

УДК 537.874.6

А. В. ГРИБОВСКИЙ, О. А. ЕЛИСЕЕВ

Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: elisseev2000@mail.ru

## ДИФРАКЦИЯ ГАУССОВОГО ВОЛНОВОГО ПУЧКА НА ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ РЕШЕТКЕ ИЗ ЗАКОРОЧЕННЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ

*Проведен анализ трансформации диаграмм направленностей линейно поляризованного гауссового волнового пучка при отражении от решетки из закороченных волноводов прямоугольного сечения. Рассмотрены случаи нормального и наклонного падения пучка двух ортогональных поляризацій. Показано, что диаграмма направленности отраженного пучка может быть в несколько раз уже, чем диаграмма направленности падающего поля. Найдены условия и определены параметры структуры, при которых зеркально отраженный пучок имеет минимальную мощность.*

*Ключевые слова:* трехмерный гауссовый волновой пучок, двумерно-периодические структуры, отражательная решетка,  $p$ - и  $s$ -поляризация, диаграммы направленности, электродинамические характеристики

### 1. Введение

В связи с широким использованием на практике открытых линзовых и зеркальных линий передач и открытых резонаторов возникла необходимость в создании вспомогательных устройств, позволяющих управлять канализируемой энергией пучка электромагнитных волн: высокочастотных элементов связи, направленных ответвителей, поляризационных аттенуаторов. Основной составной частью таких устройств является дифракционная решетка. Для успешного применения периодических дифракционных решеток в приборах и устройствах миллиметрового и терагерцового диапазонов длин волн необходимо учитывать дифракционные характеристики используемых структур при падении на них волновых пучков. Это и является причиной исследования энергетических, частотных и амплитудно-фазовых характеристик электромагнитного поля волнового пучка, отраженного дифракционной решеткой. Вопросы дифракции волновых пучков на периодических структурах уже исследовались рядом авторов. Большинство работ посвящено подробному исследованию дифракции двумерных волновых пучков, направление однородности которых совпадает с направлением однородности дифракционной решетки, либо исследованию трехмерных волновых пучков на однородных многослойных структурах и на диэлектрических решетках [1–14]. В работе [15] представлены методы и алгоритмы решения задач рассеяния двумерных волновых пучков на одномерно-периодических структурах, таких как ленточная решетка, решетка из брусьев

прямоугольного сечения и решетка типа “гребенка”, а также дано объяснение физических механизмов, определяющих характеристики рассеяния. В работах [16–20] рассмотрены задачи дифракции гауссовых волновых пучков на полупрозрачных и отражательных металлических и диэлектрических двумерно-периодических структурах. Однако исчерпывающего исследования влияния отражательной двумерно-периодической решетки на электродинамические характеристики электромагнитного поля отраженного трехмерного волнового пучка пока еще не проводилось.

Задачи о возбуждении периодических структур представляют интерес и с точки зрения теории антенных решеток. До настоящего времени рассматривались в основном задачи определения характеристик поля, отраженного периодической структурой, в случае, когда на периодическую структуру падает поле внешних источников. При исследовании подобных задач, как правило, в качестве падающего поля достаточно рассмотреть поле, создаваемое плоской волной. Вместе с тем большое прикладное значение имеет изучение вопросов, связанных с дифракцией на отражательных решетках поля источника, находящегося вблизи решетки. В этом случае аппроксимация падающего поля полем плоской волны уже недостаточна и необходимо учитывать структуру падающего поля.

В настоящей работе представлены результаты исследования дифракции трехмерного гауссового волнового пучка на отражательной решетке из закороченных волноводов прямоугольного сечения. Рассматриваются случаи нормального и наклонно-

© А. В. Грибовский, О. А. Елисеев, 2012

го падения  $s$ - и  $p$ -поляризованного пучка. Используется алгоритм, подробно описанный в работе [16].

## 2. Постановка задачи

Пусть на двумерно-периодическую идеально проводящую отражательную решетку из закороченных волноводов прямоугольного сечения, расположенную в плоскости  $xOy$ , из полупространства  $z > 0$  произвольным образом падает линейно поляризованный волновой пучок. В общем случае центры базовых ячеек двумерно-периодической структуры могут размещаться в узлах косоугольной сетки. Их положение в плоскости  $xOy$  определяется углом  $\chi$  между осью  $Ox$  и прямой, проходящей через начало системы координат и центры базовых ячеек. Направление поляризации в пучке также произвольно. Требуется найти электромагнитное поле, рассеянное двумерно-периодической структурой в свободное пространство.

На рис. 1 схематически изображен падающий волновой пучок и отражательная решетка. Здесь  $\vartheta_0$  – угол падения пучка, а  $\varphi_0$  – угол, задающий плоскость падения, в системе координат  $(xyz)$ ;  $d_1$  и  $d_2$  – периоды решетки;  $a$  и  $b$  – поперечные размеры волноводных каналов;  $h$  – длина закороченных волноводов.

Пусть в плоскости  $z_p = 0$  в системе координат, связанной с пучком, задано распределение поперечной компоненты падающего электрического поля пучка в виде

$$\vec{E}_t^i(x_p, y_p, 0) = \frac{4\pi}{\sqrt{S}} \exp \left[ -\left( \frac{x_p}{w_1} \right)^2 - \left( \frac{y_p}{w_2} \right)^2 \right] \times$$

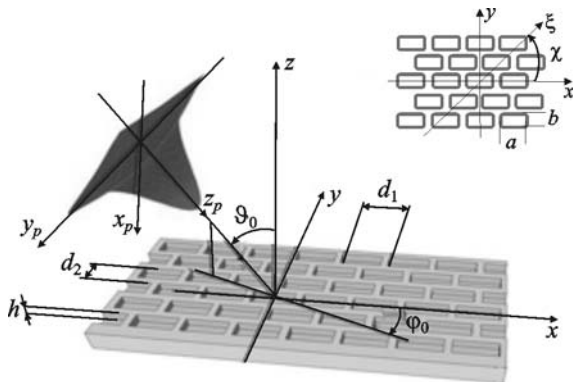


Рис. 1. Падение гауссового волнового пучка на двумерно-периодическую структуру

$$\times (\vec{e}_{xp} \cos \alpha_0 - \vec{e}_{yp} \sin \alpha_0), \quad (1)$$

где  $S = d_1 \times d_2$  – площадь базовой ячейки решетки;  $w_1, w_2$  – параметры, определяющие эффективные размеры пучка в плоскости  $z_p = 0$ ;  $\vec{e}_{xp}, \vec{e}_{yp}$  – единичные орты в системе координат  $(x_p, y_p, z_p)$ . Угол поляризации  $\alpha_0$  определен в системе координат  $(x_p, y_p, z_p)$ , связанной с пучком. Значение  $\alpha_0 = 0^\circ$  соответствует случаю  $s$ -поляризации, а значение  $\alpha_0 = 90^\circ$  – случаю  $p$ -поляризации. Нижний индекс  $t$  в выражении (1) указывает на то, что рассматривается поперечная компонента электрического поля. Мощность падающего пучка вычисляется с помощью формулы:

$$W_0 = \frac{\lambda^2}{S} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sin \vartheta \left[ \cos^2 \vartheta |G_1(\vartheta, \varphi)|^2 + |G_2(\vartheta, \varphi)|^2 \right] d\vartheta d\varphi,$$

где  $G_1(\vartheta, \varphi), G_2(\vartheta, \varphi)$  – известные спектральные функции падающего пучка,  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве. Выражение для мощности зеркально отраженного пучка имеет вид:

$$W = \frac{\lambda^2}{S} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sin \vartheta \left[ \cos^2 \vartheta |R_1(\vartheta, \varphi)|^2 + |R_2(\vartheta, \varphi)|^2 \right] d\vartheta d\varphi,$$

где  $R_1(\vartheta, \varphi)$  и  $R_2(\vartheta, \varphi)$  – неизвестные спектральные функции, которые находятся с помощью алгоритма решения ключевых задач дифракции плоских линейно поляризованных  $TE$ - и  $TM$ -волн на решетке из закороченных волноводов прямоугольного сечения [17]. Диаграммы направленностей в дальней зоне по полю  $E_\varphi, E_\vartheta$  и по мощности вычисляются по формулам:

$$D_{n\varphi} = |R_1(\vartheta, \varphi)| \cos \vartheta,$$

$$D_{n\vartheta} = |R_2(\vartheta, \varphi)|,$$

$$D = (D_{n\varphi})^2 + (D_{n\vartheta})^2.$$

## 3. Численные результаты

Исследования дифракционных свойств отражательной решетки из прямоугольных закороченных волноводов при падении линейно поляризованного гауссового волнового пучка будем проводить для

пучка кругового сечения с поперечными размерами  $w_1/d = w_2/d = w/d = 2.5$ . Решетка с прямоугольной сеткой и квадратными базовыми ячейками имеет следующие геометрические параметры:  $a/d = 0.71$ ,  $b/d = 0.31$ ,  $d_1 = d_2 = d$ ,  $\chi = 90^\circ$ . Угол поляризации  $\alpha_0 = 0^\circ$  падающего пучка выбран таким образом, чтобы в волноводных каналах возбуждалась только основная распространяющаяся волноводная волна. При этом вектор электрического поля в падающем пучке параллелен оси  $Oy$  (перпендикулярен широким стенкам волноводных каналов). Исследуем вначале случай нормального падения пучка на решетку.

Для анализа энергетических характеристик зеркально отраженного пучка введем коэффициент отражения по мощности  $\tau_0$ , определив его как отношение мощности зеркально отраженного поля к мощности падающего на решетку пучка. Введем также параметр, определяющий отношение периода решетки к длине волны, и обозначим его через  $\kappa = d/\lambda$ . На рис. 2 представлены зависимости коэффициентов отражения по мощности от  $\kappa$  для решеток с различной длиной закороченных волноводов. В правом верхнем углу рисунка для сравнения представлена зависимость коэффициента отражения по мощности для случая дифракции плоской волны и двумерного гауссового

волнового пучка на отражательной решетке типа “гребенка”, рассмотренного в работах [15, 21].

Из рисунка видно, что в области частот  $\kappa < 1$ , где для любой парциальной волны, составляющей поле волнового пучка, над периодической структурой существует только одна распространяющаяся отраженная волна, нулевая гармоника рассеянного поля отражается в зеркальном направлении, не изменяя своей мощности. С ростом  $\kappa$  среди парциальных волн появляются волны, энергия которых после отражения от решетки перераспределяется между зеркально отраженной волной и появившейся высшей распространяющейся гармоникой. В этом случае при отражении пучка от решетки в рассеянном поле, кроме зеркального отраженного пучка, появляется незеркально отраженный, который сформирован пространственными гармониками высшего порядка. Из рисунка видно, что при значениях  $\kappa \geq 1$  для решеток с разными значениями длин закороченных волноводов происходит различное перераспределение энергии между зеркально и незеркально отраженными пучками. Так, максимальные потери мощности зеркально отраженного пучка наблюдаются при значениях параметра  $h/d$ , равных 0.14 и 0.21. Уменьшение мощности зеркально отраженного пучка связано с перерасп-

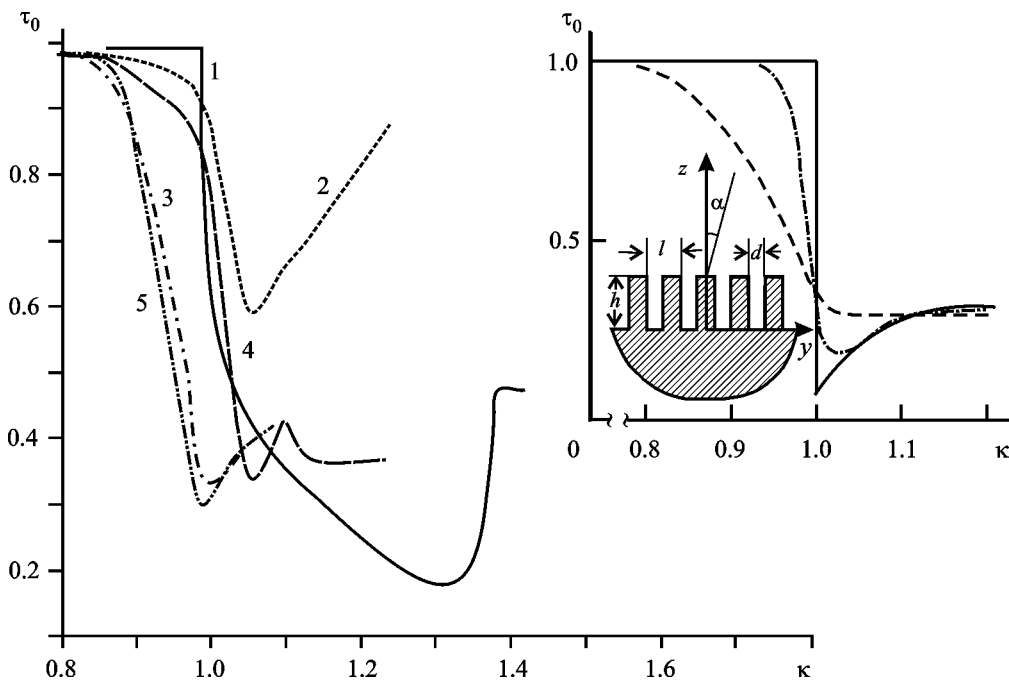


Рис. 2. Зависимость коэффициентов отражения по мощности плоской волны (кривая 1,  $h/d = 0.14$ ) и волнового пучка (кривая 2 –  $h/d = 0.07$ ; кривая 3 –  $h/d = 0.14$ ; кривая 4 –  $h/d = 0.21$ ; кривая 5 –  $h/d = 1.43$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ) от частоты

ределением энергии между зеркально и незеркально отраженными пучками и составляет более 65 % мощности падающего пучка. Видно также, что потери энергии плоской волны, отраженной в зеркальном направлении, больше, чем потери энергии у волнового пучка, отраженного в этом же направлении.

Следует отметить, что при выбранных параметрах решетки и падающего пучка, а именно в диапазоне радиоволн, эффект возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов не наблюдается. В случае идеально проводящего металла образование поверхностных волн при нормальном падении происходит на длине волны, строго равной периоду структуры, а для реального металла с учетом импедансных граничных условий – на больших длинах волн [22, 23]. В настоящей работе эти случаи не рассматриваются.

При изучении энергетических характеристик волновых пучков, дифрагированных на решетке, особый интерес вызывают случаи максимального рассеяния и максимального отражения энергии пучков. Для более детального изучения процессов потери энергии зеркально отраженного пучка были рассчитаны диаграммы направленности по мощности в дальней зоне зеркально и незеркально отраженных пучков (см. рис. 3). Рассмотрены три решетки с различными длинами закороченных волноводов. Значение  $\kappa = 0.99857$  было выбрано вблизи точки скольжения, где наблюдаются наиболее заметные потери мощности в зеркально отраженном пучке. Плоскостью построения диаграмм направленностей была выбрана плоскость, определяемая углом  $\varphi = 90^\circ$ . Именно в этой плоскости происходят наиболее значительные дефор-

мации (сужение) профилей диаграмм направленностей. Это связано с тем, что в данной плоскости происходит более сильное взаимодействие между волноводными каналами решетки, чем в других плоскостях. Вблизи точки скольжения амплитуды поверхностных волн, распространяющихся вдоль поверхности решетки, резко возрастают, вследствие чего увеличиваются степень взаимодействия между соседними волноводными каналами по основной волноводной волне и количество возбужденных волноводных каналов относительно числа каналов, возбужденных падающим пучком. Поэтому эффективная площадь отражательной решетки становится больше площади поперечного сечения падающего пучка, а ширина диаграммы направленности зеркально отраженного пучка меньше ширины диаграммы направленности падающего пучка.

Анализ диаграмм направленностей зеркально и незеркально отраженных пучков, а также исследование зависимости коэффициента отражения по мощности от частоты зеркально отраженного пучка показало, что уровень мощности незеркально отраженного пучка может достигать  $\approx 70\%$  мощности падающего пучка. Установлено также, что происходит сужение диаграмм направленностей зеркально отраженного пучка по отношению к диаграмме направленности падающего пучка. Наиболее заметное сужение наблюдается при длине закороченного волновода  $h/\lambda = 0.14$ . Это связано с тем, что максимальные потери мощности зеркально отраженного пучка при данной длине закороченных волноводов происходят практически при  $\kappa = 1$ . Именно при этом значении частотного параметра  $\kappa$  на-

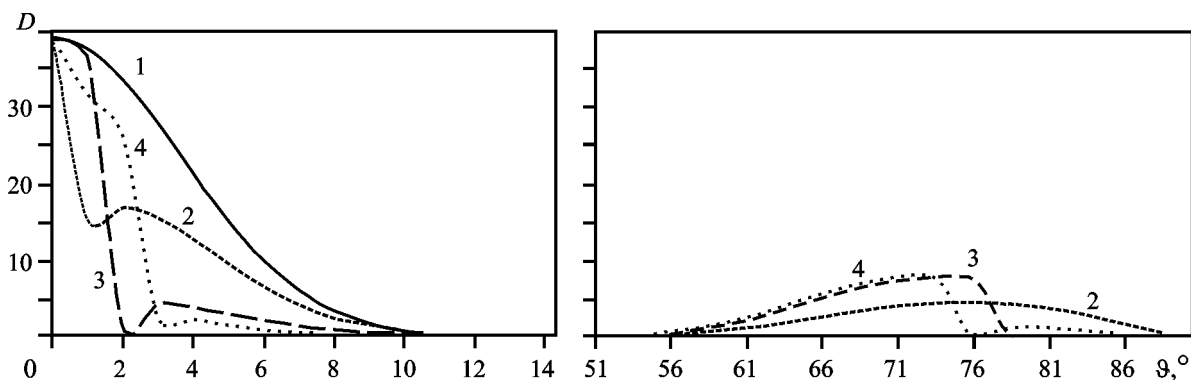


Рис. 3. Диаграммы направленности по мощности падающего (кривая 1) и рассеянных (кривая 2 –  $h/\lambda = 0.07$ ; кривая 3 –  $h/\lambda = 0.14$ ; кривая 4 –  $h/\lambda = 0.21$ ) полей в дальней зоне

блюдается перераспределение энергии в парциальных волнах, распространяющихся ближе к оси нормально падающего пучка и переносящих к решетке основную часть его энергии. Для случаев, когда  $h/\lambda = 0.14$  и  $h/\lambda = 0.21$ , были построены трехмерные диаграммы направленности по полю зеркально отраженного пучка в дальней зоне (см. рис. 4, а, б).

Из рисунка видно, что наибольшее сужение диаграмм направленности происходит в плоскости  $\varphi = 90^\circ$ . С увеличением поперечных размеров падающего пучка значение  $\kappa$ , при котором начинает уменьшаться энергия зеркально отраженного пучка, увеличивается. Это связано с тем, что в случае более широкого падающего пучка основную часть энергии переносят парциальные волны, сосредоточенные в более узком диапазоне углов. Следовательно, возникновение пространственных гармоник, уносящих энергию от зеркально отраженного пучка, происходят при больших значениях  $\kappa$ , чем в случае более узкого падающего пучка. Если значение частотного параметра  $\kappa$  становится больше единицы, то при любых поперечных размерах нормально падающего на решетку гауссова пучка условие образования высших пространственных гармоник в рассеянном поле выполняется для всех парциальных волн падающего пучка. Вследствии этого значительная часть энергии пучка может рассеяться во все направления вдоль решетки. В этом случае максимальное рассеяние энергии пучка наблюдается в направле-

ниях, составляющих некоторый угол с плоскостью решетки. Этот угол с увеличением  $\kappa$  растет. При фиксированных параметрах решетки и на фиксированной частоте была исследована зависимость коэффициента отражения зеркально отраженного пучка по мощности от поперечных размеров падающего пучка. Установлено, что с уменьшением поперечных размеров падающего пучка потери мощности у зеркально отраженного пучка возрастают.

На рис. 5 и 6 приведены диаграммы направленности по мощности зеркально и незеркально отраженных пучков различных поперечных размеров в плоскости  $\varphi = 90^\circ$  для решетки с параметрами  $\kappa = 0.99857$ ,  $a/\lambda = 0.71$ ,  $b/\lambda = 0.3$ ,  $h/\lambda = 0.21$ . Из рисунков видно, что эффект сужения диаграмм направленностей у зеркально отраженных пучков при фиксированной длине волны ярче выражен в случае более узких падающих пучков.

На рис. 7, а, б представлены трехмерные диаграммы направленности по полю зеркально отраженного волнового пучка в дальней зоне.

Симметричное сужение диаграммы направленности зеркально отраженного пучка в двух взаимно ортогональных плоскостях  $\varphi = 0^\circ$  и  $\varphi = 90^\circ$  можно получить, если в качестве отражающей поверхности использовать решетку из закороченных волноводов квадратного сечения. Причем значение угла поляризации падающего пучка должно быть равно  $\alpha_0 = 45^\circ$ . При этом в волноводных каналах распространяются две волноводные волны –  $TE_{10}$  и  $TE_{01}$ . С этой целью была

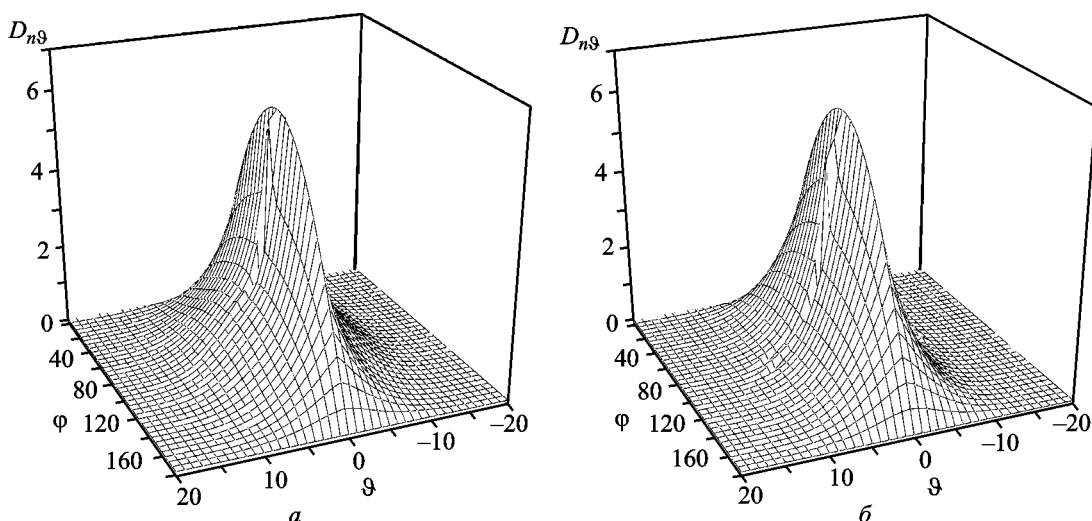


Рис. 4. Диаграммы направленности по полю зеркально отраженного пучка: а –  $h/\lambda = 0.14$ ; б –  $h/\lambda = 0.21$

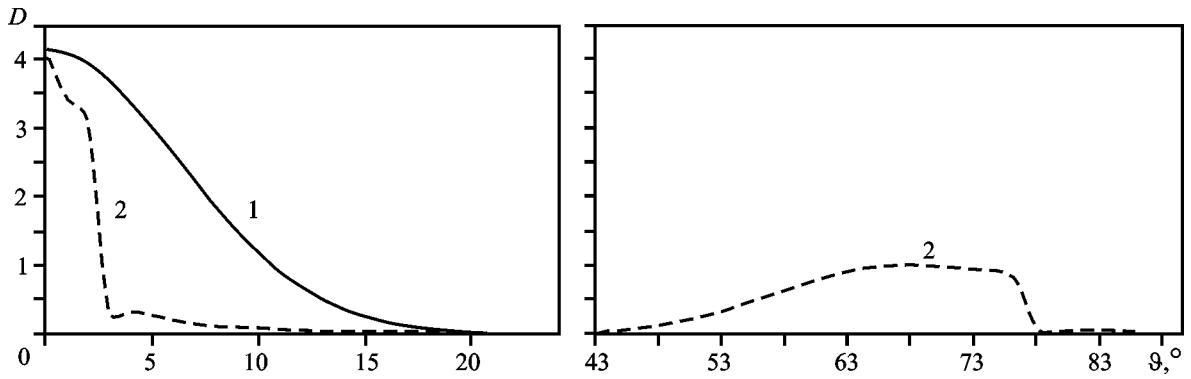


Рис. 5. Диаграммы направленности по мощности падающего (кривая 1,  $w/\lambda = 1.43$ ) и отраженного (кривая 2,  $h/\lambda = 0.21$ ,  $w/\lambda = 1.43$ ) полей

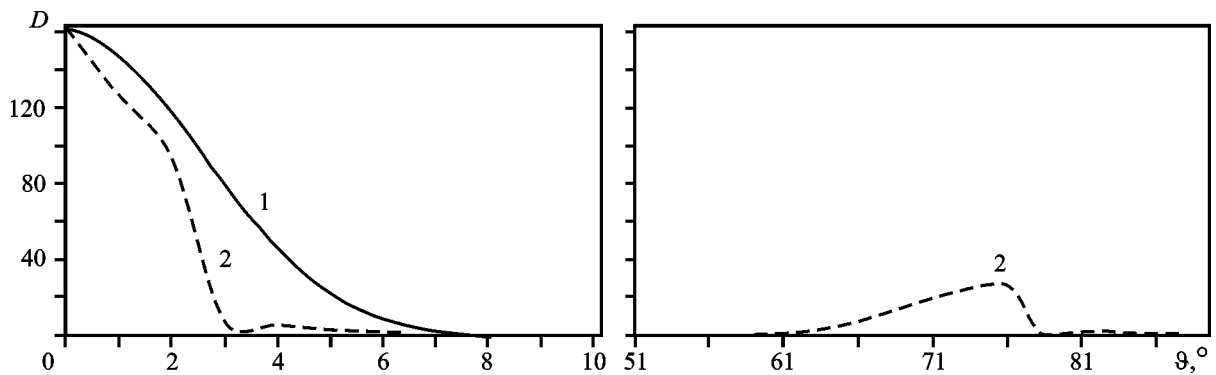


Рис. 6. Диаграммы направленности по мощности падающего (кривая 1,  $w/\lambda = 3.57$ ) и отраженного (кривая 2,  $h/\lambda = 0.21$ ,  $w/\lambda = 3.57$ ) полей

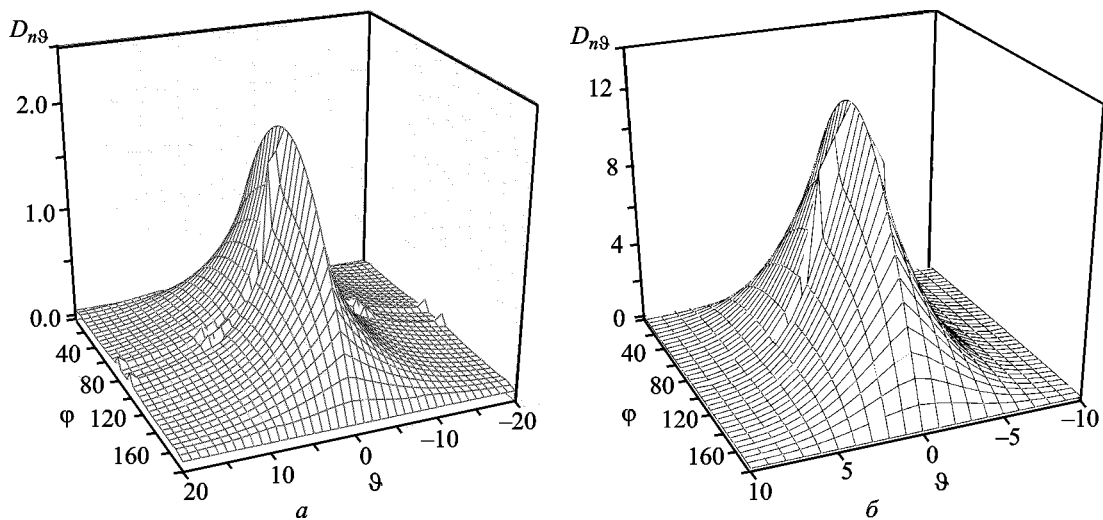


Рис. 7. Диаграммы направленности по полю зеркально отраженного пучка: а –  $w/\lambda = 1.43$ , б –  $w/\lambda = 3.57$

исследована отражательная решетка, закороченные волноводы которой имеют размеры  $a/d = b/d = 0.57$ ,  $h/d = 1.43$ , а угол поляриза-

ции нормально падающего пучка с размерами  $w/d = 2.5$  равен  $\alpha_0 = 45^\circ$ . На рис. 2 представлена зависимость коэффициента отражения по мощ-

ности зеркально отраженного пучка от  $\kappa$ . Видно, что при выбранных параметрах закороченного волновода и направлении поляризации падающего пучка также наблюдается минимум коэффициента отражения при значении  $\kappa$ , близком к единице. При выбранной поляризации форма и степень сужения диаграмм направленности зеркально отраженного пучка идентичны в плоскостях  $\varphi = 0^\circ$  и  $\varphi = 90^\circ$  (см. рис. 8).

На рис. 9 представлена трехмерная диаграмма направленности по полю зеркально отраженного пучка от решетки из квадратных закороченных волноводов. Видно, что степень сужения диаграммы направленности зеркально отраженного пучка намного выше в случае решетки из квадратных волноводов и  $\alpha_0 = 45^\circ$ , чем в случае решетки из прямоугольных волноводов и  $\alpha_0 = 0^\circ$ .

Эффект перераспределения энергии проявляется и при наклонном падении гауссового пучка на отражательную решетку. С увеличением угла падения пучка  $\vartheta_0$  диапазон значений  $\kappa$ , в котором энергия пучка полностью отражается в зеркальном направлении, не изменяя формы диаграммы направленности и мощности, уменьшается. Появляется также частотный диапазон, в котором энергия практически полностью отражается в незеркальном направлении. Этот эффект особенно заметен в случае  $p$ -поляризованного падающего волнового пучка ( $\alpha_0 = 90^\circ$ ). Были исследованы зависимости коэффициента отражения по мощности зеркально отраженного пучка и плоской волны от длины закороченных волноводов. На рис. 10 представлены зависи-

мости коэффициента отражения по мощности от  $\kappa$  для плоской волны и пучка в случае наклонного падения на решетку с различной длиной закороченных волноводов,  $h/d = 0.14$  и  $h/d = 0.21$ . Данная зависимость описывает случай, когда угол падения пучка на отражательную решетку равен  $\vartheta_0 = 20^\circ$ , плоскость падения  $\varphi = 90^\circ$  и угол поляризации равен  $\alpha_0 = 90^\circ$ . Поперечные размеры пучка равны  $w/d = 2.5$ , а параметры решетки –  $a/d = 0.71$ ,  $b/d = 0.31$ . Из рисунка видно, что вблизи значения  $\kappa$ , равного единице, минимум коэффициента отражения по мощности зеркально отраженного пучка соответствует решетке с длиной закороченного волновода, равной  $h/d = 0.21$ . Исследуем угловое распределение отраженного поля гауссового пучка при различных значениях параметра  $\kappa$ . На рис. 11 показаны диаграммы направленности по мощности зеркально и незеркально отраженных пучков в плоскости  $\varphi = 90^\circ$  при наклонном падении на решетку  $p$ -поляризованного пучка для отдельных значений длин волн вблизи  $\kappa = 1$ . При значениях  $\kappa \leq 0.7$  основная часть парциальных волн пучка, расположенных вблизи его оси, отражается полностью в зеркальном направлении. Вследствие этого форма диаграммы направленности зеркально отраженного пучка практически повторяет форму диаграммы направленности падающего пучка. С ростом  $\kappa$  деформация диаграммы направленности основного лепестка отраженного поля увеличивается. Наблюдается сильное сужение, положительное и отрицательное смещения максимумов диаграмм направленностей зеркально отраженного пучка в плоскости  $\varphi = 90^\circ$ . Мощность не-

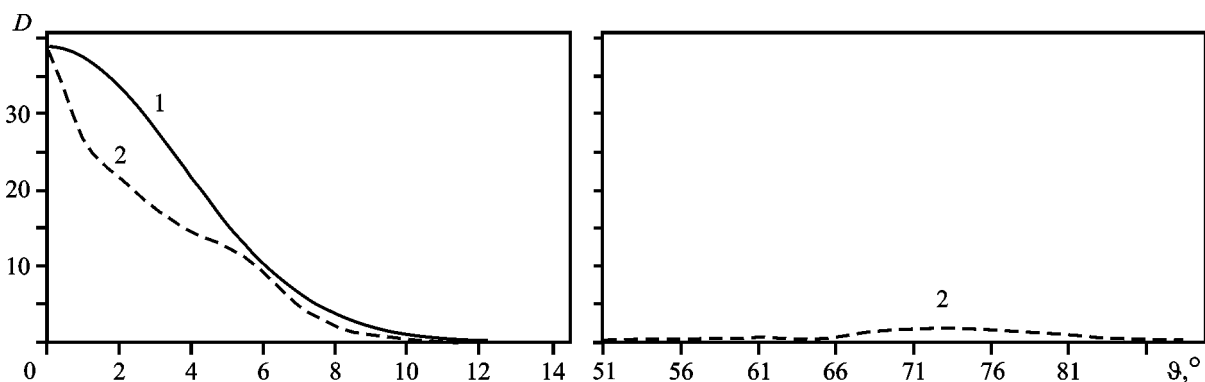


Рис. 8. Диаграммы направленностей по мощности падающего (кривая 1) и отраженного (кривая 2,  $h/\lambda = 1.43$ ,  $\varphi = 0^\circ$  и  $\varphi = 90^\circ$ ) полей

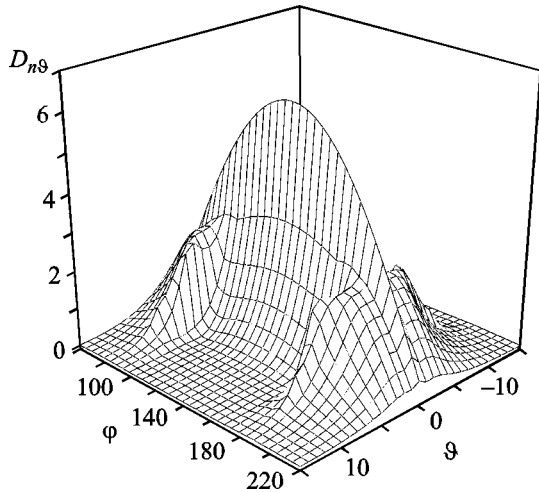


Рис. 9. Диаграмма направленности по полю зеркально отраженного от решетки из квадратных волноводов пучка

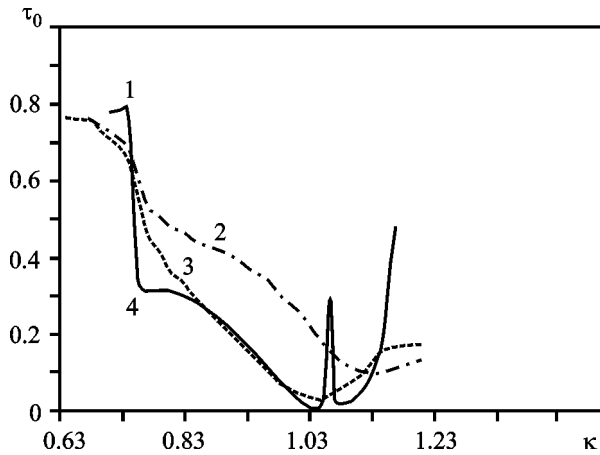


Рис. 10. Зависимость коэффициента отражения плоской ТМ-волны (кривая 1,  $h/d = 0.21$ ) и  $p$ -поляризованного гауссового пучка (кривая 2 –  $h/d = 0.14$ ; кривая 3 –  $h/d = 0.21$ ) от частоты в случае их наклонного ( $\vartheta_0 = 20^\circ$ ) падения на решетку

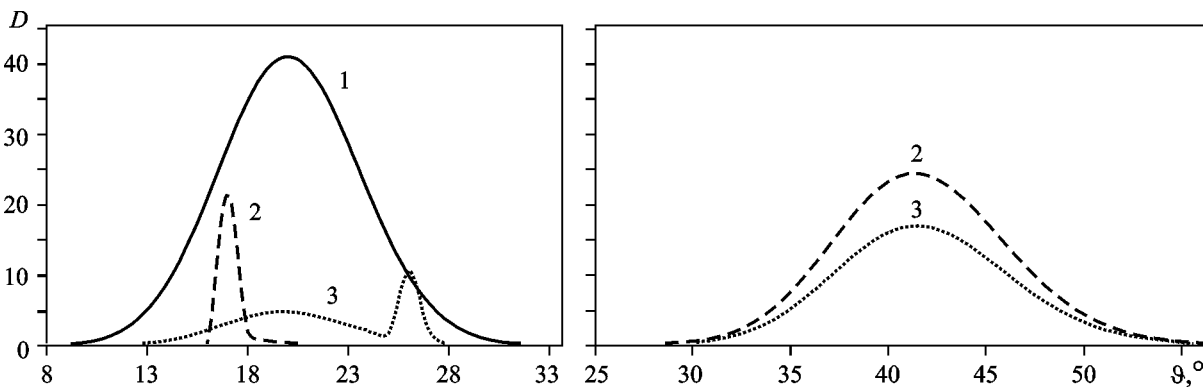


Рис. 11. Диаграммы направленности по мощности падающего (кривая 1) и отраженных (кривая 2 –  $h/\lambda = 0.21$ ,  $\kappa = 1.04$ ; кривая 3 –  $h/\lambda = 0.16$ ,  $\kappa = 1.11$ ) полей

зеркально отраженного пучка с увеличением  $\kappa$  растет.

На рис. 12 представлена трехмерная диаграмма направленности по мощности зеркально отраженного пучка в дальней зоне для решетки с длиной закороченного волновода  $h/\lambda = 0.21$  при  $\kappa = 1.045$ . Подобные диаграммы были получены для так называемых мнимых фазированных решеток или Virtual Imaged Phased Array (VIPA) в работе [18]. Было установлено, что изрезанность диаграммы направленности зеркально отраженного пучка зависит от длины закороченного волновода и  $\kappa$ . Так, например, при  $\kappa < 1$  изрезанности диаграмм направленностей практически не наблюдается. При падении  $p$ -поляризованного пучка на отражательную решетку вследствие появления продольной компоненты электрического поля происходит набег фаз в волноводных каналах, что приводит к изменению амплитудно-фазового распределения поля в плоскости раскрыва решетки. Изрезанность диаграмм направленностей уменьшается при удалении от точки скольжения.

Для каждой пары значений углов  $\varphi$ ,  $\vartheta$  коэффициент отражения для каждой отдельной плоской волны, составляющей поле падающего волнового пучка, будет различным. Зависимость коэффициента отражения по мощности от углов падения плоской  $p$ -поляризованной волны имеет резонансный характер (см. рис. 13). Это связано с тем, что при изменении значений углов появляются или исчезают высшие гармоники и распределение энергии между зеркально отражен-



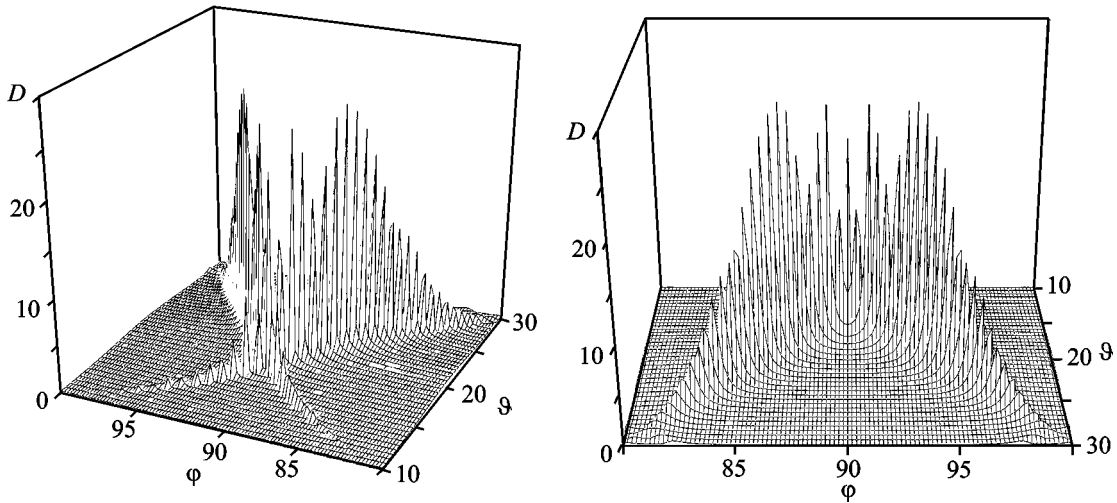


Рис. 12. Диаграмма направленности по мощности зеркально отраженного пучка ( $h/\lambda = 0.21$ )

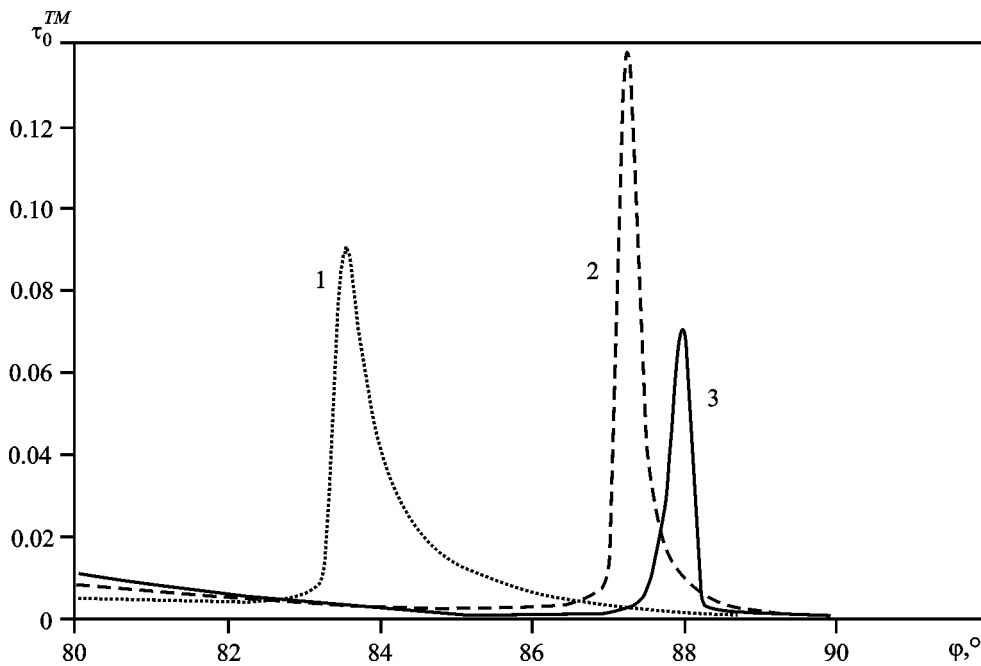


Рис. 13. Зависимость коэффициента отражения по мощности плоской  $TM$ -волны ( $h/\lambda = 0.21$ ) от углов падения плоской  $p$ -поляризованной волны: кривая 1 –  $\vartheta = 25^\circ$ , кривая 2 –  $\vartheta = 20^\circ$ ; кривая 3 –  $\vartheta = 15^\circ$

ным пучком и незеркально отраженным пучком меняется почти скачкообразно.

Проведенные исследования наклонного падения пучка в случае  $s$ -поляризации при тех же параметрах пучка и решетки показали, что минимум коэффициента отражения по мощности зеркально отраженного пучка наблюдается при значении  $k$  меньше единицы (см. рис. 14), а следовательно не происходит искажений диаграммы направленности зеркально отраженного пучка.

На рис. 15 представлены диаграммы направленностей по мощности в дальней зоне в плоскости  $\varphi = 0^\circ$  для различных длин закороченных волноводов решетки.

На рис. 16, *a, б* приведены трехмерные диаграммы направленности по мощности зеркально отраженного пучка в дальней зоне. Видно, что форма диаграмм направленностей носит игольчатый характер и практически повторяет форму диаграммы направленности падающего поля.

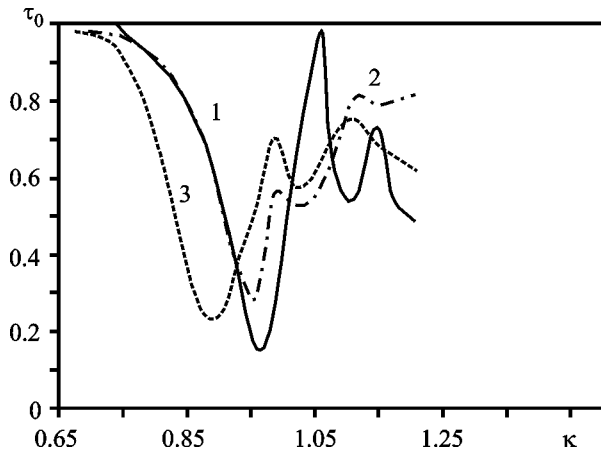


Рис. 14. Зависимости коэффициентов отражения по мощности  $s$ -поляризованного пучка (кривая 2 –  $h/d = 0.14$ ; кривая 3 –  $h/d = 0.21$ ) и плоской  $TE$ -волны (кривая 1,  $h/d = 0.14$ ) от частоты

#### 4. Заключение

Возможность создания периодических структур с периодом меньше длины волны позволяет использовать еще одно интересное свойство периодических структур с высокой пространственной частотой – способность таких покрытий уменьшать отражение волновых пучков от поверхности, на которой они сформированы. В представленной работе исследованы двумерно-периодические структуры – отражательные решетки из закороченных прямоугольных и квадратных волноводов, уменьшающие отражение от поверхности. Установлено, при каких параметрах падающего пучка и отражательной решетки можно получить наименьшее отражение от поверхности в зеркальном направлении. Изучено поведение коэф-

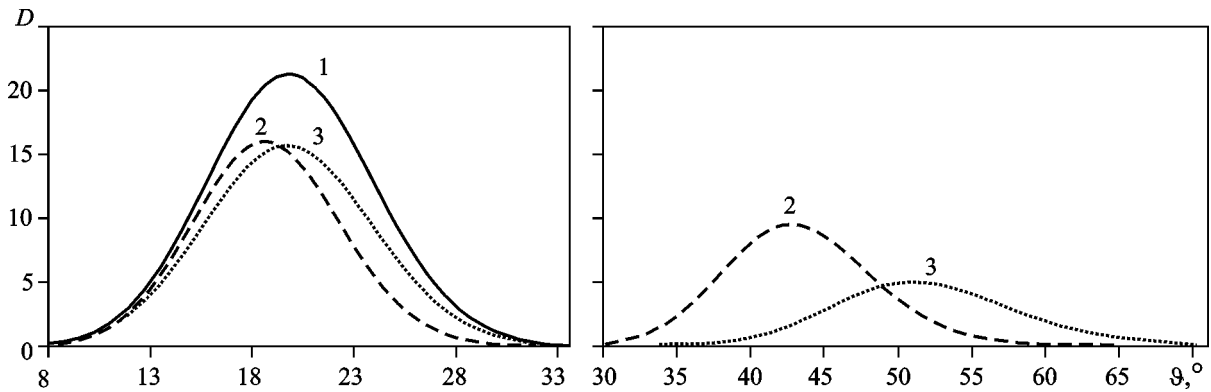


Рис. 15. Диаграммы направленности по мощности падающего  $s$ -поляризованного (кривая 1) и отраженных пучков (кривая 2 –  $h/\lambda = 0.21$ ,  $\kappa = 0.95$ ; кривая 3 –  $h/\lambda = 0.13$ ,  $\kappa = 0.89$ )

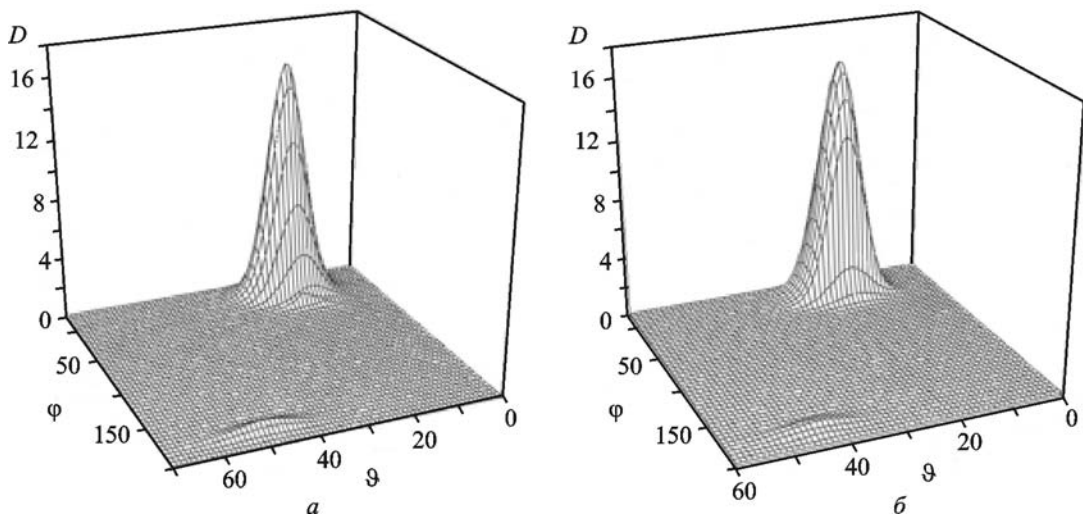


Рис. 16. Диаграммы направленности по мощности зеркально отраженного пучка в случае  $s$ -поляризации: а –  $h/\lambda = 0.14$ ; б –  $h/\lambda = 0.21$

фициента отражения пучка по энергии в зависимости от отношения периода решетки к длине волны. Исследовано изменение формы диаграммы направленности отраженного поля при падении волнового пучка с различными поперечными размерами и под разными углами. Проведен анализ трансформации диаграмм направленности отраженного пучка в дальней зоне для двух случаев поляризации. Показано, что диаграмма направленности отраженного пучка может быть в несколько раз уже, чем диаграмма направленности падающего поля. Отмечено положительное и отрицательное смещение максимумов диаграмм направленности в дальней зоне отраженного поля в случае наклонного падения  $p$ -поляризованного пучка. Определены параметры структуры для случая максимального рассеяния. Показано, что при отражении пучка от отражательной решетки часть энергии уносится гармониками высших порядков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Третьякова С. С., Третьяков О. А., Шестопалов В. П. Дифракция волновых пучков на плоских периодических структурах // Радиотехника и электроника. – 1972. – Т. 17, № 7. – С. 1336–1373.
2. Shin S. Y. and Felsen L. B. Lateral shift of totally reflected Gaussian beams // Radio Sci. – 1977. – Vol. 12, No. 4. – P. 551–564.
3. Литвиненко Л. Н., Просвирнин С. Л. Спектральные операторы рассеяния в задачах дифракции волн на плоских экранах. – Киев: Наук. Думка, 1984. – 241 с.
4. Годин О. А. Дифракционная теория смещения ограниченных волновых пучков при отражении. 1, 2 // ЖТФ – 1984. – Т. 54, № 11. – С. 2094–2104; 1985. – Т. 55, №1. – С. 17–25.
5. Riesz R. P. and Simon R. Reflection of Gaussian beam from a dielectric slab // J. Opt. Soc. Am. A. – 1985. – Vol. 2, Is. 11. – P. 1809–1817.
6. Maciel J. and Felsen L. Gaussian beam analysis of propagation from an extended plane aperture distribution through dielectric layers // IEEE Trans. Antennas Propag. – 1990. – Vol. AP-38, No. 10. – P. 1607–1624.
7. Shulga S. N. Two-dimensional wave beam scattering on an anisotropic half-space with anisotropic inclusion // Opt. Spectrosc. – 1999. – Vol. 87, No. 3. – P. 503–509.
8. Туз В. П. Рассеяние гауссовых волновых пучков ограниченной последовательностью из проводящих брусьев // Радиотехника. – 2003. – Т. 135. – С. 62–67.
9. Bass F. and Resnick L. Wave beam propagation in layered media // J. Electromagn. Waves Appl. – 2003. – Vol. 17, No. 3. – P. 479–480.
10. Lomakin V. and Michielssen E. Beam transmission trough periodic subwavelength hole structures // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2007. – Vol. AP-55, No. 6. – P. 1564–1581.
11. Власов С. Н., Копосова Е. В. Векторные волновые пучки. Изменение поляризации пучков электромагнитных волн при отражении от диэлектрической пластины // Изв. вузов. Радиофизика. – 2005. – Т. XLVIII, № 4. – С. 340–348.
12. Литвиненко Л. Н., Просвирнин С. Л., Резник И. И. Дифракция двумерного волнового пучка на ленточной решетке // Изв. вузов. Радиофизика. – 1979. – Т. 22, № 7. – С. 871–877.
13. Просвирнин С. Л., Резник И. И. Дифракция двумерного волнового пучка на двойной ленточной решетке // Изв. вузов. Радиофизика. – 1980. – Т. 23, № 7. – С. 846–873.
14. Никольский В. В. Учебное пособие по курсу электродинамика и распространение радиоволн. Математический аппарат электродинамики. – М.: Изд-во Московского института радиотехники, электроники и автоматики, 1973. – 608 с.
15. Резник И. И. Операторный метод в двумерных задачах дифракции с непрерывным пространственным спектром: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. ИРЭ АН УССР, Харьков, 1982. – 186 с.
16. Грибовский А. В., Елисеев О. А. Расчет характеристик рассеяния гауссовых волновых пучков на двумерно-периодических структурах // Радиофизика и радиоастрономия. – 2011. – Т. 16, № 3. – С. 282–291.
17. Грибовский А. В., Просвирнин С. Л., Резник И. И. Отражательная фазированная антенная решетка из прямоугольных волноводов конечной глубины // Радиофизика и радиоастрономия. – 1997. – Т. 2, № 1. – С. 52–60.
18. Mokhtari A. and Shishegar A. A. Rigorous 3D vectorial Gaussian beam modeling of demultiplexing performance of virtually-imaged-phased-arrays // Progress In Electromagnetics Research M. – 2010. – Vol. 13. – P. 1–16.
19. Zinenko T. L. and Yachin V. V. Three-Dimensional Gaussian Beam with Circular Cross Section Scattered from Double-Periodic Magneto-Dielectric Slab at a Small Angle of Incidence // Proc. of International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagn. Theory – Lviv (Ukraine). – 2009. – P. 135–138.
20. Yachin V. V., Zinenko T. L., Kiselev V. K., and Vorobiov S. N. Diffraction of 3-D Gaussian Beam with Circular Symmetry of the Field Space Distribution on Permeable Screens at Small Angles of Incidence // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2010. – Vol. 1, No. 3. – P. 241–247
21. Иванченко Д. Д., Колчигин Н. Н., Литвиненко Л. Н., Просвирнин С. Л., Резник И. И. Теоретическое и экспериментальное исследование дифракции двумерных волновых пучков на решетке из прямоугольных брусьев: Препр. / ИРЭ АН УССР; №172. – Харьков: 1981. – 49 с.
22. Бабичева В. Е., Лозовик Ю. Е. Роль поверхностных плазмонных поляритонов при аномальном прохождении электромагнитной волны через две решетки с субволновыми щелями // Физика твердого тела. – 2011. – Т. 51, № 4. – С. 750–754.
23. Белотелов В. И., Безус Е. А., Быков Д. А., Дисколович Л. Л., Котов В. А., Звездин А. К. Магнитооптические эффекты дифракционных решеток, связанные с аномалиями Рэлея-Вуда и возбуждением плазмонов // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31, №3. – С. 4–8.

*О. В. Грибовський, О. О. Єлісеєв*

Радіоастрономічний інститут НАН України,  
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

**ДИФРАКЦІЯ ГАУССОВОГО ХВИЛЬОВОГО ПУЧКА  
НА ВІДБИВНІЙ РЕШІТЦІ ІЗ ЗАКОРОЧЕНИХ ПРЯМО-  
КУТНИХ ХВИЛЕВОДІВ**

Проаналізовано трансформацію діаграм спрямованості лінійно поляризованого гауссового хвильового пучка з відбиттям від решітки із закорочених хвилеводів прямокутного перерізу. Розглянуто випадки нормального та похилого падіння пучка двох ортогональних поляризацій. Показано, що діаграма спрямованості відбитого пучка може бути в кілька разів вужча, ніж діаграма спрямованості падаючого поля. Знайдено умови та визначено параметри структури, за яких дзеркально відбитий пучок має мінімальну потужність.

*A. V. Gribovsky and O. A. Yeliseyev*

Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences  
of Ukraine,  
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

**THE GAUSSIAN WAVE BEAM DIFFRACTION ON  
REFLECTED ARRAY WITH RECTANGULAR SHORTED  
WAVEGUIDES**

The transformation of patterns of linearly polarized Gaussian wave beam reflected from the array of shorted rectangular waveguides is analyzed. The cases of normal and oblique incidence of a beam of two orthogonal polarizations are considered. It is shown that the pattern of the reflected beam can be several times narrower than that of the incident field. Conditions and parameters of the structure when the specular reflected beam has a minimum power are found.

*Стаття поступила в редакцію 18.09.2012*