



УДК 621.396

В. В. Комаров

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.

А. А. Невский

*Мытищинский научно-исследовательский институт
радиоизмерительных приборов*

Экспериментальная и аналитическая оценка передаточных свойств металлической решетки миллиметрового диапазона

Для расчета передаточных характеристик металлических решеток с прямоугольными перемычками предложены две аналитические модели, базирующиеся на теории распространения электромагнитных волн в микроволновых многополюсниках с неоднородностями. Результаты теоретических расчетов в диапазоне 110...170 ГГц сравниваются с данными экспериментальных исследований стальной решетки с периодом 100 мкм.

Коэффициент передачи, одномерная периодическая структура, плоская электромагнитная волна, поляризация

Электродинамические характеристики одномерных периодических структур, к которым, в частности, относятся металлические решетки (МР), применяемые в различных приборах управления параметрами электромагнитных (ЭМ) сигналов, во многом зависят от технологии их изготовления. К примеру, МР с круглыми перемычками, представляющие собой систему проволочных элементов, размещаемых в одной плоскости и натянутых на металлическую рамку, известны уже давно и для их расчета используются хорошо зарекомендовавшие себя аналитические подходы [1].

МР с прямоугольными перемычками формируются либо на диэлектрической основе по технологии фотолитографии, либо динамическим травлением тонких металлических пластин. Решетки второго типа наиболее востребованы в настоящее время, и для их расчета разработаны самые разные методы.

При пренебрежимо малой толщине металлизации таких структур для их расчета в ряде случаев могут быть привлечены аналитические соотношения, например, на основе модифицированных формул Ламба [2]. Однако чаще всего моделирование передаточных характеристик и распределений ЭМ-поля в ближней и дальней зонах МР осуществляется методом конечных элементов (МКЭ) и методом конечных разностей (МКР) во временной области [3].

Одним из основных применений МР являются сеточные поляризаторы, входящие в состав антенных переключателей радиолокационных станций микроволнового и терагерцевого диапазонов. Коэффициент качества поляризации в них оценивается как отношение коэффициентов передачи ЭМ-волн с E - и H -поляризацией.

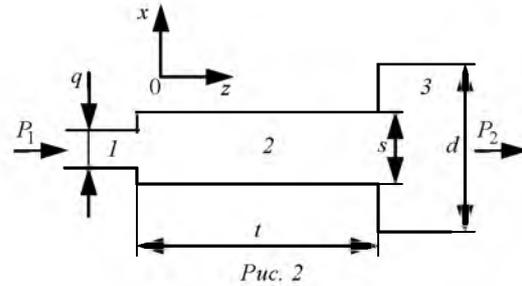
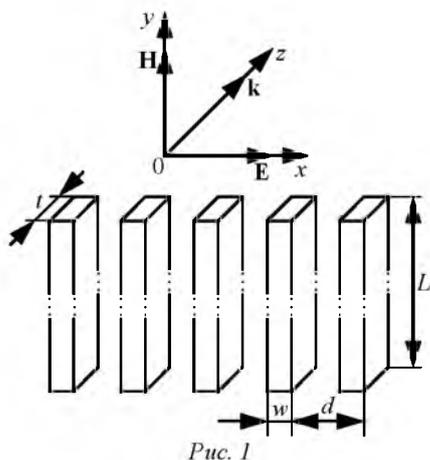
В [4] предложена двумерная численная модель локального участка МР с периодическими условиями Флоке на границах области определения. Такая модель может быть построена с помощью МКЭ и позволяет получать достаточно точные результаты анализа процессов рассеяния ЭМ-волн с E -поляризацией. При повороте вектора напряженности электрического поля на 90° (при H -поляризации), такая модель, как показали исследования авторов, оказывается малопригодной. Более точные результаты расчета МР для случая H -поляризованных ЭМ-волн получены с привлечением трехмерной численной модели на МКР во временной области, которая представляет собой отрезок сверхразмерного квадратного волновода с диэлектрическими вставками на металлических стенках, в котором размещается одномерная периодическая структура [5]. Данная модель учитывала все размеры МР и число перемычек N . Общее количество элементов трехмерной конечно-разностной сетки составило более $1.5 \cdot 10^6$, а время

счета составило несколько часов. Столь высокие вычислительные затраты не позволяют использовать эту модель для решения задачи оптимизации.

Таким образом, для повышения эффективности математического моделирования процессов рассеяния ЭМ-волн на МР с прямоугольными перемычками необходимы либо аналитические, либо комбинированные численно-аналитические подходы, обеспечивающие достаточную для практики точность анализа при минимальных вычислительных затратах. Примерами таких подходов могут служить аналитические модели, одна из которых базируется на методе эквивалентных схем [6], а вторая – на методе согласования мод в приближении квази-Т-волн [7]. Однако обе модели имеют существенные ограничения. В связи с этим поиск более эффективных подходов к решению задачи рассеяния *H*-поляризованных ЭМ-волн на МР с перемычками различной формы является актуальным направлением исследований в этой области.

На рис. 1 представлена конфигурация МР с прямоугольными перемычками, на которую падает плоская ЭМ-волна, вектор напряженности электрического поля которой направлен вдоль оси *x* (*H*-поляризация). Передаточные характеристики МР определяются ее размерами: периодом решетки *d*, шириной *w* и высотой *L* перемычки, а также толщиной металлизации *t*. Анализ процессов рассеяния проведен для случая нулевого угла падения плоской волны и конечной проводимости металлических элементов конструкции, изготовленных из стального сплава 47НХР.

При распространении вдоль оси *z* плоская ЭМ-волна частично ослабляется решеткой, поэтому напряженность электрического поля непосредственно перед решеткой несколько выше, чем за ней. Для учета этого изменения поля в ближней зоне введем в рассмотрение локальную ячейку МР в плоскости *xOz* с учетом длины перемычек вдоль



оси *y* (рис. 2). Этот ячейке можно поставить в соответствие модель, описывающую распространение ЭМ-волн в одноступенчатом трансформаторе [8]. В качестве волноведущих структур трансформатора выберем плоско-параллельные волноводы (ППВ) с размерами между металлическими стенками: *q* (ППВ1), *s = d - w* (ППВ2) и *d* (ППВ3).

Их волновые сопротивления:

$$Z_1 = 120\pi(q/L); \quad Z_2 = 120\pi(s/L); \quad Z_3 = 120\pi(d/L).$$

Размеры всех трех ППВ вдоль оси *x* выберем так, чтобы выполнялось условие $s/d \leq q/s < 1$.

Найдем коэффициенты отражения от стыков волноводов:

$$R_1 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}; \quad R_2 = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}.$$

Тогда общий коэффициент отражения в трансформаторе [8]:

$$\tilde{R} = \frac{R_1 + R_2 \exp(-2j\vartheta)}{1 + R_1 R_2 \exp(-2j\vartheta)}, \quad (1)$$

где $\vartheta = 2\pi t/\lambda$ – электрическая длина ступеньки трансформатора, причем λ – длина волны падающего на МР излучения.

Далее, используя допущение из теории малых отражений [8], можно упростить (1):

$$\tilde{R} \approx R_1 + R_2 \exp(-2j\vartheta).$$

Модуль коэффициента передачи определяется следующим образом:

$$|T| = \sqrt{1 - |\tilde{R}|^2}. \quad (2)$$

Локальную ячейку на рис. 2 можно также представить как линию передачи (ЛП) с двумя неоднородностями в виде стыков ППВ, рассмотренных ранее. Если обозначить падающую на вход ячейки мощность как P_1 , а мощность, прошедшую в область щели, как P_2 , коэффициент передачи такого упрощенного четырехполюсника составляет $|S_{21}| = \sqrt{P_2/P_1}$.

Далее ЭМ-волна, распространяясь вдоль оси z , частично затухает в области 2 (рис. 2) по закону:

$$\hat{P}_2 = P_2 \exp(-2\alpha t),$$

где α – коэффициент затухания.

Наконец, на выходе из ячейки (рис. 2) ЭМ-мощность дополнительно снижается за счет отражения от стыка ППВ2 и ППВ3:

$$P_3 = P_2 \exp(-2\alpha t) |S_{21}|^2.$$

Полученное соотношение эквивалентно выражению для расчета эффективности передачи мощности в нагрузку в ЛП, приведенному в [9].

Вновь используя теорию малых отражений, запишем итоговое уравнение для расчета коэффициента передачи:

$$T = |S_{21}|^2 \exp(-\alpha t), \quad (3)$$

где

$$\alpha = \frac{R_s}{120\pi(d-w)},$$

причем $R_s = \sqrt{\pi f \mu_0 / \sigma}$ – поверхностное сопротивление (μ_0 – магнитная постоянная; σ – электропроводность материала решетки).

Для проверки точности аналитических моделей (2) и (3) была изготовлена из стали ($\sigma = 1.1 \cdot 10^6$ См/м) МР с размерами: $d = 100$ мкм, $w = 20$ мкм, $t = 50$ мкм и $L = 21$ мм и с помощью векторного анализатора цепей фирмы "Rohde&Schwarz" проведены измерения ее передаточных свойств в частотном диапазоне

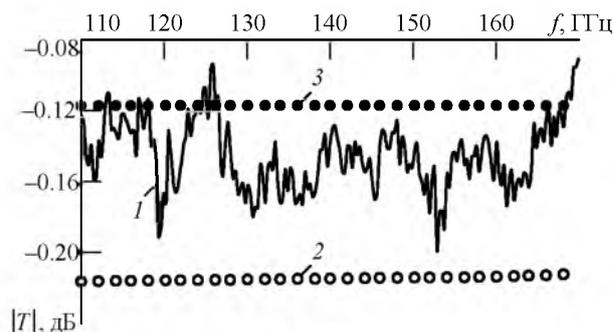


Рис. 3

$f = 110 \dots 170$ ГГц. Измерения проводились при размещении МР на специальном держателе в свободном пространстве. Результаты теоретических и экспериментальных исследований показаны на рис. 3. Кривая 1 отображает результаты экспериментального исследования, маркерами 2 показаны результаты расчетов по (2), маркерами 3 – результаты расчетов по (3). Из полученных данных видно, что модель (2) определяет нижнюю, а модель (3) – верхнюю границу зависимости $T(f)$.

В настоящей статье с привлечением теории СВЧ-цепей построены две аналитические модели для оценочных расчетов частотных зависимостей коэффициента передачи МР с прямоугольными перемычками, показавшие хорошее совпадение с экспериментальными данными. Обе модели базируются на допущении о малых отражениях в микроволновом многополоснике и являются приближенными. Благодаря простой реализации они могут быть успешно использованы для решения не только задачи анализа, но и задачи оптимизации одномерных периодических структур в диапазоне 100...200 ГГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П. Справочник по элементам волноводной техники. М.: Сов. радио, 1967. 652 с.

2. Zinenko T. L., Nosich A. I. Plane Wave Scattering and Absorption by Flat Grating of Impedance Strips // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2006. Vol. AP-54, № 7. P. 2088–2095.

3. Устройства поляризации радиоволн в терагерцевом диапазоне частот. Новые принципы построения / под ред. А. С. Якунина. М.: Радиотехника, 2012. 256 с.

4. Development and Computer-Aided Design of Metal Gratings for Microwave Mesh Polarizers / S. A. Alaverdyan, I. N. Kabanov, V. V. Komarov, V. P. Meschanov // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2015. Vol. MTT-63, № 8. P. 2509–2514.

5. Математическое моделирование дифракции электромагнитных волн на сеточных поляризационных

структурах / С. А. Алавердян, И. Н. Кабанов, В. В. Комаров, В. П. Мещанов // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59, № 9. С. 925–931.

6. Medina F., Mesa F., Skigin D. C. Extraordinary Transmission Through Arrays of Slits: a Circuit Theory Model // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2010. Vol. 58, № 1. P. 105–115.

7. Perfect Transmission of Thz Waves in Structured Metals / J. H. Kang, Q. H. Park, J. W. Lee, M. A. Seo, D. S. Kim // J. of Korean Physical Society. 2006. Vol. 49, № 3. P. 881–884.

8. Cameron R. J., Kudsia C. M., Mansour R. R. Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design and Application. New Jersey: John Wiley and Sons, 2007. 772 p.

9. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. шк., 1988. 432 с.

Статья поступила в редакцию 4 апреля 2017 г.

Для цитирования: Комаров В. В., Невский А. А. Экспериментальная и аналитическая оценка передаточных свойств металлической решетки миллиметрового диапазона // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 4. С. 47–51.

Комаров Вячеслав Вячеславович – доктор технических наук (2007), доцент (1998), профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А. Автор более 130 научных работ. Сфера научных интересов – математическое моделирование пассивных устройств микроволновой и терагерцевой техники.

E-mail: vyacheslav.komarov@gmail.com

Невский Артем Александрович – старший научный сотрудник отдела СВЧ-электроники Мытищинского научно-исследовательского института радиоизмерительных приборов, аспирант кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А. Окончил Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (2016) по специальности "Средства связи с подвижными объектами". Автор семи научных работ. Сфера научных интересов – моделирование процессов рассеяния электромагнитных волн на металлических решетках и разработка поляризационных устройств на их основе.

E-mail: nevskiy.aa@mail.ru

V. V. Komarov
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
A. A. Nevskiy
Mytishchi Scientific Research Institute of Radio Measuring Instruments

Experimental and Analytical Evaluation of Transmission Properties of Millimeter Wave Range Metal Grating

Abstract. Metal gratings (MGs) with rectangular lamels based on the technology of jet etching of thin metal plates are widely used in different polarization devices of microwave and terahertz engineering. Numerical methods of mathematical modeling or direct measurements are employed for their analysis. Sometimes in case of H-polarization, analytical approaches for evaluation of transmission characteristics of such gratings can be taken. However, the accuracy of the most of proposed similar models depends essentially upon sizes and frequency ranges.

The present article provides both theoretical and experimental research of transmission characteristics of MG with fixed size illuminated by plane electromagnetic wave with H-polarization. Two analytical models are utilized for preliminary evaluation of MG parameters. One of them determines the top limit of $T(f)$ variations, where T is transmittance and f is frequency. The other model determines the bottom limit. The given models were implemented in assumption of small reflections in microwave network. MG size defines one of the restrictions on their application.

Key words: Transmission Coefficient, 1D Periodic Structure, Plane Electromagnetic Wave, Polarization

REFERENCES

1. Fel'dshtein A. L., Yavich L. R., Smirnov V. P. *Spravochnik po elementam volnovodnoi tekhniki* [Guide to Elements of Waveguide Technology]. Moscow, *Sov. radio*, 1967, 652 p. (In Russian)
2. Zinenko T. L., Nosich A. I. Plane Wave Scattering and Absorption by Flat Grating of Impedance Strips. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*. 2006, vol. AP-54, no. 7, pp. 2088–2095.
3. Jakunin A. S. *Ustrojstva poljarizacii radiovoln v teragercevom diapazone chastot. Novye principy postroenija* [Devices for Radio Wave Polarization in Terahertz Frequency Range. New Principles of Construction]. Moscow, *Radiotekhnika*, 2012, 256 p. (In Russian)
4. Alaveryan S. A., Kabanov I. N., Komarov V. V., Meshchanov V. P. Development and Computer-Aided Design of Metal Gratings for Microwave Mesh Polarizers. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. 2015, vol. MTT-63, no. 8, pp. 2509–2514.
5. Alaverdjan S. A., Kabanov I. N., Komarov V. V., Meshchanov V. P. Mathematical modeling of diffraction of electromagnetic waves on grid polarization structures. *Radiotekhnika i elektronika* [Journal on Radio Engineering and Electronics]. 2014, vol. 59, no. 9, pp. 925–931. (In Russian)
6. Medina F., Mesa F., Skigin D. C. Extraordinary Transmission Through Arrays of Slits: a Circuit Theory Model. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. 2010, vol. 58, no. 1, pp. 105–115.
7. Kang J. H., Park Q. H., Lee J. W., Seo M. A., Kim D. S. Perfect Transmission of Thz Waves in Structured Metals. *J. of Korean Physical Society*. 2006, vol. 49, no. 3, pp. 881–884.
8. Cameron R. J., Kudsia C. M., Mansour R. R. *Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design and Application*. New Jersey, John Wiley and Sons, 2007, 772 p.
9. Sazonov D. M. *Antenny i ustrojstva SVCh* [Antennas and microwave devices]. Moscow, *Vyssh. Shk.*, 1988, 432 p. (In Russian)

Received May, 03, 2017

For citation: Komarov V. V., Nevskiy A. A. Experimental and Analytical Evaluation of Transmission Properties of Millimeter Wave Range Metal Grating. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 4, pp. 47–51. (In Russian)

Vyacheslav V. Komarov – D.Sc. in Engineering (2007), Associate Professor (1998), Professor of Radio Electronics and Telecommunication Department of Yury Gagarin State Technical University of Saratov. The author of more than 130 scientific publications. Area of expertise: mathematical modeling of passive microwave and terahertz devices.

E-mail: vyacheslav.komarov@gmail.com

Artem A. Nevsky – graduated engineer in tools of communication with movable objects (2016, Moscow Aviation Institute (National Research University)). Senior scientist of UHF Department in Mytishchi Research Institute of Radio Measuring Instruments, postgraduate student of Radio Electronics and Telecommunication Department of Yury Gagarin State Technical University of Saratov. The author of 7 scientific publications. Area of expertise: simulation of electromagnetic wave scattering processes on metal gratings and development of polarization devices on their basis.

E-mail: nevskiy.aa@mail.ru
