

УДК 621.396.962.2

## РЕГУЛИРУЕМЫЙ НАПРАВЛЕННЫЙ ОТВЕТВИТЕЛЬ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

М.Ц. Айвазян, Н.Г. Степанян

*Государственный инженерный университет Армении (Политехник)*

Рассмотрена задача о прохождении электромагнитной волны сквозь систему, состоящую из трех частопериодических решеток. Для плоской линейно поляризованной электромагнитной волны при помощи граничных условий Владимирского найдены выражения для коэффициентов отражения и передачи такой системы при произвольных расстояниях между решетками и углах ориентации их проводников. Предложенный метод позволяет рассчитывать коэффициенты отражения и передачи системы, состоящей из произвольного числа решеток. Приведенные экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчетными. Предложена конструкция регулируемого направленного ответвителя отражательного типа на основе волноводов класса "полый диэлектрический канал".

**Ключевые слова:** терагерцовый диапазон, волновод класса "полый диэлектрический канал", решетка, направленный ответвитель, вносимые потери.

**Введение.** В терагерцовом диапазоне волн весьма актуальным является вопрос выбора волноведущей системы, на основе которой можно создать функциональные элементы различного назначения [1]. В работе [2] приведены основные технические характеристики практически полного комплекта волноводных функциональных элементов диапазона 120...180 ГГц, выполненных на основе волноводов класса "полый диэлектрический канал" [3].

**Методика исследования.** В настоящей работе рассматривается задача о прохождении электромагнитной волны сквозь систему, состоящую из трех решеток. Для плоской линейно поляризованной электромагнитной волны при помощи граничных условий Владимирского для анизотропной проводящей поверхности [4] найдены выражения для коэффициентов отражения и передачи такой системы при произвольных расстояниях между решетками и углах ориентации их проводников.

Рассмотрим систему из трех бесконечных решеток, помещенную в свободном пространстве ( $\varepsilon = \mu = 1$ ). Решетка образована параллельными цилиндрическими идеально проводящими проводниками, плоскости решеток параллельны друг другу, а ориентация проводников произвольная.

Введем прямоугольную систему координат  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  (рис. 1 а и б), связанную с системой решеток следующим образом: плоскости решеток перпендикулярны оси  $OZ$ , плоскость левой (первой) решетки совмещена с координатной плоскостью  $XOY$ , направление проводников этой решетки параллельно горизонтальной оси  $OY$ . Центральная (вторая) решетка расположена на расстоянии  $z_1$  от первой, а ее проводники образуют угол  $\varphi_1$  с осью  $OY$ . Правая (третья) решетка расположена на расстоянии  $z_2$  от первой ( $z_2 \geq z_1$ ), а ее проводники образуют угол  $\varphi_2$  с осью  $OY$ . Со стороны отрицательных  $z$  на решетки падает плоская линейно поляризованная волна с единичной амплитудой, вектор электрического поля которой направлен параллельно оси  $OX$ . Если в падающем поле имеется компонента  $E_y$ , то она полностью отражается первой решеткой и в формировании прошедшего поля не участвует.

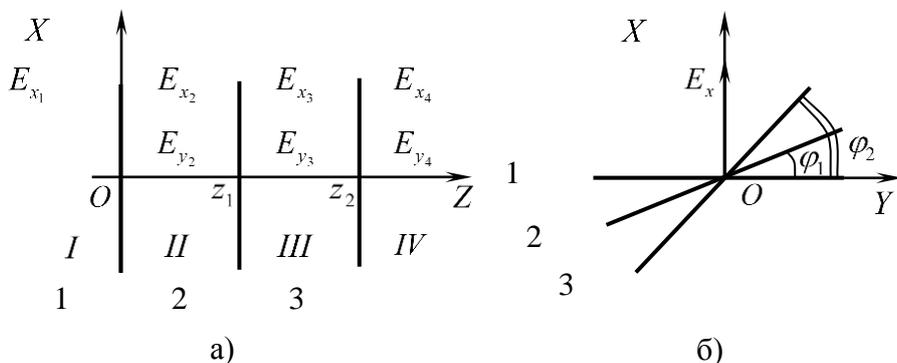


Рис. 1. Система решеток: а - проекция системы решеток в плоскости  $XOZ$ , б - проекция системы решеток в плоскости  $XOY$

Выделим в пространстве четыре области (см. рис. 1а) и выпишем выражения для компонент электрического поля в каждой из областей. В области  $I$  существуют только падающая ( $\exp(-jkz)$ ) и отраженная ( $\exp(+jkz)$ ) волны, поляризованные вдоль оси  $OX$ :

$$E_{x_1} = e^{-jkz} + R_{x_1} e^{jkz}, \quad (1)$$

где  $k$  – волновое число;  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\lambda$  – длина волны;  $R$  – коэффициент отражения по напряжению, направленный вдоль оси  $OX$ .

Поле в области  $II$  имеет составляющую  $E_y$ , так как проводники второй решетки образуют угол  $\varphi_1$  с проводниками первой:

$$\begin{aligned} E_{x_2} &= e^{-jkz} + R_{x_1} e^{jkz}, \\ E_{y_2} &= T_{y_2} e^{-jkz} + R_{y_2} e^{jkz}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $T$  – коэффициент прохождения.

В области *III* поле запишем аналогично:

$$\begin{aligned} E_{x_3} &= T_{x_3} e^{-jkz} + R_{x_3} e^{jkz}, \\ E_{y_3} &= T_{y_3} e^{-jkz} + R_{y_3} e^{jkz}. \end{aligned} \quad (3)$$

В области *IV* существует только уходящая волна:

$$\begin{aligned} E_{x_4} &= T_{x_4} e^{-jkz}, \\ E_{y_4} &= T_{y_4} e^{-jkz}. \end{aligned} \quad (4)$$

В выражениях (1) и (2) учтено, что  $T_{x_1} = T_{x_2} = 1$  и  $R_{x_1} = R_{x_2}$ , так как первая решетка прозрачна для волн, поляризованных вдоль оси *OX*.

Задача сводится к определению  $R_{x_1}$ ,  $T_{x_4}$  и  $T_{y_4}$ . Определим искомые величины из системы уравнений, полученных путем сшивания полей на границах раздела областей. При этом воспользуемся граничными условиями анизотропно проводящей поверхности, иначе называемыми условиями Владимирского [4]. Граничные условия Владимирского применимы, если период решетки мал по сравнению с длиной волны, а коэффициент заполнения лежит в интервале  $0,5 \geq q \geq 0,2$ . Для решеток, используемых в терагерцовом диапазоне, указанные ограничения обычно выполняются. Для напряженности электрического поля эти условия записываются в виде

$$E_{n_1} = E_{n_2}, \quad E_{s_1} = E_{s_2}, \quad (5)$$

где  $E_{n_1}$  и  $E_{n_2}$  – компоненты полей, направленные перпендикулярно проводникам решетки;  $E_{s_1}$  и  $E_{s_2}$  – компоненты полей, направленные вдоль проводников.

Применяя эти условия, получим:

при  $z = 0$ :

$$E_{y_2} = 0; \quad (6)$$

при  $z = z_1$ :

$$E_{x_2} = E_{x_3}, \quad (7a)$$

$$E_{y_2} = E_{y_3}, \quad (7б)$$

$$E_{x_3} \sin \varphi_1 + E_{y_3} \cos \varphi_1 = 0, \quad (7в)$$

$$R_{x_1} \cos \varphi_1 - R_{y_2} \sin \varphi_1 = R_{x_3} \cos \varphi_1 - R_{y_3} \sin \varphi_1; \quad (7г)$$

при  $z = z_2$ :

$$E_{x_3} = E_{x_4}, \quad (8a)$$

$$E_{y_3} = E_{y_4}, \quad (8б)$$

$$E_{x_4} \sin \varphi_2 + E_{y_4} \cos \varphi_2 = 0, \quad (8в)$$

$$R_{x_3} \cos \varphi_2 - R_{y_3} \sin \varphi_2 = 0. \quad (8г)$$

Условия (7г) и (8г) отражают тот факт, что волны, распространяющиеся в направлении, противоположном направлению  $OZ$ , и перпендикулярные проводникам решеток, совпадают по обе стороны границы. Решая полученную систему уравнений, находим

$$R_{x_1} = \frac{F(\varphi, z)}{D \cos^2 \varphi_1 - e^{-j2kz_1} F(\varphi, z)}, \quad (9)$$

$$T_{x_4} = \alpha(1 + R_{x_1} e^{j2kz_1}), \quad (10)$$

$$T_{y_4} = -T_{x_4} \operatorname{tg} \varphi_2, \quad (11)$$

где

$$F(\varphi, z) = (e^{j2kz_1} - e^{j2kz_2}) \cos(\varphi_2 - \cos \varphi_1) \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 - \\ - [(1 - e^{j2kz_2}) \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 - (1 - e^{j2kz_1}) \sin \varphi_2 \cos \varphi_1] \sin(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{\cos(\varphi_2 - \varphi_1) \cos \varphi_2}{\cos \varphi_1}, \quad (13)$$

$$D = (1 - e^{j2kz_1})(e^{j2kz_1} - e^{j2kz_2}). \quad (14)$$

Заметим, что формулы (9) – (14) не учитывают влияния местных волн вблизи проводников решеток. Амплитуды этих волн экспоненциально убывают при удалении от решетки с показателем экспоненты, пропорциональным  $\sim p$ , где  $p$  – период решетки. Поэтому полученные формулы справедливы при расстояниях между решетками, превышающих  $p$ .

Приведенная методика позволяет находить выражения для коэффициентов отражения и передачи и при большем числе решеток. Для этого достаточно выделить в пространстве  $N+1$  одну область (где  $N$  – число решеток); составляющие полей в первой, второй и последней областях записать аналогично случаю трех решеток; поля во всех остальных областях записать аналогично (3); при сшивании полей в плоскостях первой, второй и последней решеток записать уравнения, аналогичные (6) – (8); в плоскостях оставшихся решеток поля сшивать аналогично (7). Необходимо заметить, что каждая новая решетка увеличивает число уравнений и неизвестных на 4.

Полученные выражения позволяют рассчитать основные электрические характеристики функциональных элементов с применением системы из трех частопериодических решеток на основе волноводов класса “полый диэлектрический канал” и открытых линзовых и зеркальных линий.

В настоящей статье рассматривается работа направленного ответвителя отражательного типа, выполненного на основе сверхразмерного металло-диэлектрического волновода (МДВ) класса “полый диэлектрический канал”.

Конструктивно направленный ответвитель представляет собой волноводный крест, в диагонали которого установлена система из трех решеток, плоскости которых составляют угол  $\phi = 45^\circ$  к направлению распространения волны, причем проводники крайних решеток параллельны друг другу и перпендикулярны вектору электрического поля падающей волны, а средняя решетка может поворачиваться.

Выражение для коэффициента передачи такого направленного ответвителя получим из (10), полагая  $\varphi_2 = 0$  и учитывая, что фазовый множитель  $\exp(j2kz)$  ввиду наклонного положения решеток заменяется на  $\exp(j2kz \cos \phi)$ :

$$T_{x_4} = \alpha(1 + R_{x_1} e^{j2kz_1 \cos \phi}), \quad (15)$$

$$R_{x_1} = \frac{(1 - e^{j2kz_2 \cos \phi}) \sin^2 \varphi_1}{D \cos^2 \varphi_1 - e^{j2kz_1 \cos \phi} (1 - e^{j2kz_2 \cos \phi}) \sin^2 \varphi_1}. \quad (16)$$

При этом  $D$  вычисляется по формуле (14).

Расчеты показывают, что наибольшей широкополосностью обладают ответвители, в которых расстояния между решетками  $l_p$  одинаковы и выбираются из условия

$$l_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{2}}{8}, \quad (17)$$

где  $\lambda_0$  – средняя длина волны рабочего диапазона.

Принцип работы такого направленного ответвителя показан на рис. 2.

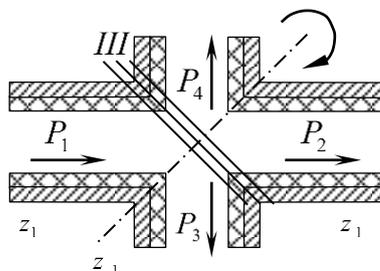


Рис. 2. Направленный ответвитель на основе трех решеток

Мощность  $P_1$  от генератора подается в левое плечо *I* направленного ответвителя, выполненного в виде волноводного креста, в диагонали которого установлена система решеток. Часть мощности  $P_3$ , отразившись от средней решетки, попадает на детектор прямой волны, подключенный к нижнему плечу *III*. Прошедшая мощность через правое плечо *II* подается в волноводный тракт. Распространяющаяся в обратном направлении мощность  $P_4$  отражается от системы решеток и поступает на детектор обратной волны. Коэффициент отраженной волны по мощности (КСВМ) легко вычислить при помощи соотношений  $\text{КСВМ} = P_4/P_2 = P_4/(P_1 - P_3)$ .

**Экспериментальные результаты.** На рис. 3 приведены расчетные зависимости коэффициента передачи  $T_{x_4}$  от угла поворота средней решетки  $\varphi_1$  (сплошная линия) в диапазоне  $180 \text{ ГГц} \pm 5\%$ .

На этом же рисунке крестиками отмечены измеренные значения  $T_{x_4}$ . Ошибка измерений составляла 10%. Приведенные значения показывают хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

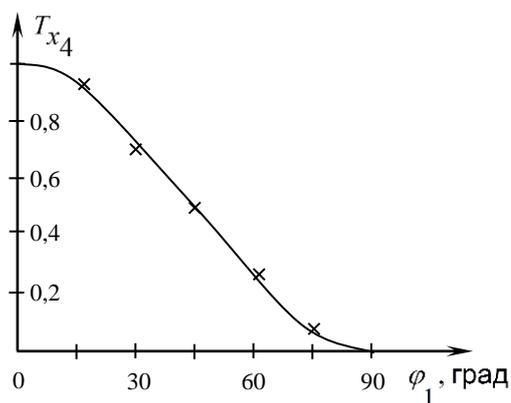


Рис. 3. Расчетные зависимости коэффициента передачи системы от угла поворота средней решетки (сплошная линия) и экспериментальные результаты (крестики)

**Заключение.** Теоретически и экспериментально исследовано прохождение линейно поляризованной электромагнитной волны сквозь систему из трех частопериодических решеток. Экспериментально исследована система из трех решеток, в которой крайние решетки неподвижны, а средняя может вращаться. Такая система, установленная в диагонали волноводного креста, позволяет регулировать величину поступающей в боковой канал мощности. Так как работа такой системы подчинена принципу взаимности, то отраженная волна поступает в другой боковой канал с тем же коэффициентом отражения. Предложенная конструкция позволяет реализовать регулируемый направленный ответвитель.

Работа выполнена в рамках темы “Разработка оптического детектора для дистанционного обнаружения вредных веществ” (шифр 13-2В104).

### Литература

1. Еру И.И. Терагерцная техника и технологии: современное состояние, тенденция развития и перспективы практического применения // Успехи современной радиэлектроники. - 1997. - № 3.- С. 51 - 77.

2. Complete set of waveguide elements for 120-180 GHz band / **Ts.Ayvazyan, Yu.N. Kazantsev, R.M. Martirosian, et al** // 16-th International Conference on Infrared and Millimeter Waves. - Lausanne, 1991. – P. 92 -93.
3. **Казанцев Ю.Н.** Электромагнитные волны в диэлектрических каналах прямоугольного сечения // Радиотехника и электроника. – 1970. - Т. 15, № 6. - С. 1140-1145.
4. **Каценеленбаум Б.З.** Высокочастотная электродинамика. – М.: Наука, 1966. – 240 с.

*Поступила в редакцию 29.08.2014.  
Принята к опубликованию 17.12.2014.*

## **ՏԵՐԱՀԵՐՑԱՅԻՆ ՏԻՐՈՒՅԹԻ ԿԱՐԳԱԲԵՐՎՈՂ ՈՒՂՂՈՐԴՎԱԾ ՃՅՈՒՂԱՎՈՐԻՉ**

**Մ.Ց. Այվազյան Ն.Գ. Ստեփանյան**

Դիտարկված է էլեկտրամագնիսական ալիքի տարածման խնդիրը՝ երեք հաճախաբերական ցանցերի միջով: Գծային բևեռացված էլեկտրամագնիսական ալիքի համար, վլադիմիրսկու սահմանային պայմանների կիրառմամբ, նման համակարգի համար ստացված են փոխանցման և անդրադարձման գործակիցների արտահայտությունները ցանցերի միջև եղած կամայական հեռավորությունների և դրանց լարերի ուղղվածության դեպքում: Առաջարկվող եղանակը թույլ է տալիս հաշվարկել փոխանցման և անդրադարձման գործակիցները ցանցերի կամայական քանակի դեպքում: Բերված փորձնական արդյունքները լավ համաձայնում են հաշվարկայինների հետ: "Սնամեջ դիէլեկտրիկական կապուղի" դասի ալիքատարների հիման վրա առաջարկվում է անդրադարձնող տեսակի կարգաբերվող ուղղորդված ճյուղավորիչի կառուցվածքը:

**Առանցքային բաներ.** տերահերցային տիրույթ, «սնամեջ դիէլեկտրիկական կապուղի» դասի ալիքատար, ցանց, ուղղորդված ճյուղավորիչ, գծային կորուստներ:

## **AN ADJUSTABLE DIRECTIONAL COUPLER FOR THE TERAHERTZ RANGE**

**M.Ts. Ayvazyan, N.G. Stepanyan**

The problem of the electromagnetic wave propagation through a system consisting of three high-periodic grids is considered. For a plane linearly polarized electromagnetic wave expressions for the reflection and transmission coefficients of such a system at arbitrary distances between the grids and the orientation angles of their conductors by using Vladimirski's boundary conditions are found. The proposed method allows to calculate the reflection and transmission system consisting of an arbitrary number of grids. The experimental results are in good agreement with the calculated values. The design of a reflection-type controlled directional coupler based on a "hollow dielectric channel" type waveguides is proposed.

**Keywords:** terahertz range, waveguide of the class "hollow dielectric channel", grid, directional coupler, insertion loss.