

## **Преобразование поляризации электромагнитных волн отражательной решеткой из закороченных волноводов прямоугольного сечения переменной длины**

**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 19 февраля 2007 г.*

Исследованы поляризационные характеристики электромагнитного поля, рассеянного на отражательной двумерно периодической решетке из закороченных волноводов переменной длины. Базовая ячейка решетки содержит два закороченных прямоугольных волновода с взаимно ортогональными стенками. Рассчитаны параметры Стокса отраженной волны в зависимости от длины закороченных волноводов и частоты. Показана возможность преобразования линейно поляризованной волны в волну с ортогональной поляризацией или в волну с круговой поляризацией правого или левого вращения вектора электрического поля.

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. Технология изготовления полосковых решеток достаточно хорошо разработана и широко применяется. Однако решетки в микрополосковом исполнении отличаются низкой механической прочностью и наличием потерь мощности электромагнитной волны в диэлектрической подложке.

В тех случаях, когда предъявляются повышенные требования к механической прочности частотно-избирательных и поляризационных решеток и уровню потерь, целесообразно применять сплошные металлические экраны с отверстиями, форма которых определяется необходимыми характеристиками пропускания, отражения или рассеяния электромагнитных волн. Для расширения функциональных возможнос-

тей сплошных металлических экранов с отверстиями можно, так же как и в микрополосковых решетках, применять управляющие *p-i-n* диоды. В этом случае по конструктивным соображениям толщина слоев должна быть соизмерима с длиной волны в свободном пространстве.

Плоские многоэлементные двумерно периодические экраны конечной толщины с прямоугольными отверстиями и волноводными нагрузками с электронным управлением характеристик рассеяния исследованы в работах [1-3]. Для исследования характеристик рассеянного поля применен операторный метод [4]. В качестве управляющих элементов в волноводные нагрузки включены *p-i-n* диоды. Такие экраны могут быть использованы, например, в качестве СВЧ переключателей в открытых линиях передач и антенных укрытий, а также для коррекции фазы и изменения поляризации поля как прошедшей, так и отраженной электромагнитной волны.

Целью настоящей работы является исследование поляризационных характеристик отраженного поля при падении плоской линейно поляризованной электромагнитной волны на двухэлементную двумерно периодическую отражательную решетку из закороченных волноводов прямоугольного поперечного сечения, длина которых изменяется.

Базовая ячейка решетки содержит два закороченных прямоугольных волновода, широкие и узкие стенки которых взаимно ортогональны (см. рис. 1). Центры базовых ячеек в общем случае располагаются в узлах косоугольной сетки. Размеры поперечных сечений волноводных каналов  $a_1 \times b_1$  и  $a_2 \times b_2$  выбраны из условия распространения в них только основной  $TE_{10}$ -волны, где  $a_p$  – размер волновода вдоль оси  $Ox$ , а  $b_p$  – размер волновода вдоль оси  $Oy$ ,  $p = 1, 2$ . Размеры базовой ячейки  $d_x$  и  $d_y$  выбраны из условия распространения одной пространственной гармоники в свободном пространстве. Волноводы закорочены на разных расстояниях от плоскости раскрыва решетки.

Изменение длины закороченных волноводов на фиксированной частоте приводит к изменениям амплитудно-фазового распределения электромагнитного поля в плоскости раскрыва решетки, в результате чего происходит преобразование поляризации отраженного поля. Длина за-

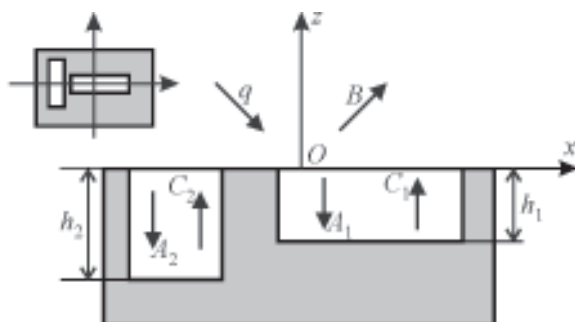


Рис. 1. Базовая ячейка двумерно периодической решетки

короченных волноводов может варьироваться путем включения или выключения  $p-i-n$  диодов, помещенных в поперечных сечениях волноводных каналов между открытым концом волновода и перегородкой. Известно, что в активном состоянии значение коэффициента отражения  $p-i-n$  диода с высокой степенью точности совпадает со значением коэффициента отражения от идеально проводящей перегородки, а в выключенном состоянии отражение от него близко к нулю. Поэтому для простоты можно рассматривать решетку с управляемыми характеристиками как экран из закороченных волноводов переменной длины с перемещающимися идеально проводящими перегородками.

Для нахождения неизвестных амплитуд отраженного поля воспользуемся операторным методом. В соответствии с обозначениями, приведенными на рис. 1, систему операторных уравнений относительно неизвестных амплитуд пространственных гармоник и неизвестных амплитуд волноводных волн запишем в виде

$$\begin{cases} B = \hat{R}_+ q + \hat{T}_-^{(1)} C_1 + \hat{T}_-^{(2)} C_2, \\ A_1 = \hat{T}_+^{(1)} q + \hat{R}_-^{(1)} C_1 + \hat{P}_{21} C_2, \\ A_2 = \hat{T}_+^{(2)} q + \hat{R}_-^{(2)} C_2 + \hat{P}_{12} C_1, \\ C_1 = \hat{e}_1 \hat{R}_0 \hat{e}_1 A_1, \\ C_2 = \hat{e}_2 \hat{R}_0 \hat{e}_2 A_2, \end{cases} \quad (1)$$

где  $q$  – вектор амплитуд падающего поля;  $B$  – вектор амплитуд пространственных гармоник отраженного поля;  $A_{1,2}$ ,  $C_{1,2}$  – амплитуды волноводных волн, распространяющихся или затухающих в положительном и отрицательном направлениях оси  $Oz$ , в первом и втором волноводах;  $\hat{R}_+$  – оператор отражения плоских электромагнитных волн двухэлементной решеткой полубесконечных волноводов со стороны свободного пространства;  $\hat{T}_+^{(1,2)}$  – операторы прохождения плоских волн в первый и вто-

рой волноводы решетки полубесконечных волноводов со стороны свободного пространства;  $\hat{R}_-^{(1,2)}$ ,  $\hat{T}_-^{(1,2)}$  – операторы отражения и прохождения волноводных волн решетки полубесконечных волноводов со стороны первого и второго волноводов соответственно;  $\hat{R}_0$  – оператор отражения волноводных волн первого и второго волноводов от идеально проводящих перегородок, расположенных в сечениях  $z = -h_1$  и  $z = -h_2$ ;  $\hat{P}_{12}$ ,  $\hat{P}_{21}$  – операторы преобразования волноводных волн первого волновода в волноводные волны второго волновода и волноводных волн второго волновода в волноводные волны первого;  $\hat{e}_{1,2}$  – операторы, учитывающие изменение фазы электромагнитного поля волноводных волн на длине первого и второго закороченных волноводов.

Решение системы операторных уравнений (1) относительно неизвестных амплитуд волноводных волн  $C_1$  и  $C_2$  имеет вид:

$$C_1 = \hat{G}^{-1} \hat{F}_1^{-1} \hat{Q}_1 (\hat{T}_+^{(1)} + \hat{P}_{21} \hat{F}_2^{-1} \hat{Q}_2 \hat{T}_+^{(2)}) q, \quad (2)$$

$$C_2 = \hat{F}_2^{-1} \hat{Q}_2 \hat{T}_+^{(2)} q + \hat{F}_2^{-1} \hat{Q}_2 \hat{P}_{12} C_1,$$

где

$$\hat{Q}_1 = \hat{e}_1 \hat{R}_0 \hat{e}_1, \quad \hat{Q}_2 = \hat{e}_2 \hat{R}_0 \hat{e}_2, \quad \hat{F}_1 = \hat{I} - \hat{Q}_1 \hat{R}_-^{(1)}, \\ \hat{F}_2 = \hat{I} - \hat{Q}_2 \hat{R}_-^{(2)}, \quad \hat{G} = \hat{I} - \hat{F}_1^{-1} \hat{Q}_1 \hat{P}_{21} \hat{F}_2^{-1} \hat{Q}_2 \hat{P}_{12},$$

$\hat{I}$  – единичный оператор с диагональной матрицей.

Амплитуды отраженного поля находятся из первого уравнения системы (1) с учетом (2).

Исследуем поляризационные характеристики отраженного поля при произвольном падении на решетку плоской линейно поляризованной электромагнитной волны.

Пусть на решетку из области  $z > 0$  произвольным образом падает плоская линейно поляризованная электромагнитная

волна единичной амплитуды. Поперечную компоненту электрического поля падающей волны представим в виде суммы  $TE$ - и  $TM$ -волны:

$$\vec{E}_i^i(x, y, z) = \cos \alpha_0 \vec{\Psi}^{(1)} e^{-i\Gamma z} + \sin \alpha_0 \cos \theta \vec{\Psi}^{(2)} e^{-i\Gamma z}, \\ z > 0, \quad (3)$$

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:

$$\vec{\Psi}^{(1)} = \exp\{i(\kappa_x x + \kappa_y y)\} \frac{(\kappa_y \vec{e}_x - \kappa_x \vec{e}_y)}{\sqrt{S_0} \kappa_r},$$

$$\vec{\Psi}^{(2)} = \exp\{i(\kappa_x x + \kappa_y y)\} \frac{(\kappa_x \vec{e}_x + \kappa_y \vec{e}_y)}{\sqrt{S_0} \kappa_r},$$

$$\kappa_x = k \sin \theta \sin \varphi, \quad \kappa_y = k \sin \theta \cos \varphi,$$

где  $\kappa_r = \sqrt{\kappa_x^2 + \kappa_y^2}$ ;  $\Gamma = k \cos \theta$ ;  $S_0 = d_1 d_2$  – площадь поперечного сечения базовой ячейки решетки;  $\vec{e}_x$ ,  $\vec{e}_y$  – единичные орты декартовой системы координат. Углы  $\theta$  и  $\varphi$  – углы падения плоской волны в сферической системе координат. Угол поляризации  $\alpha_0$  определен в плоскости, в которой лежат векторы полного электрического  $\vec{E}^i$  и магнитного  $\vec{H}^i$  полей падающей волны. Угол отсчитывается против движения часовой стрелки от прямой, лежащей в плоскости векторов  $\vec{E}^i$  и  $\vec{H}^i$  и параллельной плоскости  $xOy$ , до вектора  $\vec{E}^i$ . Значение  $\alpha_0 = 0^\circ (180^\circ)$  соответствует  $TE$ -волне, а 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  $xOy$ , а угол  $\alpha_0$  отсчитывается от оси  $Oy$ .

Эффективное преобразование поляризации на двухэлементной отражательной решетке из закороченных прямоугольных волноводов с взаимно ортогональными стенками можно получить путем подбора соответствующих значений длин закороченных волноводов  $h_1$  и  $h_2$  и величин поперечных сечений волноводных каналов.

Для описания поляризационных характеристик отраженного поля воспользуемся параметрами Стокса  $S_a = S_{0a} \{1; S_1; S_2; S_3\}$  [5], где  $S_{0a}$  – интенсивность электромагнитной волны. Для полностью поляризованной плоской монохроматической волны параметры Стокса, нормированные на интенсивность  $S_{0a}$ , имеют вид:

$$S_1 = \cos 2\alpha \cos 2\beta,$$

$$S_2 = \cos 2\alpha \sin 2\beta,$$

$$S_3 = \sin 2\alpha,$$

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

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

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

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

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

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

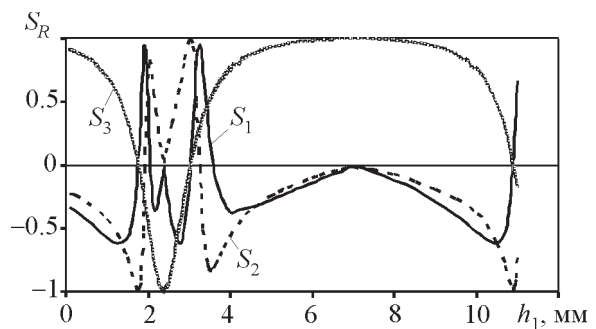
$S_a = S_{0a} \{1; 0; -1; 0\}$  – линейная поляризация под углом  $-45^\circ$  к оси  $O\xi$ .

Удобство применения параметров Стокса на практике состоит в том, что все они имеют одинаковую размерность и могут быть определены экспериментальным путем. Кроме того, параметры Стокса удовлетворяют соотношению  $S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = 1$ , которое является дополнительным критерием правильности решения электродинамической задачи.

Для простоты будем рассматривать экран с прямоугольной сеткой и случай нормального падения на решетку плоской линейно поляризованной волны с углом поляризации  $\alpha_0 = 45^\circ$ . При этом угол между осью  $Ox$  ( $O\xi$ ) и вектором  $\vec{E}^i$  равен  $\varphi = -45^\circ$ , т. е. параметры Стокса падающей волны имеют следующие значения:  $S_1^i = 0$ ,  $S_2^i = -1$ ,  $S_3^i = 0$ . В этом случае происходит наиболее эффективное одновременное возбуждение основной волны в закороченных волноводных каналах.

Исследование поляризационных характеристик отраженного поля проводилось на разных частотах для различных значений геометрических параметров базовой ячейки экрана. Численно исследовалась зависимость параметров Стокса отраженной волны от длины одного из закороченных волноводов.

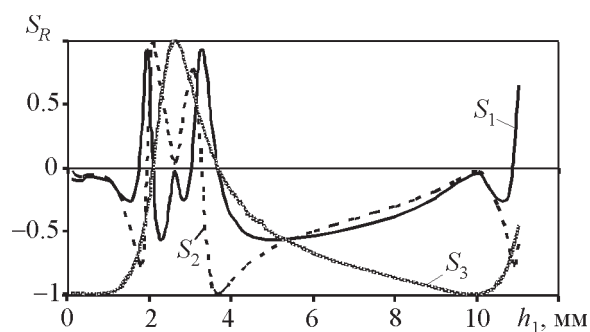
На рис. 2 представлены зависимости параметров Стокса  $S_R$  отраженной волны



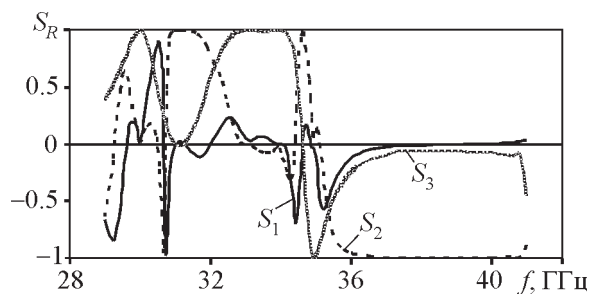
**Рис. 2.** Зависимость параметров Стокса от длины первого волновода. Нормальное падение волны. Волноводы одинаковых сечений:  $a_1 = 4.8$  мм,  $b_1 = 1$  мм;  $a_2 = 1$  мм,  $b_2 = 4.8$  мм;  $d_x = 7.3$  мм;  $d_y = 7$  мм;  $h_2 = 11$  мм;  $f = 35.294$  ГГц

от длины первого закороченного волновода на фиксированной частоте и при одинаковых размерах поперечных сечений волноводных каналов. Параметры решетки, общие для ниже приведенных зависимостей, имеют следующие значения:  $x_1 = 0.75$  мм,  $y_1 = 0$ ,  $x_2 = -2.65$  мм,  $y_2 = 0$ . Здесь  $x_p$ ,  $y_p$  – координаты центров волноводных каналов на базовой ячейке решетки в плоскости  $xOy$ . Из рисунка видно, что при длине первого закороченного волновода, равной  $h_1 = 3.05$  мм, отраженная волна имеет линейную поляризацию, ортогональную падающей волне ( $S_2 = 1$ ). При длине первого волновода, равной  $h_1 = 2.45$  мм либо изменяющейся в пределах  $h_1 = 6 \div 8$  мм, электромагнитная волна отражается с поляризацией, близкой к круговой, либо с левым вращением ( $S_3 = -1$ ), либо с правым вращением вектора электрического поля ( $S_3 = 1$ ). Преобразование поляризации электромагнитной волны может быть получено и на отрагательной решетке с волноводами разных поперечных сечений, рис. 3, а также на разных частотах падающей волны, при неизменных геометрических параметрах экрана, рис. 4.

Проведенные исследования показывают, что на основе двухэлементных двумерно периодических отрагательных экранов из закороченных волноводов прямоуголь-



**Рис. 3.** Зависимость параметров Стокса от длины первого волновода. Нормальное падение волны. Волноводы различных сечений:  $a_1 = 4.8$  мм,  $b_1 = 1$  мм;  $a_2 = 1$  мм,  $b_2 = 5$  мм;  $d_x = 7.3$  мм;  $d_y = 7$  мм;  $h_2 = 8$  мм;  $f = 35.294$  ГГц



**Рис. 4.** Зависимость параметров Стокса от частоты. Нормальное падение волны. Волноводы различных сечений:  $a_1 = 4.8$  мм,  $b_1 = 1$  мм;  $a_2 = 1$  мм,  $b_2 = 5$  мм;  $d_x = 7.3$  мм;  $d_y = 7$  мм;  $h_1 = 6$  мм;  $h_2 = 11$  мм

ного сечения путем включения в волноводные каналы управляющих электронных устройств возможно создание нового класса преобразователей поляризации и поляризационно-селективных фильтров с управляемыми характеристиками.

## Литература

1. Грибовский А. В. Преобразование поляризации электромагнитных волн на плоском двухэлементном экране конечной толщины с волноводными каналами прямоугольного сечения // Радиопизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, №1. – С. 92-97.
2. Gribovsky A. V., Prosvirnin S. L. Frequency-Sensitive Characteristics of a Screen Having Rectangular Apertures and Waveguide Loads // Telecommunications and Radio Engineering. – 2005. – Vol. 64, No. 12. – P. 981-990.
3. 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.
4. Литвиненко Л. Н., Просвирнин С. Л. Спектральные операторы рассеяния в задачах дифракции волн на плоских экранах. – Киев: Наук. думка, 1984. – 240 с.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 720 с.

**Перетворення поляризації  
електромагнітних хвиль відбивною  
решіткою із закорочених хвильоводів  
прямокутного перерізу змінної довжини**

**О. В. Грибовський**

Досліджено поляризаційні характеристики електромагнітного поля, розсіяного на відбивній двовимірній періодичній решітці із закорочених хвильоводів змінної довжини. Базова комірка решітки містить два закорочених прямокутних хвильоводи із взаємно ортогональними стінками. Розраховано параметри Стокса відбитої хвилі залежно від довжини закорочених хвильоводів та частоти. Показано можливість перетворення лінійно поляризованої хвилі у хвилю з ортогональною поляризацією або у хвилю з круговою поляризацією правого чи лівого обертання вектора електричного поля.

**EM Wave Polarization  
Transformation by a Reflectarray  
of Variable-Length Shorted  
Rectangular Waveguides**

**A. V. Gribovsky**

Polarization patterns of the electromagnetic field scattered on a two-dimensional variable-length periodic reflectarray of shorted waveguides are studied. An array master cell contains two shorted rectangular waveguides with mutually orthogonal walls. The reflected wave Stokes parameters are calculated vs. shorted-waveguide lengths and frequencies. The capability of transforming a linearly polarized wave into the one with either orthogonal polarization or circular polarization of the left- or right-handed rotation of electric field vector is shown.