

01; 09

© 1992

РЕШЕТКИ С НЕЗЕРКАЛЬНЫМ ОТРАЖЕНИЕМ
В ПРОИЗВОЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ

С.Н. В л а с о в, Е.В. К о п о с о в а

Возможность полного преобразования энергии, падающей под углом на решетку волны в один из дифракционных максимумов, не являющийся ни зеркальным, ни антизеркальным, обсуждался неоднократно [1-4]. На основе численного анализа для достаточно простых решеток [1] было высказано утверждение, что для двухволнового режима, когда распространяющимися являются только нулевая и минус первая пространственные гармоники дифрагированного поля, полное отражение в незеркальном направлении возможно только в том случае, если оно совпадает с антизеркальным, т. е. при выполнении условия автоколлимации. В [2] была показана принципиальная возможность полного отражения в направлении, не совпадающем с зеркальным и антизеркальным для многоволновой области и численно исследован такой режим при больших углах телескопичности на гофре в виде волноводных канавок, содержащих диэлектрическое заполнение. В настоящей заметке построим систему решеток, способную отражать волну в широкой области углов падения и рассеяния.

Рассмотрим идеально-проводящую периодически гофрированную поверхность с таким периодом d , что падающая под углом θ_i плоская волна рассеивается лишь в два дифракционных максимума — нулевой и минус первый с комплексными коэффициентами рассеяния соответственно R_0 и R_{-1} . На расстоянии l выше этой поверхности размещается полупрозрачная структура, например, диэлектрическая пластина или решетка из брусьев с такими параметрами, чтобы отраженная от гофрированной поверхности под углом θ_{-1} минус первая пространственная гармоника полностью проходила через эту пластину или решетку (рис. 1), а отраженная от гофрированной поверхности под углом θ_0 зеркальная волна или нулевая пространственная гармоника частично отражалась с ненулевым коэффициентом r :

$$r_{-1} = 0, \tag{1}$$

$$r \neq 0.$$

Тогда поля рассматриваемых волн над пластиной или решеткой из брусьев и под ней, если пренебречь взаимодействием локализованных гармоник, связаны следующими соотношениями:

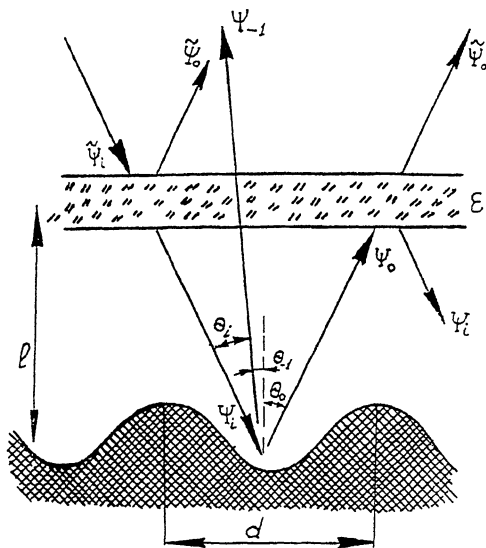


Рис. 1. Рассеяние волны на системе: идеально - проводящая гофрированная поверхность и полупрозрачная структура в виде диэлектрической пластины.

$$\tilde{\psi}_o = r \tilde{\psi}_i + it \psi_o \exp(ik\tilde{l}), \quad (2)$$

$$\psi_i = r \psi_o \exp(ik\tilde{l}) + it \tilde{\psi}_i, \quad (3)$$

где $\tilde{l} = l/\cos\theta_0$; it - коэффициент передачи через полупрозрачную структуру: $\arg t = \arg r$ [5]. На гофрированной поверхности поля в том же предположении связаны соотношениями, учитывающими дифракцию волны на ней:

$$\psi_o = R_o \psi_i \exp(ik\tilde{l}), \quad (4)$$

$$\psi_{-1} = R_{-1} \psi_i \exp(ik\tilde{l}), \quad (5)$$

где $|R_{-1}|^2 = 1 - |R_o|^2$. Подставляя (4) в (2) и (3) и полагая $\tilde{\psi}_o = 0$ - отсутствие поля зеркальной волны над пластиной или решеткой из брусьев, имеем:

$$\begin{cases} r \tilde{\psi}_i + it R_o \psi_i \exp(2ik\tilde{l}) = 0, \\ it \tilde{\psi}_i + r R_o \psi_i \exp(2ik\tilde{l}) = \psi_i, \end{cases} \quad (6)$$

откуда из нетривиальности ψ_i получаем связь между r и R_o в виде:

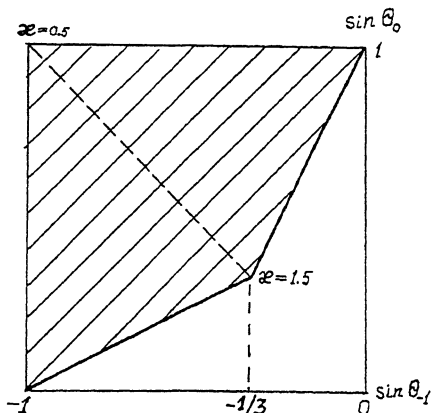


Рис. 2. Диаграмма углов падения и отражения.

$$\begin{vmatrix} r & itR_0 \exp(2ik\tilde{l}) \\ it & rR_0 \exp(2ik\tilde{l}) - 1 \end{vmatrix} = 0. \quad (7)$$

Полагая $r = |r| \exp(i\varphi_r)$, $R_0 = |R_0| \exp(i\varphi_R)$ и учитывая $|r|^2 + |t|^2 = 1$, имеем

$$|r| = |R_0|, \quad (8)$$

$$\varphi_r + \varphi_R = -2ik\tilde{l}. \quad (9)$$

Таким образом, для обеспечения полного преобразования волны в минус первую гармонику необходимо путем подбора амплитуды гофрированной поверхности сравнять по модулю коэффициенты отражения от нее в зеркальный максимум с коэффициентом отражения от полупрозрачной структуры. Выполнение фазового условия (9) всегда может быть обеспечено подстройкой расстояния \tilde{l} .

Нетрудно видеть, что свойства описанной системы аналогичны свойствам интерферометра Фабри-Перо, полная прозрачность которого достигается при равных коэффициентах отражения от зеркал соответствующим подбором расстояния между ними.

Направление распространения отраженной от гофрированной поверхности минус первой пространственной гармоники θ_{-1} , являющееся направлением полной трансформации излучения, определяется углом отражения нулевой пространственной гармоники $\theta_0 = -\theta_i$ и параметром отношения периода гофра к длине волны

$$k = d/\lambda \quad (10)$$

$$\sin \theta_{-1} = \sin \theta_0 - \lambda/k$$

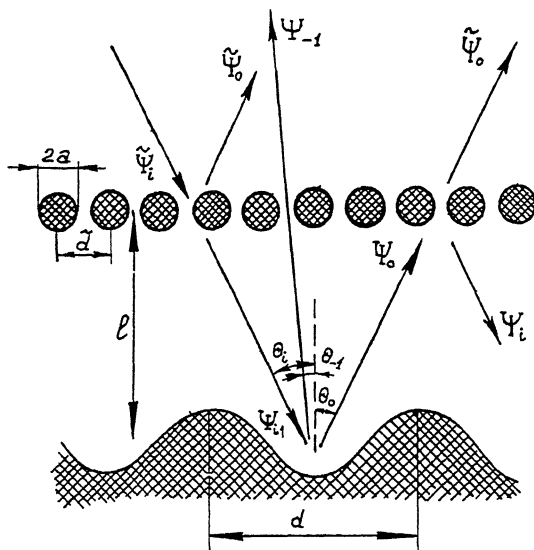


Рис. 3. Рассеивающая система с металлическими круглыми брус-
ьями в качестве полупрозрачной структуры.

при дополнительном условии наличия двухволнового режима: „при-
жатости“ плюс первой и минус второй гармоник:

$$l - l/k < \sin \theta_o < 2/k - 1. \quad (11)$$

Диаграмма всех возможных „направлений падения – отражения“
представлена на рис. 2. Из нее следует, что большие, близкие к
скользящим, углы отражения можно получить лишь при малых,
близких к нормальным, углах падения. Равные углы падения и
отражения соответствуют автоколлимации (отмечено пунктиром).
Этому режиму соответствуют и крайние значения k , определяю-
щие двухволновую область. Прямые, изображенные на диаграмме,
определяемые соотношением (10), показывают связь углов паде-
ния и отражения при фиксированном k .

Рассмотрим различные варианты построения рассматриваемой
системы с использованием решетки из металлических круглых
брусьев. Характеристики таких решеток подробно исследованы в
[2].

Отметим, что решетка из брусьев, расположенных параллельно
образующей гофрированной поверхности (рис. 3) и работающая на
эффекте Малюжинца [2], способна полностью пропускать волну
Н-поляризации, падающую под углом $|\theta_i| \approx \arccos \delta$, где δ –
относительная ширина щелей на периоде. При этом $\tilde{k} = d/\lambda < 0.5$.
Однако сильная зависимость коэффициента прохождения от угла,
необходимая для выполнения условий (1), имеется лишь при малых

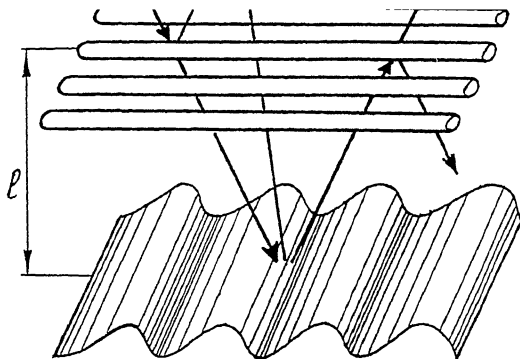


Рис. 4. Рассеивающая структура с брусьями, расположенными поперек образующей гофрированной поверхности.

$\delta < 0.5$, и следовательно, больших $|\theta_{-1}| \geq 60^\circ$. При больших δ (разреженная решетка) становится почти прозрачной практически на всех углах. Это обстоятельство существенно затрудняет построение вышеописанной конструкции на малые углы отражения падающей волны.

Значительно удобнее (особенно для малых углов отражения θ_{-1}) использовать „поперечное расположение” брусьев относительно образующих гофрированной поверхности (рис. 4). В случае такого расположения задача рассеяния на решетке из брусьев волн ψ_0 и ψ_{-1} под углами θ_0 и θ_{-1} сводится к эквивалентной задаче о рассеянии на этой решетке нормально падающих волн с эквивалентными поперечными волновыми числами $\tilde{k} \cos \theta_0$ и $\tilde{k} \cos \theta_{-1}$. Условие (1) при этом может быть легко выполнено [2] для той и другой поляризации. Режим просветления для ψ_{-1} имеет место при $\tilde{k}^* = (\tilde{d}/\lambda)^* < 1$, обычно близком к точке возникновения плюс-минус первых гармоник этой решетки. Коэффициент отражения для нулевой гармоники ψ_0 при этом отличен от нуля и легко вычисляется.

Приведем пример полной трансформации волны, падающей под углом $\theta_i = -45^\circ$ в волну, рассеянную под углом $\theta_{-1} \approx -23^\circ$. Гофрированная поверхность представляет собой синусоиду с $d/\lambda = 0.9$, амплитудой $A_0 = 1.2 \frac{d}{2\pi}$. Верхняя решетка состоит из проволок с периодом расположения $\tilde{d}/\lambda = 0.8$ и диаметром $\phi/\lambda = 0.75 \tilde{d}/\lambda = 0.6$. Такая решетка полностью пропускает волну с эффективным

$$(\tilde{d}/\lambda)_{eff} = 0.8 \cos 23^\circ \approx 0.73$$

и рассеивает волну с

$$\left(\tilde{d}/\lambda\right)_{eff} = 0.8 \cos 45^\circ \approx 0.56$$

с коэффициентом отражения $r = 0.76$. Подбирая амплитуду для гофрированной поверхности под $R_0 \approx 0.76$, получаем конструкцию, полностью отражающую волну, падающую под углом $\theta_i = -45^\circ$ в направлении $\theta_r = -23^\circ$.

В некоторых случаях для обеспечения лучшей селективности или поляризационных эффектов образующие решетки из брусьев и гофрированной поверхности могут располагаться под углом. Однако для любого подобного случая необходим специальный анализ.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Electromagnetic Theory of Grating / Ed. Petit R. - Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 1980.
- [2] Ш е с т о п а л о в В.П., К и р и л е н к о А.А., М а с а л о в С.А., С и р е н к о Ю.К. Резонансное рассеяние волн. Т. 1. Дифракционные решетки. Киев: Наукова думка, 1986.
- [3] А х м а н о в С.А., С е м и н о г о в В.Н., С о к о л о в В.И. // ЖЭТФ. 1987. Т. 93. В. 5(11). С. 1654.
- [4] П и ш к о О.Ф. Дифракция волн на многоступенчатой отражательной решетке прямоугольного профиля / В сб. науч. тр. „Распространение и дифракция радиоволн в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах“. Киев: Наукова думка, 1984. С. 128-138.
- [5] А л ь т м а н Дж.Л. Устройства сверхвысоких частот / Пер. с англ. под ред. проф. Лебедева И.В. М.: Мир, 1968.

Поступило в Редакцию
15 апреля 1992 г.