

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 которых расположены в продольном направлении относительно направления распространения волны.

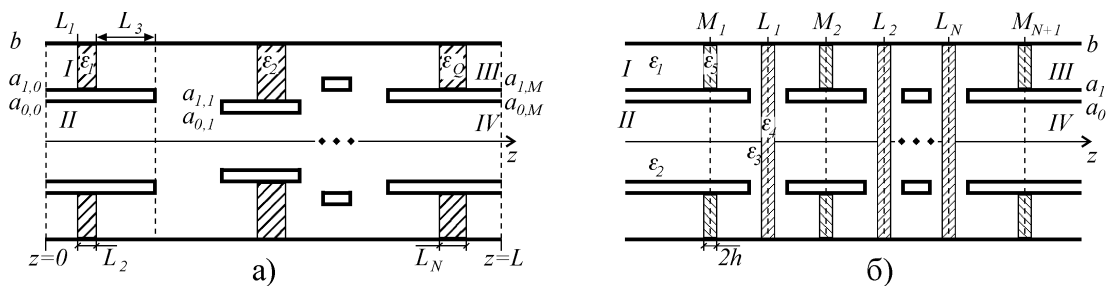


Рис.1. Геометрия исследуемой структуры: *a* – неперидическая структура; *б* – перидическая

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 коаксиального волновода с полым внутренним проводником и круглого волновода, индексы i, j соответствуют

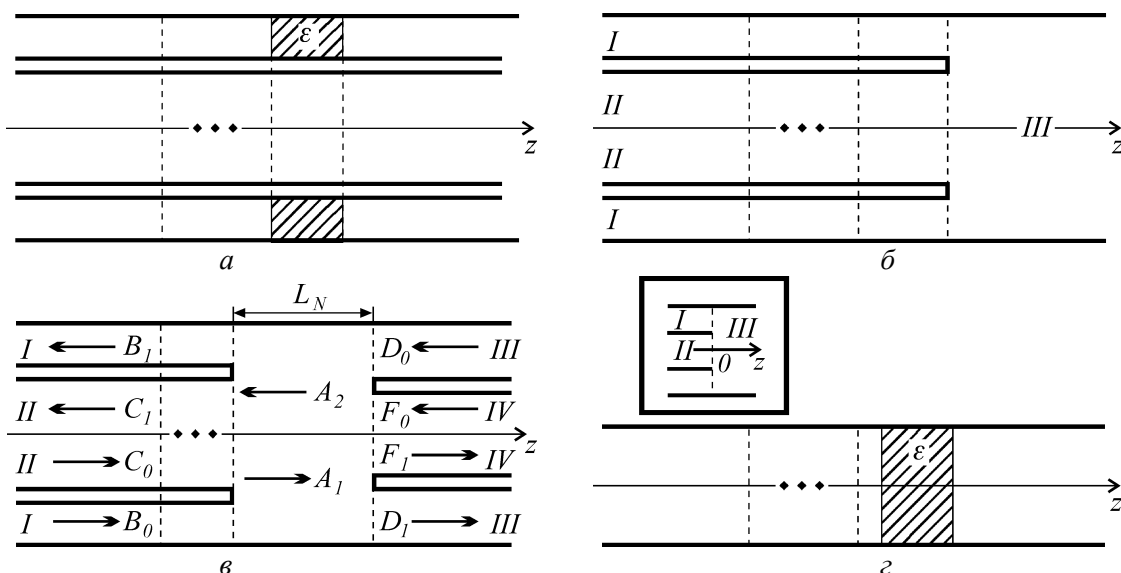


Рис.2. Схематическое изображение многоэлементной структуры, последним N -м элементом которой является: *a* – диэлектрическая шайба в коаксиальном волноводе; *б* – стык коаксиального волновода с полым внутренним проводником и круглого волновода; *в* – стык коаксиального волновода с полым внутренним проводником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

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.

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 запредельными для магнитных волн. В полом

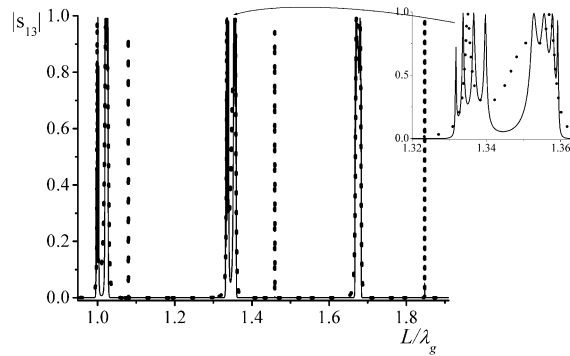


Рис. 3. Зависимость коэффициента прохождения H_{11} -волны круглого волновода от периода следования щелей для периодической структуры, состоящей из двух (кривая из точек) и пяти (сплошная кривая) щелей, $kb=1$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 11$, $\varepsilon_3 = 1$, $\varepsilon_5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

коаксиальном 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 непериодической структуры. Представленные характеристики соответствуют узкополосному фильтру. Положением полосы пропускания на частотной оси удастся управлять за счет изменения длины щелей.

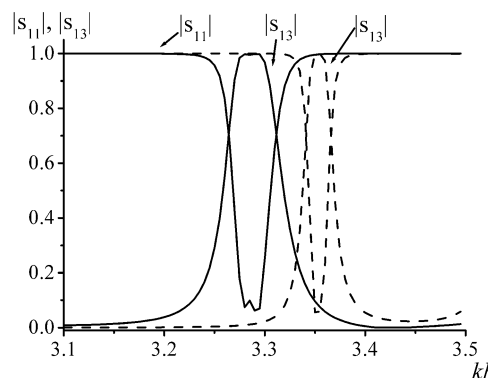


Рис. 4. Зависимость коэффициента прохождения $|s_{13}|$ и отражения $|s_{11}|$ T -волны коаксиального волновода от волнового числа для непериодической структуры, состоящей из 11 щелей. Длина структуры приблизительно равна 5λ

Выводы

Построено решение задачи дифракции аксиально-симметричных и аксиально-несимметричных волн на конечной непериодической системе кольцевых щелей во внутреннем полой 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 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 Technologies, 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., Рєзник 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