

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОАКСИАЛЬНОГО ВОЛНОВОДА С ПОЛЫМ ВНУТРЕННИМ ПРОВОДНИКОМ С СИСТЕМОЙ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ НЕПЕРИОДИЧЕСКИ РАСПОЛОЖЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Введение

Различные системы на основе круглых и коаксиальных волноводов широко применяются в технике СВЧ [1 – 3]. При проектировании различных функциональных устройств на базе аксиально-симметричных структур одним из ключевых пунктов процедуры их синтеза является вопрос о дифракции распространяющихся волн и знание механизма трансформации полей на различного рода неоднородностях. Известно множество работ, в которых развивались методы решения задач дифракции собственных волн волноводов на единичных неоднородностях либо их последовательностях.

В работах [4, 5] предложен алгоритм нахождения свойств эквивалентной цепи ступенчатых неоднородностей в коаксиальном волноводе с использованием рядов Хана. Погрешность полученных решений достигала 5%. В работах [6, 7] была предпринята попытка повышения точности получаемых результатов путем пересчета емкости неоднородности и интерполяции уравнений, полученных в [5]. В работах [8, 9] с использованием вариационного метода Ритца получено строгое решение задачи об определении точной верхней и нижней границ величины погонной емкости неоднородности. Существенным недостатком полученного решения является его громоздкость. Схожая структура с полым внутренним проводником рассматривалась в [10] с использованием метода эквивалентных цепей.

В работах [11, 12] для исследования неоднородностей в круглом волноводе применялись методы сингулярных и гиперсингулярных интегральных уравнений. Идея этих методов заключается в сведении парных интегральных уравнений к системе сингулярных или гиперсингулярных интегральных уравнений с дополнительными условиями на конечном числе отрезков. Решение интегральных уравнений можно эффективно получить методом дискретных особенностей.

В работах [13, 14] рассмотрены вопросы дифракции на системе кольцевых щелей в полом внутреннем проводнике коаксиального волновода и на симметричных диафрагмах в коаксиальном волноводе. Задачи решены с использованием операторного метода [15].

Цель работы – увеличение скорости получения численных результатов за счет выбора иного способа записи операторных уравнений – с использованием рекуррентной процедуры и исследование на основе полученных уравнений свойств коаксиального волновода с системой щелей в полом внутреннем проводнике и диэлектрических шайб.

Постановка задачи

В настоящей работе рассмотрена задача дифракции аксиально-симметричных и аксиально-несимметричных волн H_{1m} -типа на структуре, представляющей собой последовательность отрезков круглого волновода, помещенного соосно в круглый волновод большего диаметра с диэлектрическими шайбами (рис. 1). Шайбы расположены между щелями и внутри щелей. Для решения выбран операторный метод [13 – 16] ввиду его приспособленности при решении задач дифракции волн на структурах, неоднородности в

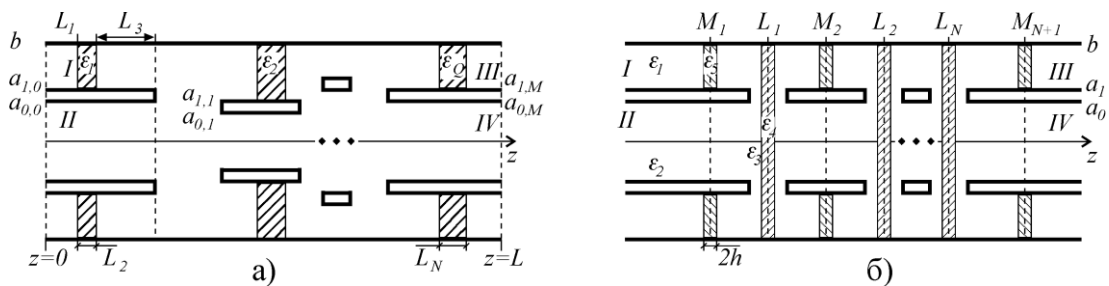


Рис.1. Геометрия исследуемой структуры: *a* – неперидическая структура; *б* – перидическая
 которых расположены в продольном направлении относительно направления распространения волны.

Операторы рассеяния на системе препятствий будем искать из операторных уравнений, которые, в данном случае, являются матричными. В работах [13, 14] операторы рассеяния определялись из операторных уравнений, записанных относительно системы неоднородностей в целом. В данной работе, в отличие от упомянутых, операторы рассеяния будем определять по рекуррентной процедуре.

При применении операторного метода необходимо знать операторы рассеяния одиночной неоднородности. В качестве одиночной неоднородности будем рассматривать диэлектрическую шайбу в коаксиальном волноводе (рис. 2, *a*) либо стык коаксиального волновода с полым внутренним проводником и круглого волновода (рис. 2, *б* или рис. 2, *в*), либо диэлектрическую шайбу в круглом волноводе. Будем считать, что операторы рассеяния одиночной неоднородности нам известны [14].

Рекуррентная процедура

Приведем рекуррентную процедуру для многоэлементной структуры, последним *N*-м элементом которой является неоднородность (рис. 2, *в*). Процедура определения операторов рассеяния для многоэлементных структур, последним элементом которых является неоднородность, представленная на рис. 2, *a, б* может быть выполнена аналогично. Обозначим $t_{N,i,j}$ – операторы рассеяния одиночной *N*-й неоднородности – стыка

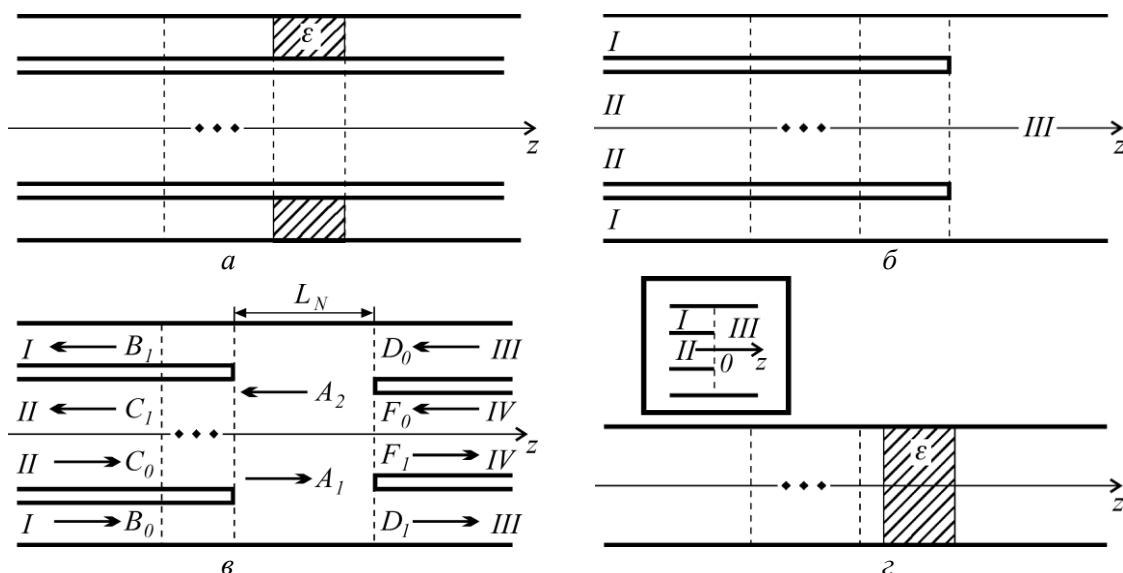


Рис.2. Схематическое изображение многоэлементной структуры, последним *N*-м элементом которой является: *a* – диэлектрическая шайба в коаксиальном волноводе; *б* – стык коаксиального волновода с полым внутренним проводником и круглого волновода; *в* – стык коаксиального волновода с полым внутренним проводником и круглого и, последовательно, круглого волновода с коаксиальным волноводом с полым внутренним проводником; *z* – диэлектрическая шайба в круглом волноводе

коаксиального волновода с полым внутренним проводником и круглого волновода, индексы i, j соответствуют номерам областей на вставке к рис. 2, а также операторы рассеяния $T_{N-1,m,n}$ структуры, состоящей из $N-1$ -го элемента, индексы m, n соответствуют номерам областей на рис. 2, б. Обозначим амплитуды Фурье падающего поля как B_0, C_0, D_0 и F_0 , а рассеянного поля как $A_1, A_2, B_1, C_1, D_1, F_1$. Тогда они связаны между собой уравнениями:

$$A_1 = T_{N-1,1,3}B_0 + T_{N-1,2,3}C_0 + T_{N-1,3,3}eA_2, \quad (1)$$

$$A_2 = t_{N,1,3}D_0 + t_{N,2,3}F_0 + t_{N,3,3}eA_1, \quad (2)$$

$$B_1 = T_{N-1,1,1}B_0 + T_{N-1,2,1}C_0 + T_{N-1,3,1}eA_2, \quad (3)$$

$$C_1 = T_{N-1,1,2}B_0 + T_{N-1,2,2}C_0 + T_{N-1,3,2}eA_2, \quad (4)$$

$$D_1 = t_{N,1,1}D_0 + t_{N,3,1}eA_1 + t_{N,2,1}F_0, \quad (5)$$

$$F_1 = t_{N,1,2}D_0 + t_{N,2,2}F_0 + t_{N,3,2}eA_1. \quad (6)$$

Оператор e имеет диагональную матрицу и определяет изменение амплитуд поля при смещении системы координат в направлении распространения поля на величину L_N , равную расстоянию между N -й и $N-1$ -й неоднородностями. После преобразования уравнений (1) – (6), можем записать выражения для неизвестных амплитуд:

$$B_1 = (T_{N-1,1,1} + T_{N-1,3,1}et_{N,3,3}eAT_{N-1,1,3})B_0 + (T_{N-1,2,1} + T_{N-1,3,1}et_{N,3,3}eAT_{N-1,2,3})C_0 + T_{N-1,3,1}e(t_{N,3,3}eAT_{N-1,3,3}et_{N,1,3} + t_{N,1,3})D_0 + T_{N-1,3,1}e(t_{N,3,3}eAT_{N-1,3,3}et_{N,2,3} + t_{N,2,3})F_0, \quad (7)$$

$$C_1 = (T_{N-1,1,2} + T_{N-1,3,2}et_{N,3,3}eAT_{N-1,1,3})B_0 + (T_{N-1,2,2} + T_{N-1,3,2}et_{N,3,3}eAT_{N-1,2,3})C_0 + T_{N-1,3,2}e(t_{N,3,3}eAT_{N-1,3,3}et_{N,1,3} + t_{N,1,3})D_0 + T_{N-1,3,2}e(t_{N,3,3}eAT_{N-1,3,3}et_{N,2,3} + t_{N,2,3})F_0, \quad (8)$$

$$D_1 = t_{N,3,1}eAT_{N-1,1,3}B_0 + t_{N,3,1}eAT_{N-1,2,3}C_0 + (t_{N,3,1}eAT_{N-1,3,3}et_{N,1,3} + t_{N,1,1})D_0 + (t_{N,3,1}eAT_{N-1,3,3}et_{N,2,3} + t_{N,2,1})F_0, \quad (9)$$

$$F_1 = t_{N,3,2}eAT_{N-1,1,3}B_0 + t_{N,3,2}eAT_{N-1,2,3}C_0 + (t_{N,3,2}eAT_{N-1,3,3}et_{N,1,3} + t_{N,1,2})D_0 + (t_{N,3,2}eAT_{N-1,3,3}et_{N,2,3} + t_{N,2,2})F_0, \quad (10)$$

где $A = (I - T_{N-1,3,3}et_{N,3,3}e)^{-1}$, I – единичный оператор. Уравнения (7) – (10) позволяют определить операторы рассеяния структуры, состоящей из N неоднородностей по средствам операторов рассеяния структуры, состоящей из $N-1$ -й неоднородности.

Численные результаты

Для оценки эффективности предложенного в данной работе алгоритма по сравнению тем, который предложен в [13, 14], сравним время, которое требуется для определения характеристик рассеянных полей структурой. Заметим, что порядок матрицы системы операторных уравнений при использовании рекуррентного подхода на каждом шаге рекурсии – меньше. Число действий, которые требуется выполнить при использовании рекуррентного подхода равно $c_1 \cdot N \cdot M^3$, в то время как при использовании подхода, продемонстрированного в [13, 14], равно $c_2 \cdot (N \cdot M)^3$, где c_1 и c_2 – константы, N – количество неоднородностей, M – размерность матрицы оператора отражения или прохождения одиночного препятствия.

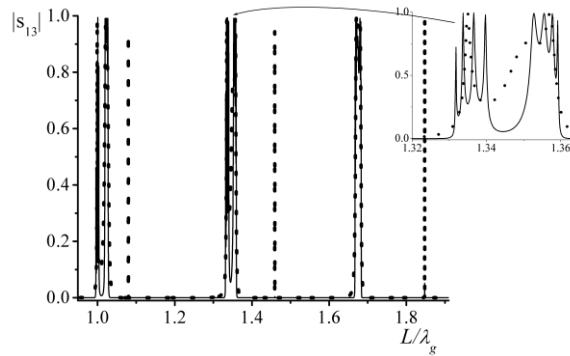


Рис. 3. Зависимость коэффициента прохождения H_{11} -волны круглого волновода от периода следования щелей для периодической структуры, состоящей из двух (кривая из точек) и пяти (сплошная кривая) щелей, $kb=1$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 11$, $\varepsilon_4 = 1$, $\varepsilon_5 = 1$, $d/b=1$, $h/b=2$

Параметры структуры выбраны таким образом, чтобы в круглом волноводе меньшего радиуса могла распространяться только волна H_{11} , а те части круглого волновода большего радиуса и коаксиального волновода, в которых находятся диэлектрические шайбы (с диэлектрической проницаемостью ε_4 и ε_5), являются запертыми для магнитных волн. В полой коаксиальной волноводе может распространяться волна H_{11} ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 > \varepsilon_4$). Такой выбор параметров структуры усиливает взаимодействие волны круглого волновода с

ключевой неоднородностью, так как при достаточно большой ширине шайбы в коаксиальном волноводе не происходит взаимного преобразования волн круглого и коаксиального волновода. Представленные зависимости носят практически бипериодический характер (как функции от L) с общим периодом $L/\lambda_g \approx 1$, где λ_g – длина волны в круглом волноводе. К возникновению бипериодических зависимостей приводит наличие диэлектрических шайб в области

коаксиального волновода. Заметим, что в случае если бы структура полностью была заполнена однородным диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 1$, то период был бы равен $L/\lambda_g \approx 0,5$ [4]. Вычисления для случая пяти щелей с использованием рекуррентной процедуры заняли приблизительно 10 с, а с использованием метода, предложенного в [14], – 1 мин.

На рис. 4 приведены зависимости коэффициента отражения и прохождения от волнового числа для неперидической структуры. Представленные характеристики соответствуют узкополосному фильтру. Положением полосы пропускания на частотной оси удается управлять за счет изменения длины щелей.

Выводы

Построено решение задачи дифракции аксиально-симметричных и аксиально-несимметричных волн на конечной неперидической системе кольцевых щелей во внутреннем полом проводнике коаксиального волновода и диэлектрических шайб. Применялся операторный метод. Операторные уравнения записаны с использованием рекуррентной процедуры, что позволило значительно увеличить скорость решения задачи.

Показано что исследуемая структура может быть использована для частотной селекции. Наличие диэлектрических шайб в коаксиальном волноводе приводит к многопериодическим зависимостям от расстояния между неоднородностями. Использование в качестве диэлектрического заполнения веществ с относительно малым уровнем диссипативных потерь позволяет получать высокодобротные резонансы.

Существенно снижены затраты времени, необходимого для реализации численной процедуры решения задачи.

Список литературы: 1. *Scharstein R. W., Adams A. T.* Thick Circular Iris in a TE_{11} Mode Circular Waveguide // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1988. Vol. 36. №11. P. 1529 – 1531. 2. *Orfanidis A. P., Kyriacou G. A., Sahalos J. N.* A Mode-Matching Technique for the Study of Circular and Coaxial Waveguide Discontinuities Based on Closed-Form Coupling Integrals // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2000. – Vol. 48. №5. – P. 880 – 883. 3. *Qian C. Zhu, Williamson A. G., Neve M. J.* Reactance of Posts in Circular Waveguide // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2007. – Vol. 55. № 8. – P. 1685 – 1688. 4. *Whinnery J. R, Jamieson H. W.* Equivalent circuits for discontinuities in transmission lines // Proceedings of IRE. – 1944. – Vol. 32. No. 2. – P. 98 – 115. 5. *Whinnery J. R., Jamieson H. W., Robbins T. E.* Coaxial-line discontinuities // Proceedings of IRE. – 1944. – Vol. 32. No. 11. – P. 695-709. 6. *Woods D.* Shielded-open-circuit discontinuity capacitance of a coaxial line // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. – 1972. – Vol. 119. No. 12. – P. 1691 – 1692. 7. *Jurkus A.* Computation of step discontinuities in coaxial line // IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique. – 1972. – Vol. 20. No.10. – P. 708–709. 8. *Risley E. W.* Discontinuity capacitance of a coaxial line terminated in a circular waveguide // IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique. – 1969. – Vol. 17. No. 2. – P. 86–92. 9. *Risley E. W.* Discontinuity capacitance of a coaxial line terminated in a circular waveguide: Part II – Lower bound solution // IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique. – 1973. – Vol. 21. No. 8. – P. 564 – 566. 10. *Marcuvitz N.* Waveguide Handbook. New York: Peter Peregrinus Ltd, 1986. – 423 p. 11. *Gandel, Y.V. Steshenko, S.A. Zaginaylov, G.I.* The method of singular integral equations in the eigenvalue analysis of a coaxial gyrotron with a corrugated insert // Antennas and Propagation

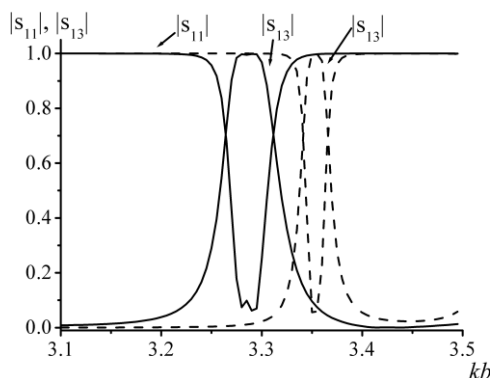


Рис. 4. Зависимость коэффициента прохождения $|S_{13}|$ и отражения $|S_{11}|$ T -волны коаксиального волновода от волнового числа для неперидической структуры, состоящей из 11 щелей.

Длина структуры приблизительно равна 5λ

Society International Symposium, 2003. IEEE. 2003. – Vol. 4. – P. 966 – 969. 12. *Gandel Y. Kononenko O.* Mathematical Model of Ohmic Losses in Coaxial Cavity Gyrotron with a Corrugated Insert // Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves and Workshop on Terahertz Technolo-

gies, 2007. MSMW '07. The Sixth International Kharkov Symposium on. – 2007. – Vol.1. – P. 292 – 294. 13. Kaliberda M. E., Litvinenko L. N., Pogarsky S. A. Diffraction of H_{0m} and E_{0m} Modes by a System of Axially Symmetric Discontinuities in a Coaxial Circuit // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2010. – Vol. 55. №. 5. – P. 505 – 511. 14. Lytvynenko L. M., Kaliberda M. E., Pogarsky S. A. Solution of waves transformation problem in axially symmetric structures // Frequenz. – 2012. – Vol. 66. No. 1-2. – P. 17 – 25. 15. Литвиненко Л.М., Резник І. І., Литвиненко Д. Л. Дифракція хвиль на напівнескінченних періодичних структурах // Доповіді АН Української РСР. – 1991. – №6. – С.62 – 66. 16. Kaliberda M. E., Litvinenko L. N., Pogarskii S. A. Operator method in the analysis of electromagnetic wave diffraction by planar screens // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2009. Vol.54. No. 9. – P. 975 – 98.

*Харьковский национальный
университет имени В.Н. Каразина*

Поступила в редколлегию 17.03.2014