

УДК 537.874.6

МНОГОСЛОЙНАЯ ЛЕНТОЧНАЯ РЕШЕТКА. ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ**М. Е. Калиберда, С. А. Погарский, И. И. Сапрыкин, В. Б. Андреев***Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков, 61077, пл. Свободы, 4*
Поступила в редакцию 6 сентября 2010

Операторным методом с использованием метода сингулярных интегральных уравнений рассчитаны коэффициент отражения и диаграмма направленности многослойной структуры, каждый слой которой содержит конечноэлементную ленточную решетку. Исследованы свойства двухслойных структур как на основе предканторового множества, так и эквидистантных с числом лент на каждом слое 5 и 19 при вариации положения решеток. Результаты расчета подтверждены полученными экспериментальными данными. Отмечается резонансный характер изменения коэффициента отражения при вариации расстояния между слоями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ленточная решетка, плоская волна, коэффициент отражения.

Операторним методом з використанням методу сингулярних інтегральних рівнянь розраховано коефіцієнт відбиття та діаграма спрямованості багатошарової структури, кожен шар якої містить скінченноелементну решітку зі стрічок. Досліджені властивості двошарових структур як на основі предканторової множини, так і еквидистантних з кількістю стрічок на кожному шарі 5 та 19 при варіації положення решіток. Результати розрахунків підтверджено експериментальними даними. Відмічається резонансний характер зміни коефіцієнта відбиття при варіації відстані між шарами.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: решітка зі стрічок, плоска хвиля, коефіцієнт відбиття.

The reflection coefficient and directional pattern of multilayered structure are computed with the use of operator approach and the method of singular integral equations. Every layer consists of finite element strip grating. The properties of double layered structures based on pre-Cantor set as well as on equidistant ones with 5 and 19 strips on every layer when the displacement of gratings is varied are studied. The numerical results are confirmed by obtained experimental data. The resonant behavior of reflection coefficient when the distance between slots is varied is observed.

KEY WORDS: strip grating, plane wave, reflection coefficient.**ВВЕДЕНИЕ**

Исследование многослойных ленточных решеток представляет несомненный интерес для современной радиофизики в силу того, что такие решетки используются при создании антенных, селективных устройств, метаматериалов и др. [1-4]. Многослойные ленточные решетки могут использоваться как полупрозрачный экран, у которого коэффициент отражения, при определенном соотношении ширины ленты, расстояния между лентами и слоями может изменяться практически от нуля до единицы [5].

Структуры, использующие ленточные проводники давно стали неотъемлемой частью ряда функциональных элементов и, в первую очередь, антенных структур. Для их синтеза необходимы модели, позволяющие описывать свойства ограниченных структур, поля в которых имеют непрерывный пространственный спектр.

Целью данной работы является исследование свойств многослойной конечноэлементной ленточной решетки, и экспериментальная проверка теоретических данных, полученных в предположении бесконечной проводимости и нулевой толщины лент. Для теоретического анализа выбран операторный метод [6]. При использовании операторного метода необходимо решить ключевую задачу – задачу дифракции на одиночном препятствии. Далее, используя операторные уравнения, можно определить свойства всей структуры.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Расположим в свободном пространстве первую плоскую решетку в плоскости $z = 0$ так, чтобы начало координат находилось посередине решетки. В плоскости $z = -nh$ расположим $(n + 1)$ -ю решетку, $n = 1, 2, \dots, M - 1$, так, чтобы расстояние между серединами соседних решеток равнялось Δ . Система координат и геометрия структуры показаны на рис.1. Зависимость от времени примем в виде $e^{-i\omega t}$.

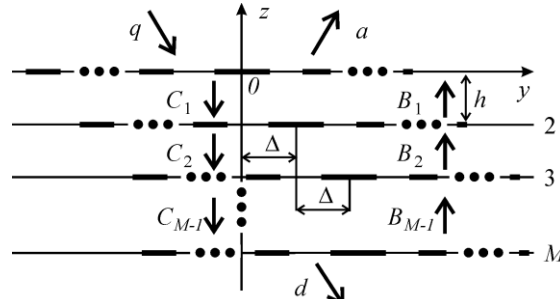


Рис. 1. Геометрия исследуемой структуры.

В случае E - поляризации будем рассматривать E_x компоненту электрического поля, а в случае H - поляризации – H_x компоненту магнитного поля. Представим падающее из полупространства $z > 0$ поле в виде

$$\int_{-\infty}^{\infty} q(\xi) \exp(ik\xi y - ik\gamma(\xi)z) d\xi,$$

где $\gamma(\xi) = \sqrt{1 - \xi^2}$, $\text{Re } \gamma \geq 0$, $\text{Im } \gamma \geq 0$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число. Операторы прохождения t и отражения r одиночной плоской решетки, действующие на произвольную функцию $g(\zeta)$ по формулам

$$(tg)(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} t(\xi, \zeta) g(\zeta) d\zeta,$$

$$(rg)(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} r(\xi, \zeta) g(\zeta) d\zeta,$$

найлены методом сингулярных интегральных уравнений [7]. Решение сингулярных интегральных уравнений с дополнительными условиями получено методом дискретных особенностей [8].

Следуя идеям работ [9, 10], обозначим спектральные функции Фурье амплитуд отраженного, прошедшего поля и поля между экранами как $a(\xi)$, $d(\xi)$, $C_n(\xi)$, $B_n(\xi)$, $n=1, \dots, M-1$. Они связаны между собой следующим образом:

$$a = rq + tes^- B_1,$$

$$C_1 = tq + res^- B_1,$$

$$C_n = tes^+ C_1 + res^- B_n, \quad n=2, \dots, M-1,$$

$$B_n = res^+ C_n + tes^- B_{n+1}, \quad n=1, \dots, M-2,$$

$$B_{M-1} = res^+ C_{M-1},$$

$$d = tes^+ C_{M-1},$$

где оператор e определяет изменение амплитуды поля при смещении системы координат вдоль оси Oz на величину h в направлении распространения поля, а операторы s^\pm определяют изменение амплитуды поля при смещении системы координат на величину Δ в положительном или отрицательном направлении оси Oy .

В случае E - поляризации операторы прохождения и отражения одиночной решетки связаны формулой

$$t(\xi, \zeta) = \delta(\xi - \zeta) + r(\xi, \zeta),$$

а в случае H - поляризации –

$$t(\xi, \zeta) = \delta(\xi - \zeta) - r(\xi, \zeta).$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ

Для верификации полученных расчетов многослойной ленточной решетки был проведен цикл экспериментальных исследований макетов двухслойной структуры, рассчитанных на частоте 30 ГГц при числе лент в слое 5 и 19. Измерение параметров этих макетов проводилось с помощью установки,

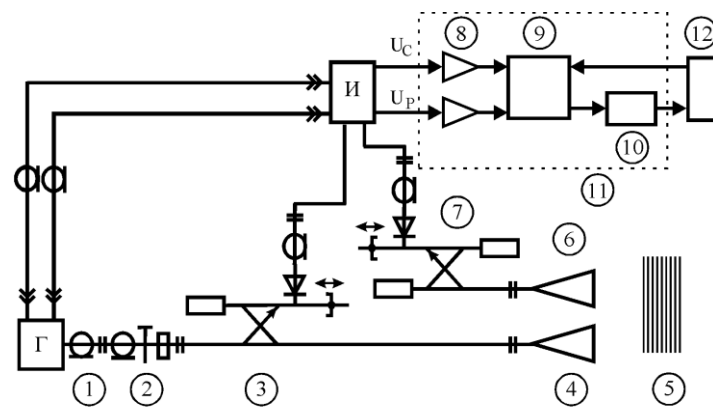


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

описанной в работе [11], позволяющей осуществлять сопряжение панорамного измерителя КСВН и ослабления типа P2-65 с компьютером. Функциональная схема измерительного комплекса для измерения коэффициента отражения и диаграммы направленности представлена на рис.2. На этом рисунке Г - генератор P2-65 посредством коаксиального кабеля - 1 и коаксиально-волноводного перехода - 2 подсоединяется к направленному ответвителю - 3, измеряющему мощность падающей волны, нагруженному на рупор - 4. Волна из рупора - 4 падает на исследуемую двухслойную решетку - 5, положение которой относительно рупора - 4 регулируется. Волна, падающая на двухслойную решетку - 5, частично отражается от нее и попадает на рупор - 6 при соответствующем расположении его относительно измеряемого объекта. Далее сигнал поступает на ответвитель отраженной волны - 7 и индикатор И, связанный с блоком сопряжения - 11. Блок сопряжения использует два аналоговых сигнала U_p - напряжение развертки и U_c - напряжение, пропорциональное измеряемой характеристике устройства. Сравнение уровней этих сигналов с динамическим диапазоном АЦП - 10 осуществляют масштабирующие устройства - 8. Между масштабирующими устройствами и АЦП находится аналоговый коммутатор - 9. Сигнал от АЦП - 10 передается на компьютер - 12. Динамический диапазон измерения параметров определяется, в основном, разрядностью используемого АЦП. В нашем случае используется 16 разрядный АЦП с 1024 отсчетов по частоте.

Рупор - 6, совместно с ответвителем - 7, может перемещаться по дуге относительно центра двухслойной решетки - 5 с фиксацией угла поворота. Это позволяет определить диаграмму направленности испытываемой системы.

Исследуемая решетка располагалась в дальней зоне на расстоянии от передающего и приемного рупора $d > \frac{2b^2}{\lambda}$, где b - диагональ рупора [12]. Это позволяет утверждать, что фронт волны вблизи решетки и приемного рупора был квази плоский.

Двухслойная решетка выполнялась в виде проводящих латунных полосок минимальной толщины (0,05 мм), нанесенных на тонкий слой (0,6 мм) вспененного полистирола ($\epsilon_r \approx 1,02$). Размер каждой пластины вспененного полистирола равен 110×90 мм. Каждый слой структуры содержит N металлических полосок размером 110×2 мм, период следования лент равен 4 мм. Конструкция экспериментальной установки позволяла осуществлять вариацию расстояния между слоями решеток h , а также угол поворота решетки.

На рис. 3 представлена зависимость нормированного коэффициента отражения ρ двухслойной структуры от расстояния между слоями h для $f = 30$ ГГц, $N = 19$, полученная теоретически и экспериментально. Угол падения волны на решетку составляет $\varphi_0 = 101^\circ$ и отсчитывается от отрицательного направления оси Oy . Зависимости носят практически периодический характер с периодом $kh \approx \pi$. Минимумы коэффициента отражения возникают в результате интерференции волны, многократно отраженной от слоев структуры [1]. Из полученных результатов следует, что на данной частоте существуют резонансные отражения волн на решетке. Различия в значениях минимума коэффициента отражения для теоретических и экспериментальных данных вызваны неидеальностью рупорных излучателей и исследуемой решетки.

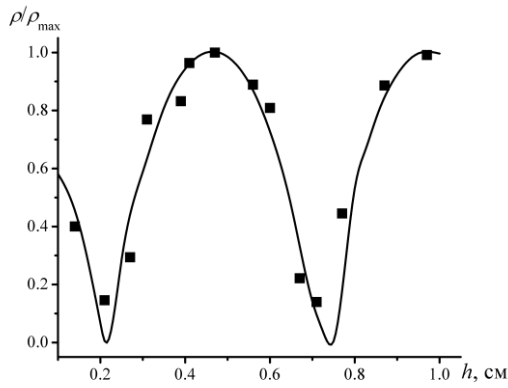


Рис.3. Зависимость коэффициента отражения от h .
Теоретическая кривая – сплошная, измеренные значения – точки.

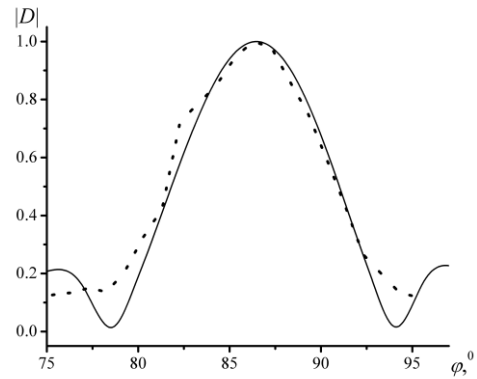


Рис.4. Модуль нормированной диаграммы направленности отраженного поля двухслойной решетки, $N_1 = 19$. Теоретическая кривая – сплошная, измеренные значения – точки.

На рис.4 представлен модуль нормированной диаграммы направленности двухслойной решетки, $N = 19$, $h = 4,7$ мм. Решетка при данном числе лент близка по свойствам к бесконечной периодической [5]. Диаграмма направленности вычисляется по формуле

$$D^1(\varphi) = \sqrt{2\pi/k} \cdot a(\cos(\varphi)) \cdot \sin(\varphi) e^{-i\pi/4}.$$

Ширина главного лепестка диаграммы направленности на рис.4 по уровню 0,707 составляет менее 10^0 , уровень боковых лепестков не превышает 0,2. На рис. 5 представлен модуль нормированной диаграммы направленности двухслойной решетки, содержащей небольшое ($N = 5$) число лент. Уменьшение количества лент до пяти приводит к увеличению ширины главного лепестка до значения ≈ 30 . Максимум диаграммы направленности наблюдается на углах, близких к $180^0 - \varphi_0 = 79^0$.

В случае нарушения периодичности следования лент или нарушения условия их идентичности вид диаграммы направленности изменяется существенным образом. Рассмотрим решетку на основе непериодического множества. Введем предканторовое множество $K_n^{(a;b)}$, полученное по принципу канторова множества на n -м шаге на интервале $(a;b)$: $K_0^{(a;b)} = (a;b)$, $K_1^{(a;b)} = \left(a; a + \frac{c}{3}\right) \cup \left(a + \frac{2c}{3}; b\right)$, $K_2^{(a;b)} = \left(a; a + \frac{c}{9}\right) \cup \left(a + \frac{2c}{9}; a + \frac{c}{3}\right) \cup \left(a + \frac{2c}{3}; a + \frac{7c}{9}\right) \cup \left(a + \frac{8c}{9}; b\right)$ и т. д., где $c = b - a$. Обозначим $CK_n^{(a;b)} = (a;b) \setminus K_n^{(a;b)}$ – дополнение множества $K_n^{(a;b)}$ на интервале $(a;b)$. На рис.6 приведены

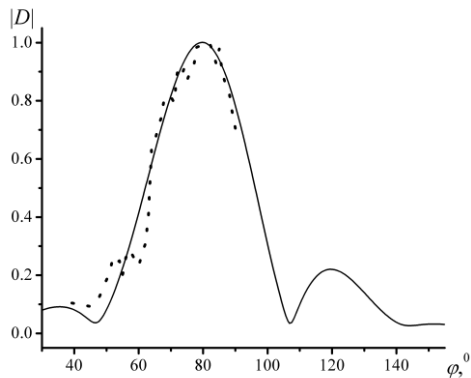


Рис.5. Модуль нормированной диаграммы направленности отраженного поля двухслойной решетки, $N_1 = 5$. Теоретическая кривая – сплошная, измеренные значения – точки.

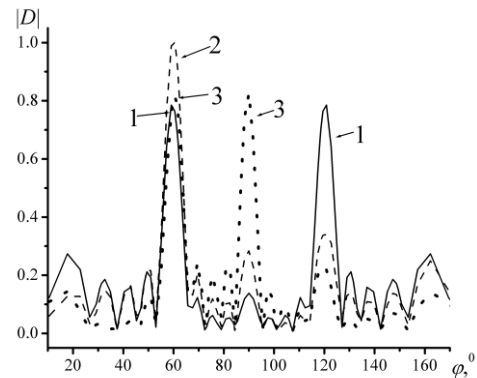


Рис.6. Модуль нормированной диаграммы направленности отраженного поля двухслойной решетки, выполненной на основе предканторова множества. 1- $\Delta = 0$; 2- $\Delta = 1,5$ мм; 3- $\Delta = 5$ мм.

диаграммы направленности двухслойной решетки при ортогональном падении плоской волны ($\varphi = 90^0$). След множества щелей первого слоя на плоскости xOy обозначим как L . Множество содержит 5 эквидистантно расположенных ячеек, расстояние между ячейками равно $l = 0,05$ мм. Каждая ячейка выполнена на основе предканторового множества, $L = \bigcup_{m=0}^4 CK_4^{(-1+(2+l)m; 1+(2+l)m)}$, $h = 10,9$ мм. Как видно из рис.6, такая решетка позволяет формировать многолепестковые диаграммы направленности. Изменение величины сдвига решеток Δ позволяет управлять уровнем лепестков. При $\Delta = 1,5$ мм формируется диаграмма направленности с одним главным лепестком, а уровень боковых лепестков не превышает 0,33. Угол наклона лепестка к оси Oy составляет 60^0 .

ВЫВОДЫ

В работе построено строгое решение задачи дифракции на произвольном ограниченном множестве плоских ленточных решеток и проведено сравнение с экспериментальными результатами. Использование решеток на основе предканторовых множеств позволило формировать многолепестковые диаграммы направленности и управлять уровнем лепестков. Совпадение расчетных и измеренных характеристик резонансного отражения волн оказалось достаточно хорошим, что позволяет судить о справедливости допущений теоретической модели. Полученные результаты дают возможность прогнозировать создание различных устройств СВЧ диапазона, существенно уменьшая объем экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шестопапов В. П., Литвиненко Л. Н., Масалов С. А., Сологуб В. Г. Дифракция волн на решетках. Харьков: издательство ХГУ, 1973.-287 с.
2. Wu X. H., A. A. Kishk, A. W. Glisson. A Transmission Line Method to Compute the Far-Field Radiation of Arbitrary Hertzian Dipoles in a Multilayer Structure Embedded With PEC Strip Interfaces // IEEE Transactions on Antennas and Propagation.-2007.-Vol. 55, No. 11.-P. 3191-3198.
3. Lytvynenko L. M., Prosvirnin S. L. Wave reflection by a periodic layered metamaterial // The European Physical Journal Applied Physics.-Vol. 46.-2009, 32608-(p1-p6).
4. Провалов А. В., Третьяков О. А., Шестопапов В. П. Экспериментальное исследование дифракции электромагнитных волн на двойной решетке // Журнал технической физики. – Т.34, № 1. – 1964. – С. 186-188.
5. Воробьев С. Н., Кузмичев И. К. Экспериментальное исследование резонансного отражения плоской электромагнитной волны от редкой ленточной решетки // Журнал технической физики.-1998.-Т. 68, № 5.- С. 138-140.
6. Литвиненко Л.М., Резник І. І., Литвиненко Д. Л. Дифракція хвиль на напівнескінченних періодичних структурах // Доповіді АН Української РСР.-1991.-№6.-С.62-66.
7. Варшавская Н. А., Гандель Ю. В. Дифракция плоской монохроматической волны на предканторовых решетках // Электромагнитные явления. – 1998. – Т. 1, № 4. – С. 455-464.
8. Гандель Ю. В. Метод дискретных особенностей в задачах электродинамики // Вопросы кибернетики.-1986.-Вып. 124.-С. 166-183.
9. Литвиненко Л. Н., Просвирнин С. Л. Спектральные операторы рассеяния в задачах дифракции волн на плоских экранах. Киев: Наукова думка, 1984.-239с.
10. Калиберда М. Е., Литвиненко Л. Н., Погарский С. А. Операторный метод в задаче дифракции электромагнитных волн на плоских экранах // Радиотехника и электроника.-2009.-Т. 54, № 8.-С. 1029-1036.
11. Катрич В. А., Майборода Д. В., Погарский С. А., Сапрыкин И. И. // Вестник Харьковского университета. Сер. Радиофизика и электроника. – 2006. – №712. – Вып.10. – С.21-24.
12. Измерения в электронике. Справочник. Ред.-сост. Доброхов Б. А. Москва-Ленинград: Энергия, 1965.-240 с.