

УДК 537.874.2

ПОЛНАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ НОРМАЛЬНО ПАДАЮЩЕЙ ВОЛНЫ В -1 -Й ДИФРАКЦИОННЫЙ ПОРЯДОК НА ГЛАДКОМ ЭШЕЛЕТТЕ

Е. В. Копосова

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Исследуется режим полной трансформации нормально падающей на гофрированную металлическую поверхность волны в -1 -й порядок дифракции (в одну сторону) на достаточно простых гладких профилях гофрировки в пренебрежении потерями. Исследование основано на численном решении интегрального уравнения посредством созданной автором интерактивной компьютерной программы. Показано, что рассматриваемые режимы возможны только при несимметричных профилях гофрировки. Для реализации данных режимов требуется достаточное количество параметров в описании профилей. Могут быть построены профили, обеспечивающие указанные режимы как для H -, так и для E -поляризованных волн. Приводятся некоторые примеры таких профилей, проиллюстрированные подробным графическим описанием дифракционных свойств.

ВВЕДЕНИЕ

Явление существенного (в пределе — полного) отражения электромагнитной волны, падающей на гофрированную поверхность, в направлении, отличном от зеркального, достаточно давно привлекает внимание конструкторов оптических и СВЧ приборов. Простейшим с точки зрения физического понимания является обратное отражение от поверхности со ступенчатым профилем гофра при H -поляризации падающей волны (вектор электрического поля \mathbf{E} перпендикулярен рёбрам решётки) [1]. Такие ступенчатые поверхности получили название эшелеттов. С точки зрения СВЧ техники удобнее иметь эшелетт для случая E -поляризации падающей волны (вектор \mathbf{E} параллелен рёбрам решётки) [2]. Это связано с меньшей вероятностью пробоя, т. к. поле на поверхности для волн E -поляризации существенно меньше, чем для волн H -поляризации. Такие эшелетты также были сконструированы (см., например, [3]).

Замечательным свойством эшелетта является возможность реализации режима, при котором нормально падающая волна практически полностью отражается в единственный ненулевой дифракционный порядок [4]. При этом оказывается, что коэффициенты переотражения в положительные и отрицательные дифракционные порядки существенно различны. В [5] достаточно детально рассматривается режим несимметрии поля, проявляющейся в явном превосходстве энергии -1 -й гармоники над энергией $+1$ -й гармоники при нормальном падении волны на гофрированную поверхность с треугольным несимметричным профилем¹. При максимально ассиметричном эшелетте (угол при основании около 67°) пространственная асимметрия вторичного поля при нормальном падении первичной волны на несимметричный эшелетт наиболее ярко выражена. Это явление может использоваться для создания антенны с электрическим сканированием луча.

Однако профили, имеющие углы (типа классического эшелетта), обладают явным недостатком при использовании в мощных приборах, т. к. на поверхности с таким профилем возникают

¹ Несимметрия профиля поверхности для получения несимметричных режимов рассеяния принципиальна. Поверхности с любыми симметричными профилями (равнобедренный треугольник, меандр, классическая синусоида) дают равные коэффициенты рассеяния в положительные и отрицательные дифракционные порядки при нормальном падении. Вследствие этого максимум коэффициента отражения в $+1$ -й или -1 -й порядок от такой поверхности не может превышать 0,5.

сильные электромагнитные поля. Поэтому встаёт вопрос о сглаживании углов гофра, т. е. возникает задача поиска гладкого профиля, обладающего подобными свойствами путём исследования дифракционных свойств гофрированных поверхностей с гладким несимметричным профилем.

1. УПРАВЛЕНИЕ РАССЕЯНИЕМ НА ГОФРЕ

Идея о возможности управления рассеянием в различные дифракционные порядки путём выбора формы профиля и, как следствие, реализация режима, в котором весь падающий луч уходит в ненулевой дифракционный максимум, достаточно подробно описана в [6]. Там указаны как некоторые рекомендации по подбору такого профиля, так и некоторые ограничения. Понятно, что при достаточно мелкомасштабном профиле поверхности при любой его форме вся отражённая мощность пойдёт в нулевой порядок, т. к. других распространяющихся волн нет. Если мы хотим перераспределять мощность между парой дифракционных порядков, период гофрировки должен быть таким, чтобы для ненулевого дифракционного максимума было выполнено условие распространяющейся волны. Профилей для реализации необходимого режима может оказаться много. Из [6] также следует, что при наличии в форме профиля высших гармоник картина рассеяния практически не изменится. Этим можно воспользоваться с технологической точки зрения. Если можно «подмешивать» высшие гармоники, не влияя на перераспределение мощности отражённого излучения, то исконный профиль можно сделать технологически удобным. Профиль может быть прямоугольным, треугольным, трапециевидным, гладким и т. д., надо только, чтобы он описывался нужным количеством параметров и допускал возможность перераспределения мощности между дифракционными максимумами. Фактически, профиль должен содержать столько параметров в описании его формы, на сколько дифракционных порядков мы хотим перераспределять мощность отраженного излучения.

Продemonстрируем возможность реализации режимов полного переотражения нормально падающей волны в $+1$ -й и -1 -й порядки дифракции для H - и E -поляризованных волн в классе несимметричных гладких (в смысле сшивания первых производных) профилей поверхности, описываемых несколькими параметрами, по которым будем проводить оптимизацию путём перебора.

2. ПАРАМЕТРЫ ОПИСАНИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ

Общий вид рассматриваемой формы профиля будем описывать суммой двух функций:

$$h(x) = \zeta(x) + \xi(x),$$

где первое слагаемое $\zeta(x)$ является симметричной функцией, x — координата, перпендикулярная образующей профиля. В одном варианте (см. рис. 1) эта функция представляется разрезанной на две части синусоидой, занимающей относительную часть q_d от периода. Остальная часть заполняется прямыми, вставленными в канавку (место разреза), и в горб. Соотношение длин вставленных кусков прямых регулируется параметром q_q . Интервал изменения параметров $\{q_d, q_q\} \in (0, 1)$. Предусматривается возможность введения в канавку профиля дополнительной перегородки. Простейший вид перегородки может быть описан прибавлением к прямой части канавки дополнительной синусоиды с периодом, равным длине нижней вставки. В данном описании без ограничения общности положим период $d = 2\pi$, а начало отсчёта разместим в центре горба. Такая функция может описана быть на 5 интервалах периода следующими выражениями:

$$\zeta(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_1; \\ A \left[\cos \left(\frac{x - a_1}{q_d} \right) - 1 \right], & a_1 \leq x \leq a_2; \\ A \left\{ \tilde{A} \left[1 - \cos \left(\frac{x - a_2}{1 - [q_d + (1 - q_d)(1 - q_q)]} \right) \right] - 2 \right\}, & a_2 \leq x \leq a_3; \\ A \left[\cos \left(\frac{x - a_4}{q_d} \right) - 1 \right], & a_3 \leq x \leq a_4; \\ 0, & x \geq a_4, \end{cases}$$

где \tilde{A} — амплитуда дополнительной синусоиды, формирующей перегородку.

Сшивание производим до первых производных включительно (требование сходимости решения интегрального уравнения) в 4 точках на периоде:

$$\begin{aligned} a_1 &= \pi(1 - q_d)(1 - q_q), \\ a_2 &= \pi[q_d + (1 - q_d)(1 - q_q)], \\ a_3 &= \pi\{2 - [q_d + (1 - q_d)(1 - q_q)]\}, \\ a_4 &= \pi[2 - (1 - q_d)(1 - q_q)]. \end{aligned}$$

В другом варианте симметричная часть профиля представляется на периоде суммой двух отстоящих на период $d = 2\pi$ супергауссовых функций:

$$\zeta(x) = 2A \left\{ \exp \left[- \left(\frac{x}{\tilde{q}_d} \right)^4 \right] + \exp \left[- \left(\frac{(x - 2\pi)}{\tilde{q}_d} \right)^4 \right] - 1 \right\}.$$

Второе слагаемое $\zeta(x)$ предполагается несимметричным, описывается следующим соотношением:

$$\zeta(x) = A\tilde{A} [\cos(nx + \varphi) - 1]$$

и представляет собой добавку к симметричной части профиля гармонической функции n -й гармоники с произвольной амплитудой \tilde{A} и фазой смещения φ .

Таким образом, $h(x)$ можно привести практически к любому желаемому виду. В частности, при $q_d = 1$ и $\tilde{A} = 0$ это просто синусоида. Подбором имеющихся параметров можно получить гладкую функцию с различной степенью несимметрии.

3. МЕТОДИКА ПОИСКА ЖЕЛАЕМЫХ РЕЖИМОВ

Будем исследовать зависимости коэффициентов отражения по мощности для волн E - и H -поляризации от дифракционного параметра d/λ , где λ — длина волны, и амплитуды A такого гофра с целью нахождения несимметрии коэффициентов отражения в положительные и отрицательные порядки дифракции при нормальном падении волны и выявления режимов полного переотражения нормально падающей волны вбок. Исследования будем проводить в интервалах $1 < d/\lambda < 2$ существования зеркальной волны и волн $+1$ -го и -1 -го порядков дифракции, а также $2 < d/\lambda < 3$ существования 0 -го, ± 1 -го и ± 2 -го порядков дифракции.

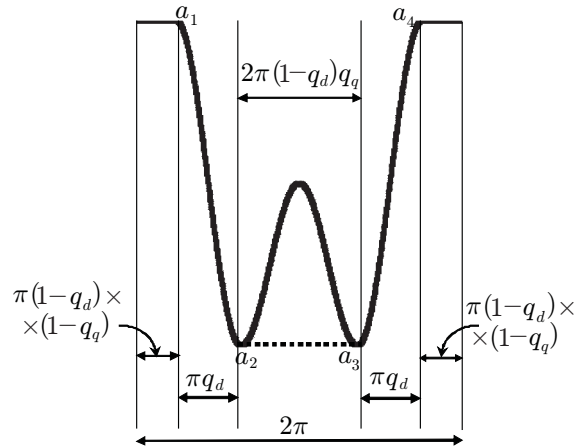


Рис. 1. Представление параметров описания первого слагаемого (симметричной части) функции периода профиля

Для анализа воспользуемся компьютерной программой с визуализацией, написанной на «Visual Fortran» [7], точно решающей задачу о дифракции плоской волны на гофрированной идеально проводящей поверхности с произвольной формой гофра, имеющей в своём алгоритме метод интегрального уравнения [8], уже применявшийся автором в предшествовавших работах сходной тематики в течение достаточно длительного промежутка времени [9, 10]. Указанная программа позволяет наблюдать результаты в процессе счёта и анализировать тенденцию их изменений при изменении параметров. Это даёт возможность оптимизировать параметры профиля с целью достижения желаемой картины рассеяния (получения экстремума коэффициента рассеяния в нужный порядок дифракции) так называемым методом спуска или методом последовательных приближений.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для обычной синусоидальной поверхности коэффициенты отражения в положительные и отрицательные порядки дифракции при нормально падающей волне совпадают друг с другом как в случае E -, так и H -поляризации. Максимальное значение коэффициентов отражения не превосходит 0,5.

Рассмотрим профиль поверхности, обладающей в терминологии [5] сильным перекосом и описываемый в первом варианте представления симметричной части профиля $\zeta(x)$ следующими параметрами:

$$q_d = 0,5, \quad q_q = 0,5, \quad n = 2, \quad \hat{A} = -0,5, \quad \varphi = 90^\circ.$$

Будем исследовать коэффициент отражения в -1 -й дифракционный порядок нормально падающей H -поляризованной волны при варьировании амплитуды дополнительной синусоиды \tilde{A} , дифракционного параметра d/λ и амплитуды профиля A . Максимум коэффициента отражения приходится на $d/\lambda = 1,08$, $A = 0,68$, $\tilde{A} = -0,2$ и практически достигает единицы (превосходит 0,999). Это означает практически полное переотражение в -1 -й порядок при данном дифракционном параметре под углом $\theta_{-1} \approx -67^\circ$, отсчитываемым от нормали в плоскости, перпендикулярной ребру решётки.

Профиль гофра на одном периоде с учётом его амплитуды в указанной замечательной точке полной трансформации энергии нормально падающей H -поляризованной волны в -1 -ую гармонику изображён на рис. 2а с учётом одинаковости масштабов осей абсцисс и ординат. Вид канавки профиля напоминает сглаженный прямоугольный треугольник, как у максимально несимметричного эшелетта треугольного типа с явно выраженным углом блеска, осуществляющего похожий режим [5].

На рис. 2б изображены зависимости коэффициентов (по мощности) и углов отражения нормально падающей на такую поверхность H -поляризованной волны в -2 -й, -1 -й, 0 -й, $+1$ -й и $+2$ -й порядки дифракции от дифракционного параметра в интервале $1 < d/\lambda < 3$. Пунктирными линиями на этом же рисунке изображены зависимости модулей углов отражения в -2 -й, -1 -й, $+1$ -й и $+2$ -й порядки. Точка полного переотражения в -1 -й порядок дифракции при $d/\lambda = 1,08$ находится недалеко от границы возникновения волн -1 -го и $+1$ -го порядка дифракции. Вследствие этого рассматриваемый режим является достаточно узкополосным. Кроме вышеуказанной, на этом графике есть ещё две достойные внимания точки. В первой коэффициент отражения в 0 -й порядок достигает единицы при $d/\lambda = 1,94$ — это полное отражение обратно по нормали. Во второй коэффициент отражения в -2 -й порядок достигает максимума ($R_{-2} = 0,77$) при $d/\lambda = 2,29$ ($\theta_{-2} \approx -61^\circ$).

Изменением параметров профиля можно сместить искомый режим полной трансформации H -поляризованной нормально падающей волны в -1 -й порядок дифракции к середине одновол-

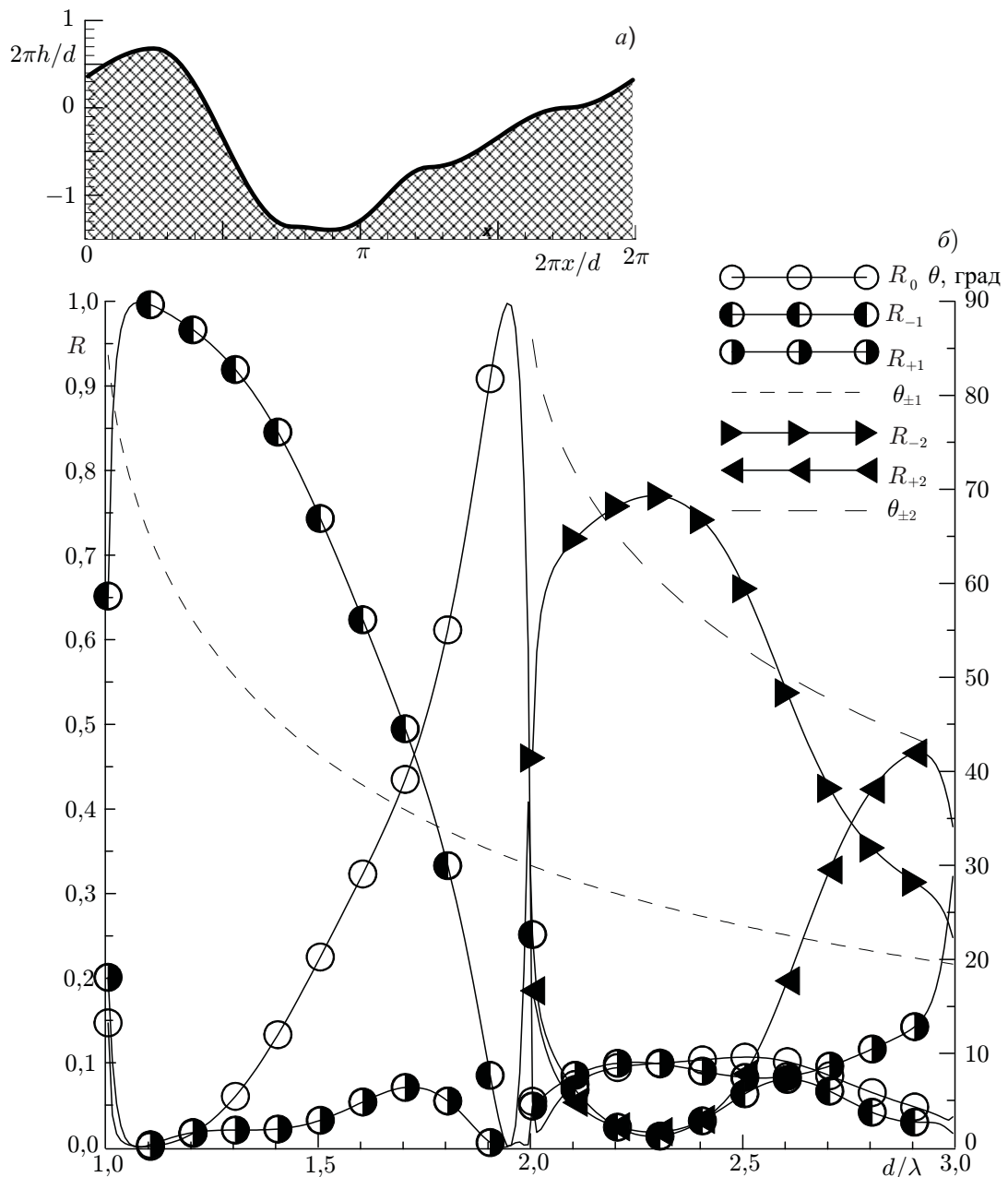


Рис. 2. (а) Профиль периода гладкого эшелетта, осуществляющего полное переотражение нормально падающей H -поляризованной волны в -1 -й порядок дифракции под углом $\theta_{-1} \approx -67^\circ$ ($d/\lambda = 1,08$) и (б) зависимости коэффициентов R (по мощности) и углов θ отражения в -2 -й, -1 -й, 0 -й, $+1$ -й и $+2$ -й порядки дифракции от дифракционного параметра

нового интервала $1 < d/\lambda < 2$, ожидая его большей широкополосности. Так, при следующих параметрах в том же описании:

$$q_d = 0,47, \quad q_q = 0,75, \quad \tilde{A} = 0,41, \quad n = 1, \quad \hat{A} = -0,64, \quad \varphi = 90^\circ,$$

и общей амплитуде профиля $A = 0,58$ (рис. 3а) искомый режим реализуется при $d/\lambda = 1,61$, что соответствует $\theta_{-1} \approx -38^\circ$. Как видно из рис. 3б, демонстрирующего коэффициенты и углы отражения по отношению к данному профилю по аналогии с рис. 2б, полоса исследуемого

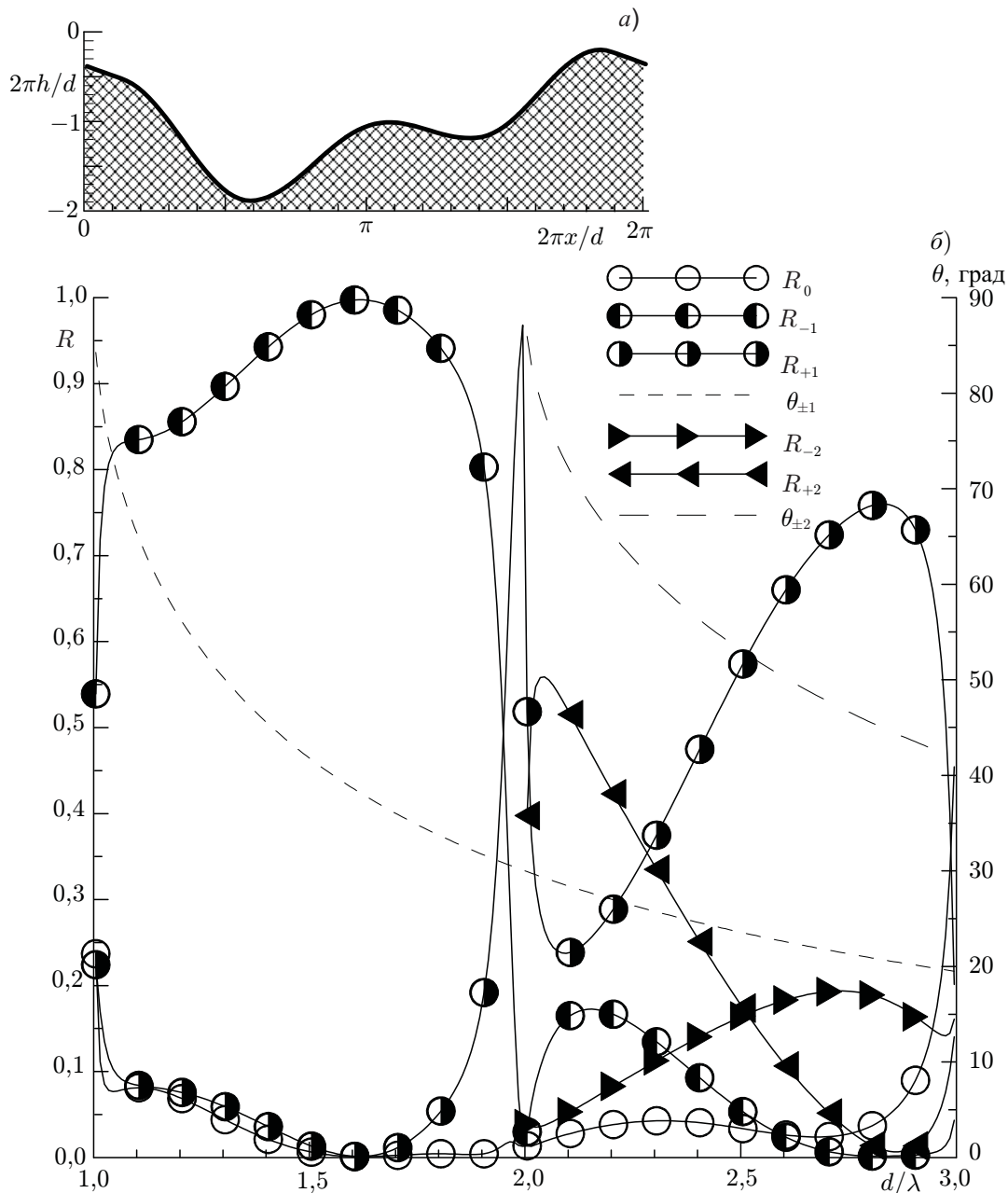


Рис. 3. (а) Профиль периода гладкого эшелетта, осуществляющего полное переотражение нормально падающей *H*-поляризованной волны в -1 -й порядок дифракции под углом $\theta_{-1} \approx -38^\circ$ ($d/\lambda = 1,61$) и (б) зависимости коэффициентов R (по мощности) и углов θ отражения в -2 -й, -1 -й, 0 -й, $+1$ -й и $+2$ -й порядки дифракции от дифракционного параметра

режима здесь существенно шире. Недалеко от границы возникновения волн -2 -го и $+2$ -го порядков дифракции наблюдается интенсивный всплеск коэффициента отражения в $+1$ -й порядок. Он достигает величины $0,97$ на самой границе интервала (при $d/\lambda = 2$), а затем резко падает при $d/\lambda \geq 2$, вновь достигая максимума, приблизительно равного $0,76$, при $d/\lambda = 2,83$, что соответствует углу отражения $\theta_1 \approx 21^\circ$.

Далее отойдем в рассмотрении от профилей, напоминающих обычные сглаженные эшелетты и будем исследовать более сложные профили, которые можно построить с помощью вышеука-

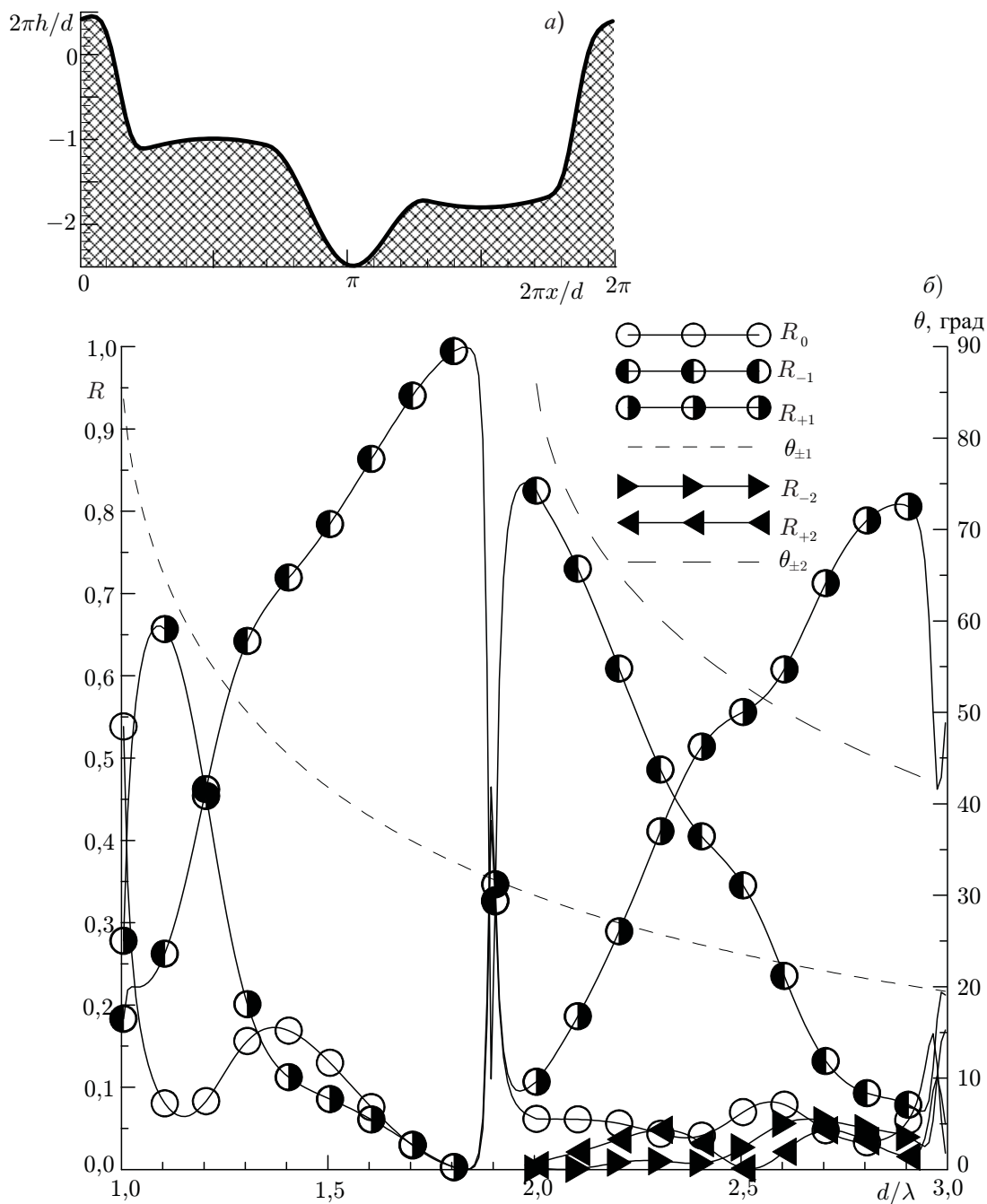


Рис. 4. (а) Профиль периода гладкого эшелетта, осуществляющего полное переотражение нормально падающей H -поляризованной волны в -1 -й порядок дифракции под углом $\theta_{-1} \approx -33^\circ$ ($d/\lambda = 1,83$) и (б) зависимости коэффициентов R (по мощности) и углов θ отражения в -2 -й, -1 -й, 0 -й, $+1$ -й и $+2$ -й порядки дифракции от дифракционного параметра

занных параметров. Найдём среди них формы, реализующие режимы полного переотражения нормально падающей волны в одну сторону при больших (близких к границе с двухволновой областью) дифракционных параметрах и соответствующих им углах для H -поляризованной волны.

Пример такого профиля изображён на рис. 4а. Данный профиль описывается во втором ва-

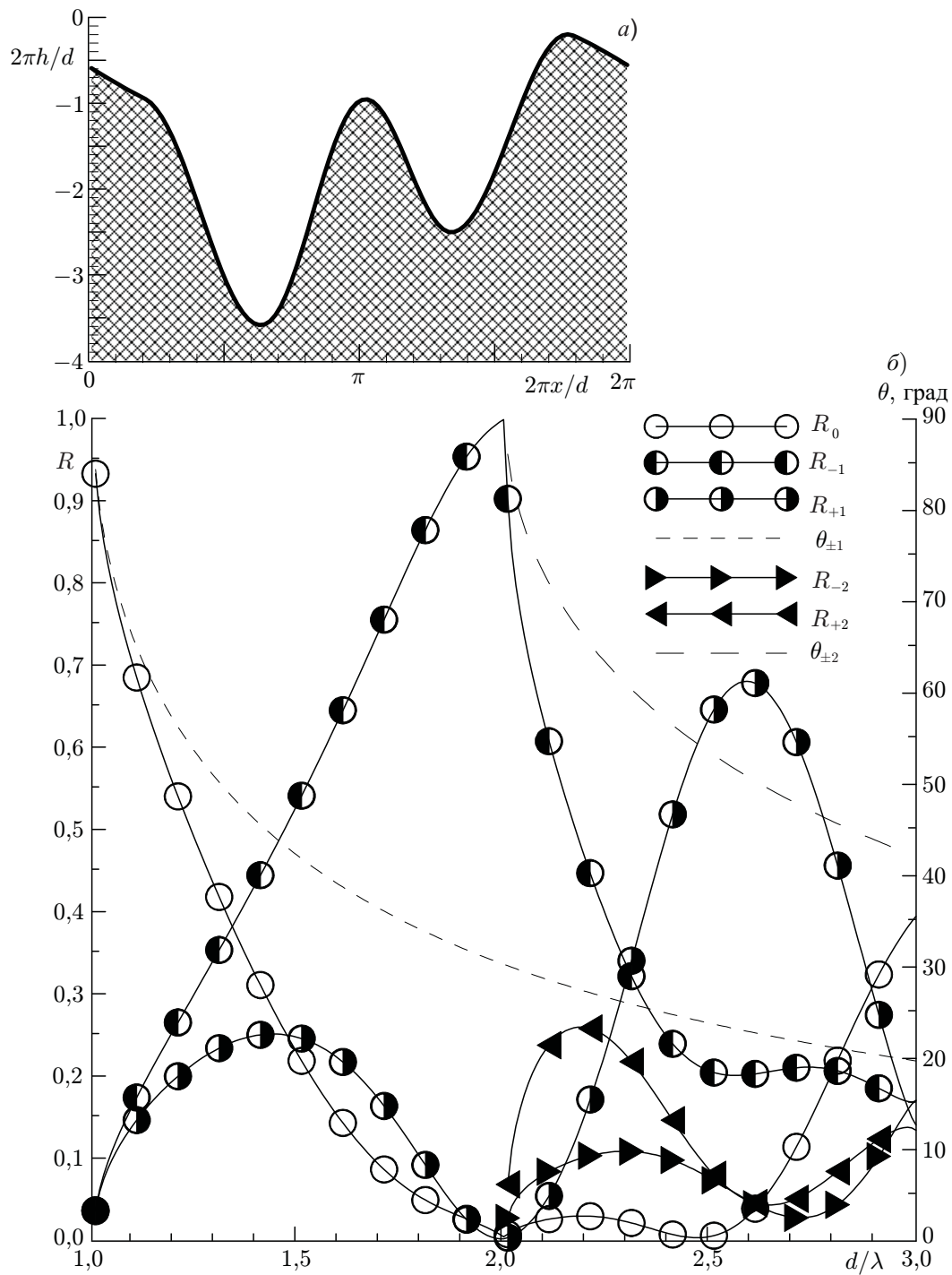


Рис. 5. (а) Профиль периода гладкого эшелетта, осуществляющего полное переотражение нормально падающей E -поляризованной волны в -1 -й порядок дифракции под углом $\theta_{-1} \approx -30^\circ$ ($d/\lambda = 2$) и (б) зависимости коэффициентов R (по мощности) и углов θ отражения в -2 -й, -1 -й, 0 -й, $+1$ -й и $+2$ -й порядки дифракции от дифракционного параметра

рианте представления симметричной части функции следующими параметрами:

$$q_d = 0,5, \quad q_q = 0,6, \quad \tilde{A} = -0,6, \quad n = 1, \quad \hat{A} = -0,45, \quad \varphi = 90^\circ.$$

При $d/\lambda = 1,83$, $A = 0,90$ коэффициент отражения в -1 -й порядок дифракции практически

достигает единицы (превосходит 0,999). Практически полное переотражение в данном случае происходит под углом $\theta_{-1} \approx -33^\circ$, отсчитываемым от нормали. На рис. 4б приведены аналогичные рис. 2б и 3б зависимости для изображённой на рис. 4а поверхности. Зависимость коэффициента отражения в -1 -й порядок дифракции после того, как она практически достигает единицы, имеет резкий узкий провал при $d/\lambda = 1,90$, опускаясь ниже 0,1, а затем при $d/\lambda = 1,98$ вновь поднимается до 0,83.

Исследуем теперь возможность достижения практически полного переотражения нормально падающей волны в -1 -й порядок дифракции для E -поляризации. Достаточно гладкий и не слишком глубокий профиль, состоящий из двух различных по глубине канавок на одном периоде (рис. 5а) и описываемый в первом варианте представления симметричной части параметрами

$$q_d = 0,44, \quad q_q = 0,63, \quad \tilde{A} = 0,86, \quad n = 1, \quad \hat{A} = 0,5, \quad \varphi = 87^\circ,$$

обеспечивает при $A = 1,21$ наличие искомого режима непосредственно на границе одноволновой и двухволновой областей $d/\lambda = 2$ (рис. 5б) при угле отражения $\theta_{-1} \approx -30^\circ$. Сдвиг данного режима в сторону меньших дифракционных параметров ($d/\lambda \leq 2$) и соответственно, больших углов отражения ($|\theta_{-1}| \geq 30^\circ$) возможен только за счёт либо значительного углубления профиля:

$$q_d = 0,33, \quad q_q = 0,58, \quad \tilde{A} = 0,96, \quad n = 1, \quad \hat{A} = 0,31, \quad \varphi = 90^\circ,$$

при $A = 2,09$ ($d/\lambda = 1,96$, $\theta_{-1} \approx -30^\circ 30'$), либо за счёт существенного утончения перегородки между канавками:

$$q_d = 0,69, \quad q_q = 0,44, \quad \tilde{A} = 0,96, \quad n = 1, \quad \hat{A} = 0,31, \quad \varphi = 88^\circ,$$

при $A = 1,55$ ($d/\lambda = 1,95$, $\theta_{-1} \approx -31^\circ$).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в процессе исследования режима полной трансформации нормально падающей на гофрированную металлическую поверхность волны в -1 -й порядок дифракции на достаточно простых гладких профилях гофрировки в приближении отсутствия потерь показано следующее.

- 1) Рассматриваемые режимы полного рассеяния в одну сторону возможны только на несимметричных профилях гофрировки.
- 2) Для их осуществления требуется достаточное количество параметров в описании профилей, приблизительно соответствующее количеству распространяющихся волн.
- 3) Могут быть построены профили, обеспечивающие указанные режимы как для H -, так и для E -поляризованных волн.

В работе приводятся примеры профилей, реализующих такие режимы, проиллюстрированные подробным графическим описанием дифракционных свойств.

Работа выполнена при поддержке Совета при Президенте РФ по поддержке ведущих научных школ (грант НШ-1244.2008.02) и РФФИ (грант 08-02-01233). Автор выражает благодарность С. Н. Власову и М. И. Петелину за внимание к работе и ценные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косарев Е. Л. // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т. 3, вып. 7. С. 295.

2. Власов С. Н., Копосова Е. В., Павельев А. Б. и др. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17, вып. 4. С. 8.
3. Копосова Е. В. // ЖТФ. 1995. Т. 65, вып. 2. С. 163.
4. Большая советская энциклопедия. Эшелетт. <http://bse.sci-lib.com/article127496.html>.
5. Шестопалов В. П., Кириленко А. А., Масалов С. А., Сиренко Ю. К. Резонансное рассеяние волн. Т. 1. Дифракционные решётки. Киев: Наукова думка, 1986.
6. Копосова Е. В., Петелин М. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32, № 9. С. 1178.
7. Штыков В. В. FORTRAN and Win32 API. Создание программного интерфейса для Windows средствами современного Фортрана. М.: Диалог МИФИ, 2001.
8. Electromagnetic theory of gratings / Ed. by R. Petit. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1980.
9. Шейнина Е. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. С. 885.
10. Власов С. Н., Копосова Е. В., Лапшина А. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 5. С. 391.

Поступила в редакцию 15 февраля 2010 г.; принята в печать 30 апреля 2010 г.

COMPLETE TRANSFORMATION OF A NORMALLY INCIDENT WAVE TO THE -1^{st} DIFFRACTION ORDER BY A SMOOTH ECHELETTE

E. V. Kuposova

We study the regime of complete transformation of a wave, which is incident normally on a corrugated metal surface, to the -1^{st} diffraction order (to one side) for rather simple smooth corrugation profiles, while neglecting losses. The study is based on the solving of the integral equation numerically by using an interactive computer code developed by the author. It is shown that the regimes under consideration can exist only in the case of asymmetric corrugation profiles. Realization of such regimes requires a comparatively great number of parameters in the profile description. One can develop the profiles, which ensure the specified regimes for both H - and E -polarized waves. Several examples of such profiles are presented and illustrated with detailed graphic descriptions of their diffraction properties.