmitted waves for different parameters of an incident plane wave and screen geometry is analyzed. The possibility for a linearly polarized wave to transform into a circularly polarized one is shown.