

01;09;12

## Экспериментальное исследование резонансного отражения плоской электромагнитной волны от редкой ленточной решетки

© С.Н. Воробьев<sup>1</sup>, И.К. Кузмичев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Радиоастрономический институт АН Украины,  
310002 Харьков, Украина

<sup>2</sup> Институт радиофизики и электроники АН Украины,  
310085 Харьков, Украина

(Поступило в Редакцию 15 апреля 1996 г.)

Экспериментально подтвержден и изучен режим резонансного отражения плоской электромагнитной волны от дифракционной решетки, состоящей из редко расположенных тонких наклонных металлических лент. Получено хорошее совпадение эксперимента с известными теоретическими данными.

Электромагнитные поля, рассеянные решетками из одинаковых тонких металлических лент, обладают свойствами, позволяющими успешно использовать такие структуры в антенной технике и устройствах сверхвысоких частот. Применение ленточных решеток в качестве селективных элементов достаточно разнообразно [1–5]. В частности, решетка из наклонных металлических лент может использоваться как направленный ответвитель или полупрозрачный экран с регулируемым уровнем деления, который при определенном соотношении ширины лент, угла их наклона к плоскости решетки и ее периода может изменяться в широких пределах — практически от нуля до единицы. Отражение волн от решетки имеет четко выраженный резонансный характер, поскольку оно обусловлено интерференционным взаимодействием полей в областях между лентами.

В работе [6] на основе строгого решения задачи дифракции электромагнитных волн на периодической решетке было обнаружено, а в работе [7] изучено явление полного резонансного отражения плоской  $H$ -поляризованной волны от редкой решетки из наклонных лент. Целью данной работы является экспериментальная проверка существования таких резонансов в реальных эквидистантных решетках, а также выяснение точности совпадения теоретических результатов с практическими данными. Это позволит оценить справедливость допущений математической модели решетки (идеальная проводимость и бесконечно малая толщина лент) и в дальнейшем, используя режим резонансного отражения, создать сложные электродинамические системы миллиметрового диапазона длин волн.

Физически резонанс полного отражения в бесконечной периодической решетке интерпретируется как возбуждение нормально падающей на решетку плоской волной двух собственных волн структуры, которые распространяются вдоль решетки (т.е. в направлении перпендикулярном ребрам лент) навстречу друг другу. Таким образом, в области решетки устанавливается высокодобротный режим стоячих волн и, следовательно, решетка оказывается "невосприимчивой" к падающему полю, которое возбуждает собственные волны структуры. Други-

ми словами, решетка с редко расположенными лентами для такой плоской волны ведет себя как идеально отражающий экран [7].

Из численного анализа, проведенного в [7], следует, что решетка, состоящая из семи элементов, с параметрами  $d/l = 0.25$ ,  $\psi = 45^\circ$  ( $2d$  — ширина ленты;  $l$  — период решетки;  $\psi$  — угол наклона лент, отсчитываемый от нормали к плоскости решетки) отражает  $\sim 80\%$  энергии падающей волны, т.е. модуль коэффициента отражения по полю имеет величину  $|\Gamma| \approx 0.9$ . Напомним, что необходимым условием режима полного резонансного отражения является существование в спектре волн периодической решетки только одной, основной распространяющейся волны. Это соответствует наличию одного доминирующего лепестка в диаграмме направленности отраженного поля для ограниченной структуры.

Для экспериментального исследования была изготовлена решетка с параметрами  $2d = 1.835$  mm,  $l = 3.67$  mm,  $\psi = 45^\circ$ , толщина лент из медной фольги составляет 0.3 mm (величина  $d/l$  и угол  $\psi$  совпадают с приведенными выше данными из [7], а число лент равно 12 (решетка представлена на рис. 1). Это достаточно

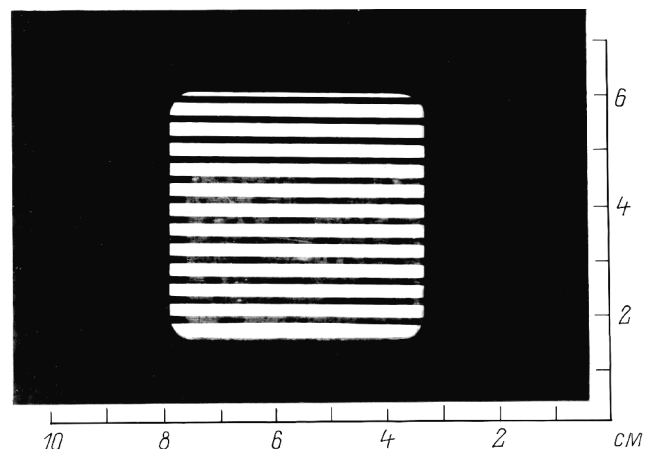
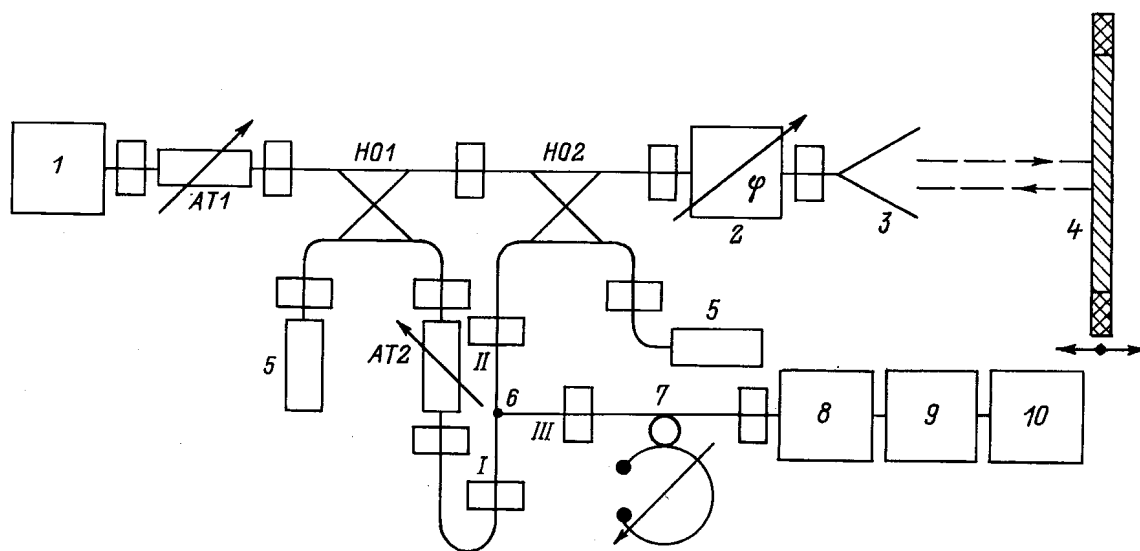


Рис. 1. Редкая решетка из наклонных лент. Оправка, в которую вставлены ленты, закрыта поглощающим экраном для устранения переотражений.



**Рис. 2.** Схема экспериментальной и измерительной установки. 1 — генератор сигналов высокочастотный Г4-142, 2 — фазовращатель, 3 — рупорная антенна, 4 — экран с исследуемой решеткой, 5 — согласованная нагрузка, 6 — E-тройник, 7 — волномер, 8 — детекторная секция, 9 — усилитель измерительный, 10 — осциллограф, AT1 — аттенюатор развязывающий, AT2 — аттенюатор поляризационный, HO1 и HO2 — направленные ответвители.

редкая решетка (расстояние между лентами превышает видимый размер ленты), не имеющая волноводных областей между соседними лентами [6,7]. Число лент в решетке выбиралось исходя из следующих соображений. Во-первых, эквидистантная структура с числом элементов, большим 10, эквивалента по электродинамическим характеристикам бесконечной периодической решетке с относительной точностью  $\delta \sim 1\%$  (если пользоваться для оценки соответствия критерием, приведенным в [8]), а для решетки из семи элементов, как указано в [7], величина  $\delta \sim 12\%$ . Значит, режим резонансного отражения на решетке, состоящей из 12 лент, будет более четким, чем для семиэлементной решетки. Кроме того, с увеличением числа элементов в структуре уменьшается излучение вдоль решетки [7,8], которое в данном случае является паразитным. Во-вторых, если поместить такую решетку, например, в открытый резонатор, в котором существует основной тип колебаний  $TEM_{00q}$ , то "пятно" поля должно "осветить" не менее трех лент структуры, чтобы возбудить в решетке режим резонансного отражения. Заметим, что при наличии в открытом резонаторе одного из высших типов колебаний ( $TEM_{20q}$  или тем более  $TEM_{40q}$  распределение полей в плоскости расположения решетки существенно превысит размеры "пятна" поля основного типа колебаний такой системы. В-третьих, желательно исследовать решетку небольших размеров (значит, число лент должно быть невелико), если иметь в виду последующее ее применение в качестве составного элемента электродинамической системы.

Измерения проводились в диапазоне длин волн  $\lambda = 4.0 \dots 4.6$  мм. Блок-схема измерительной установки приведена на рис. 2. Решетка (рис. 1) размером

$50 \times 50$  мм, помещенная в поглощающий экран способна перемещаться перпендикулярно облучающей антенне. Сигнал, отраженный от исследуемой решетки, через фазовращатель, направленный ответвитель 2 (HO2) плечи II и III E-тройника, поступает в приемный тракт, состоящий из детектора, измерительного усилителя и осциллографа. Для контроля частоты генератора Г4-142 в приемный тракт включен волномер. При перемещении экрана с решеткой (рис. 2) сигнал на экране осциллографа изменяется по синусоидальному закону (это связано с отражением от решетки). Переотражения от антенны (представляющей собой пирамидальный рупор) и различных тел, расположенных в поле ее излучения, устранены путем экранировки поглощающими покрытиями.

Методика эксперимента состоит в следующем. Экран с решеткой перемещается и устанавливается таким образом, чтобы отраженный сигнал в плече III E-тройника имел максимальную величину. Затем с помощью аттенюатора 2 (AT2) и фазовращателя добиваются компенсации сигналов в плече III E-тройника (одного — отраженного от решетки и поступающего в плечо II E-тройника и другого — опорного сигнала от генератора в плече I E-тройника), фиксируя при этом показания AT2, равные значению  $a_1$ . После этого производится калибровка измерительной установки. Исследуемая решетка заменяется идеально отражающим медным листом и снова проводится балансировка E-тройника с помощью фазовращателя и AT2, показания которого при этом имеют величину  $a_2$ . В результате модуль коэффициента отражения по полю  $|\Gamma|$  от исследуемой решетки легко вычисляется по формуле [3,9]  $|\Gamma| = 10^{a/20}$ , где  $a = a_2 - a_1$ .

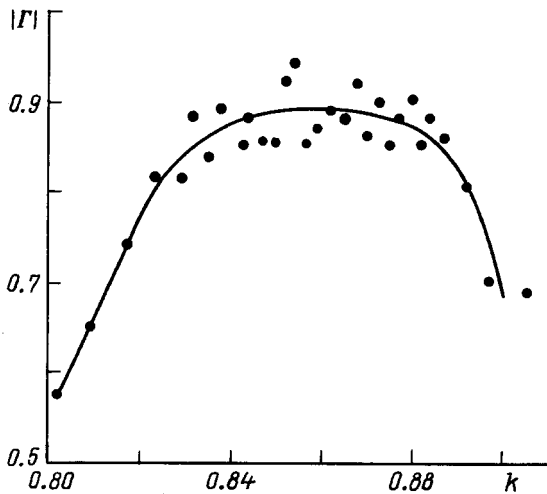


Рис. 3. Зависимость модуля коэффициента отражения  $|\Gamma|$  от частотного параметра  $\kappa$ .

На рис. 3 представлены измеренные значения коэффициента отражения  $|\Gamma|$  от безразмерного частотного параметра  $\kappa = l/\lambda$ . Мелкомасштабные осцилляции экспериментально снятой зависимости  $|\Gamma(\kappa)|$  (точки на рис. 3 обозначают измеренные значения  $|\Gamma|$ ) вызваны, по-видимому, неустранимыми переотражениями от объектов, находящихся достаточно далеко от экспериментальной установки. Близкая к истинной усредненная зависимость  $|\Gamma(\kappa)|$  приведена на рис. 3 сплошной кривой, из анализа которой следует, что в интервале частот  $\kappa_{\text{refl}} = 0.85 \dots 0.87$  существует резонансное отражение волн в решетке. Измеренное значение частоты  $\kappa_{\text{refl}} = 0.86$  совпадает с теоретически полученным в [7] (разница в величинах составляет менее 5%, при этом учтено смещение рассчитанного значения  $\kappa_{\text{refl}}$  для решетки с большим числом лент).

Следовательно, математическая модель решетки и происходящих в ней процессов рассеяния волн практически адекватна тем условиям, которые имели место в эксперименте, таким образом, известные допущения математической модели можно считать оправданными. Применение строгого электродинамического метода решения краевой задачи в [7] и тщательно проведенный эксперимент привели к хорошему совпадению расчетных и измеренных физических характеристик эффекта резонансного отражения волн.

В заключение отметим, что полученные результаты открывают возможность создания сложных электродинамических систем, в частности, на основе открытого резонатора, в котором редкая решетка из наклонных лент (специальным образом помещенная в объем резонатора) служит селективным управляющим элементом. Метод, изложенный в [7,8], позволяет провести предварительное численное изучение процессов дифракции волн в такой сверхвысокочастотной системе, существенно уменьшая объем последующих экспериментальных исследований.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность С.Л. Просвирнину за постоянную поддержку в процессе выполнения работы, а также ценные советы и замечания, высказанные при обсуждении полученных результатов.

## Список литературы

- [1] Шестопалов В.П., Литвиненко Л.Н., Масалов С.А., Сологуб В.Г. Дифракция волн на решетках. Харьков: Изд-во ХГУ, 1973. 287 с.
- [2] Ando M., Takei K. // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1987. Vol. AP-35. N 4. P. 367–371.
- [3] Андросов В.П., Кузмичев И.К. Препринт ИРЭ АН УССР. № 355. Харьков, 1987. 14 с.
- [4] Naqvi S.S.H., Gallagher N.C. // J. Opt. Soc. of America. 1990. Vol. A. N 7. P. 1723–1729.
- [5] Gimeno B., Cruz J.L., Navarro E.A., Such V. // J. Electromagnetic Waves and Applications. 1993. Vol. 7. N 9. P. 1201–1219.
- [6] Воробьев С.Н., Литвиненко Л.Н., Просвирнин С.Л. // ЖВВМ. 1986. Т. 26. № 6. С. 894–905.
- [7] Воробьев С.Н., Просвирнин С.Л. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 3. С. 458–468.
- [8] Воробьев С.Н. // РИЭ. 1987. Т. 32. № 4. С. 687–695.
- [9] Frait Z., Patton C.E. // Rev. Sci. Instr. 1980. Vol. 51. N 8. P. 1092–1094.