

УДК 621.372.8

Полосно-пропускающий фильтр на цилиндрических волноведущих структурах со сложными металлическими гребнями¹

Лонкина Д. В., Земляков В. В., Губский Д. С., Крутиев С. В.

¹ Южный федеральный университет
ул. Зорге, 5, г. Ростов-на-Дону, 344090, Российская Федерация
lonkina.daria@yandex.ru

Получено: 20 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: В данной работе показана возможность использования круглого волновода с радиальными гребнями и кольцевыми сегментами конечной толщины в качестве резонансных диафрагм при синтезе полосно-пропускающих цилиндрических волноводных фильтров. Осуществлен электродинамический расчет и проектирование полосно-пропускающего волноводного фильтра на круглых волноводах с тонкими плоско-поперечными металлическими резонансными диафрагмами. Проведен анализ электродинамических параметров диафрагмы от ее геометрических размеров. Представлены результаты исследования резонансных свойств одиночной диафрагмы. Приведены результаты сравнения АЧХ фильтров, полученных при компьютерном моделировании, с измеренными АЧХ изготовленных фильтров-прототипов.

Ключевые слова: круглый волновод, радиальный гребень, одиночная диафрагма, кольцевой сегмент.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Полосно-пропускающий фильтр на цилиндрических волноведущих структурах со сложными металлическими гребнями / Д. В. Лонкина и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 3. С. 361—369.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Полосно-пропускающий фильтр на цилиндрических волноведущих структурах со сложными металлическими гребнями / Д. В. Лонкина, В. В. Земляков, Д. С. Губский и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 3. — С. 361—369.

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 19-37-90013.

1. Введение

Использование все более высоких частот в работе инфокоммуникационных систем требует постоянного совершенствования характеристик основных элементов и устройств приемо-передающих узлов. Для этого волноводным элементам требуется переход от волноводов с простым сечением к волноводам с поперечным сечением сложной формы [1—7].

Для создания устройств с меньшими геометрическими размерами и для улучшения их характеристик используются волноводы со сложной геометрической формой поперечного сечения, а включение диэлектрических элементов позволяет дополнительно получить уникальные частотно-селективные и поляризационные свойства. Так, наибольшую популярность, как в отечественной, так и в зарубежной СВЧ-технике, приобрели прямоугольные и круглые волноводы с металлическими гребнями и кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением. Однако, несмотря на ряд значительных преимуществ, элементная база на круглых волноводах с металлическими гребнями не получила столь широкого распространения, как на прямоугольных волноводах.

В данной работе показана возможность использования круглого волновода с радиальными гребнями и кольцевыми сегментами конечной толщины в качестве резонансных диафрагм при синтезе полосно-пропускающих цилиндрических волноводных фильтров.

2. Анализ электродинамических параметров одиночной резонансной диафрагмы

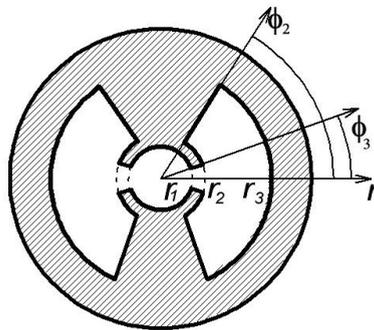


Рис. 1. Поперечное сечение диафрагмы в форме радиального гребня и кольцевого сегмента конечной толщины.

Fig. 1. Cross-section of the diaphragm in the form of a radial ridge and an annular segment of finite thickness

Рассмотрим круглый волновод с диаметром $d = 30$ мм с расположенной в нем металлической бесконечно тонкой диафрагмой с поперечным сечением, показанными на рис. 1. Данное поперечное сечение представляет собой два радиальных гребня с кольцевыми сегментами конечной толщины. Для электродинамического анализа диафрагмы рассмотрим зависимость мнимой части проводимости от геометрических параметров диафрагмы, таких как угол радиального гребня ϕ_2 , угол кольцевого сегмента ϕ_3 , внутренний радиус кольцевого сегмента r_1 , внешний радиус кольцевого сегмента r_2 и внешний радиус одиночной диафрагмы r_3 . Будем считать металлическую диафрагму бесконечно тонкой.

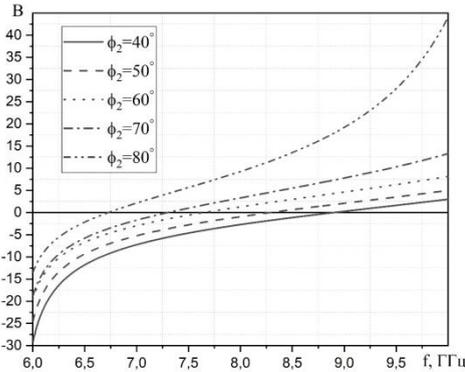


Рис. 2. Зависимость мнимой части проводимости от частоты при различных значениях ϕ_2 .

Fig. 2. Dependence of the imaginary part of the conductivity on the frequency for various values of ϕ_2

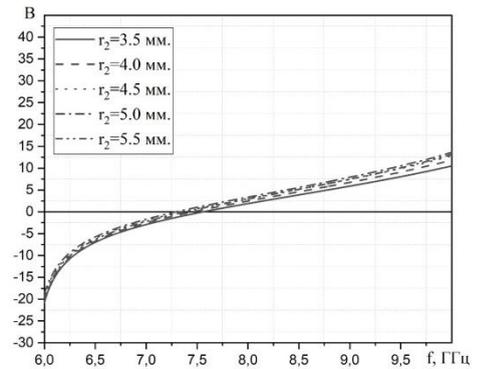


Рис. 3. Зависимость мнимой части проводимости от частоты при различных значениях r_2 .

Fig. 3. Frequency dependence of the imaginary part of the conductivity for various values of r_2

На рис.2 приведена зависимость мнимой части проводимости от частоты при различных значениях угла радиального гребня. Из рис.2 видно, что зависимость мнимой части проводимости $B(f)$ для всех различных значений угла радиального гребня пересекает ось частот в некоторых значениях. Данная точка пересечения кривой с осью абсцисс соответствует резонансной частоте диафрагмы. Таким образом, видно, что при увеличении угла радиального гребня резонансная частота смещается влево в область более низких частот. Так как добротность определяется значением производной в точке резонансной частоты, то из рис.2 можно сделать вывод, что при увеличении угла радиального гребня добротность одиночной резонансной диафрагмы увеличивается.

Зависимость мнимой части проводимости от частоты для различных значениях внешнего радиуса кольцевого сегмента представлена на рис 3.

Как видно из данного рисунка, изменение внешнего радиуса кольцевого сегмента влияет на резонансную частоту одиночной диафрагмы не так сильно, как изменение внутреннего угла радиального гребня. Это объясняется распределением силовых линий по диафрагме: основная часть силовых линий сосредоточена между кольцевыми сегментами. Стоит отметить, что при увеличении внешнего радиуса кольцевого сегмента наблюдается незначительное смещение резонансной частоты в область низких частот. При этом изменение внешнего радиуса практически не влияет на изменение добротности.

3. Синтез полосно-пропускающего фильтра

Проведенные исследования зависимостей резонансных свойств одиночных диафрагм показывает, что разное поведение зависимостей резонансных характеристик от геометрических параметров позволяет производить более точный выбор параметров частотно-селективных устройств, удовлетворяющих заданным требованиям. Для синтеза фильтра используется несколько одиночных диафрагм, расположенных последовательно друг за другом. Между диафрагмами помещаются четвертьволновые отрезки регулярного волновода. При расчете используется теория многоволновой матрицы рассеяния.

Первым шагом при синтезе полосно-пропускающих фильтров является расчет резонансных частот и добротностей каждой резонансной диафрагмы. Учитывая добротности каждой резонансной диафрагмы, имеем следующие геометрические размеры: для первой и третьей резонансных диафрагм: $\varphi_2 = 51.31^\circ$, $\varphi_3 = 31.17^\circ$, $r_1 = 2.37$ мм, $r_2 = 4.33$ мм, $r_3 = 6.95$ мм. и для второй резонансной диафрагмы $\varphi_2 = 58.59^\circ$, $\varphi_3 = 25.64^\circ$, $r_1 = 2.16$ мм., $r_2 = 4.24$ мм, $r_3 = 6.18$ мм. На рис. 4 и рис. 5 представлены АЧХ первой, третьей и второй резонансных диафрагм.

Полученные геометрические размеры резонансных диафрагм были использованы в качестве начального приближения для синтеза полосно-пропускающих фильтров в программном пакете *CST STUDIO*.

На рис. 6 показаны элементы полосно-пропускающего фильтра третьего порядка на круглом волноводе. Сборка полосно-пропускающего фильтра проводилась путем соединения одиночных резонансных диафрагм металлическими шпильками с расположенными между ними участками регулярного круглого волновода соответствующей длины. На рис. 7 показаны АЧХ синтезированного фильтра и результаты измерений изготовленного фильтра прототипа. Пунктирной линией изображен модуль коэффициента отражения $|S_{11}|$, сплошной линией — модуль коэффициен-

та передачи $|S_{21}|$, а маркерами нанесены результаты измерений изготовленного фильтра прототипа.

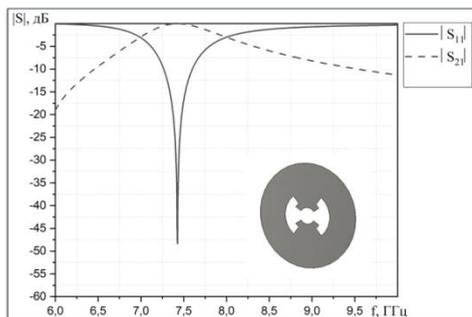


Рис. 4. АЧХ первой, третьей резонансных диафрагм.

Fig. 4. Frequency response of the first, third resonant diaphragms

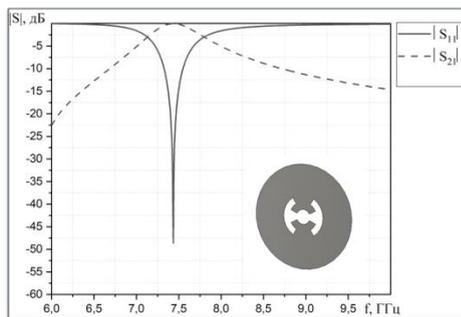


Рис. 5. АЧХ второй резонансной диафрагмы.

Fig. 5. Frequency response of the second resonant diaphragm



Рис. 6. Изготовленный прототип полосно-пропускающего фильтра третьего порядка.

Fig. 6. Prototype of third-order bandpass filter fabricated

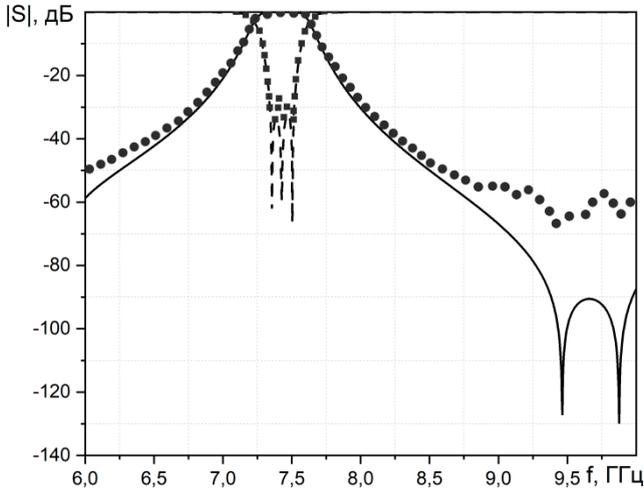


Рис. 7. Характеристики изготовленного прототипа полосно-пропускающего фильтра третьего порядка.

Fig. 7. Characteristics of the manufactured prototype third-order bandpass filter

4. Заключение

Показана возможность использования круглого волновода с радиальными гребнями и кольцевыми сегментами конечной толщины в качестве резонансных диафрагм при синтезе полосно-пропускающих цилиндрических волноводных фильтров. Проведены сравнения АЧХ синтезированного фильтра и изготовленного фильтра-прототипа. Ширина полосы пропускания изготовленного фильтра третьего порядка — 400 МГц (7.22—7.62 ГГц), неравномерность коэффициента передачи в полосе пропускания — до 0.7 дБ, коэффициент отражения — не хуже 33 дБ. Стоит отметить наличие двух полюсов на частотах 9.47 ГГц и 9.87 ГГц, которые позволяют повысить селективность фильтра. Сравнение характеристики фильтра прототипа и характеристики изготовленного фильтра показывает хорошее совпадение, что говорит о корректности расчетов.

Список литературы

1. Seng Yong Yu, Jens Bornemann, Evanescent-mode filters with arbitrary positioned ridges in circular waveguide // Proceedings of 2011 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, 2011. P. 504—508.
2. Yu S. Y., Bornemann J. New Evanescent-Mode Filter Designs In Circular Waveguide Using a Classical Bigenvalue Mode-Spectrum Analysis // 2009 German Microwave Conference. 2009. P. 1—4.

3. Chong Zhang, Junhong Wang, Meie Chen, Zhan Zhang, A new kind of leaky circular waveguide with periodic slots and wire ridge // Proceedings of 2011 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference. 2011. P. 479—482.
4. Musonda E., Hunter I. C. Microwave Bandpass Filters Using Re-Entrant Resonators // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2015. Vol. 63, iss. 3. P. 954—964.
5. Characterization of Metamaterial Slow-Wave Structure Loaded With Complementary Electric Split-Ring Resonators / Xin Wang et al. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2019. Vol. 67, iss. 6. P. 2238—2246.
6. Лонкина Д. В., Губский Д. С., Земляков В. В. Цилиндрические волноведущие структуры сложного сечения в свч-узлах современных инфокоммуникационных систем // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65, № 9. С. 835—851.
7. Метод частичных областей для электродинамического расчета цилиндрических структур с металлическими радиальными Т-ребрами и неоднородным диэлектрическим заполнением / Д. В. Лонкина и др. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 5. С. 395—409.

Информация об авторах

Лонкина Д. В., сотрудник Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Земляков В. В., сотрудник Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Губский Д. С., сотрудник Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Кругнев С. В., сотрудник Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Band-Pass Filter on Cylindrical Waveguide Structures with Complex Metal Ridges

D. V. Lonkina, V. V. Zemlyakov, D. S. Gubskiy, and S. V. Krutiev

South Federal University
105/42 Bolshaya Sadovaya st., Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation
skrutiev@sfedu.ru

Received: May 20, 2022
Peer-reviewed: June 5, 2022
Accepted: June 5, 2022

Abstract: *This paper shows the possibility of using a circular waveguide with radial ridges and annular segments of finite thickness as resonant diaphragms in the synthesis of bandpass cylindrical waveguide filters. An electrodynamic calculation and design of a band-pass waveguide filter based on round waveguides with thin plane-transverse metal resonant diaphragms has been carried out. The analysis of the electrodynamic parameters of the diaphragm from its geometrical dimensions is carried out. The results of a study of the resonant properties of a single diaphragm are presented. The results of comparing the frequency response of filters obtained by computer simulation with the measured frequency response of manufactured prototype filters are presented.*

Keywords: *round waveguide, radial comb, single diaphragm, annular segment.*

For citation (IEEE): D. V. Lonkina, V. V. Zemlyakov, D. S. Gubskiy, and S. V. Krutiev, "Band-Pass Filter on Cylindrical Waveguide Structures with Complex Metal Ridges," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 361–369, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.3.27. (In Russ.).

References

- [1] Seng Yong Yu, Jens Bornemann, "Evanescent-mode filters with arbitrary positioned ridges in circular waveguide," *Proceedings of 2011 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing*, pp. 504–508, 2011.
- [2] S. Y. Yu and J. Bornemann, "New Evanescent-Mode Filter Designs In Circular Waveguide Using a Classical Bigenvalue Mode-Spectrum Analysis," *2009 German Microwave Conference*, 2009, pp. 1-4, doi: 10.1109/GEMIC.2009.4815880.
- [3] Chong Zhang, Junhong Wang, Meie Chen, and Zhan Zhang, "A new kind of leaky circular waveguide with periodic slots and wire ridge," *Proceedings of 2011 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference*, pp. 479–482, 2011.
- [4] E. Musonda and I. C. Hunter, "Microwave Bandpass Filters Using Re-Entrant Resonators," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 3, pp. 954–964, Mar. 2015, doi: 10.1109/tmtt.2015.2389216.
- [5] X. Wang et al., "Characterization of Metamaterial Slow-Wave Structure Loaded With Complementary Electric Split-Ring Resonators," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 6, pp. 2238–2246, Jun. 2019, doi: 10.1109/tmtt.2019.2908360.

- [6] D. V. Lonkina, D. S. Gubskii, V. V. Zemlyakov, “Cylindrical Waveguiding Structures with Complex Cross Sections in Microwave Units of Modern Information and Communication Systems,” *Journal of Communications Technology and Electronics*, Vol. 65, no. 9, pp. 967–981, doi: 10.1134/S1064226920090053. (In Russ.).
- [7] D. V. Lonkina, V. V. Zemlyakov, D. S. Gubskiy, G. F. Zargano, and S. V. Krutiev, “The partial-region method for electrodynamic calculation of cylindrical structures with metal radial t-ridges and inhomogeneous dielectric filling,” *Radiophysics and Quantum Electronics*, vol. 64, iss. 5, 357–369, 2021. (In Russ.).

Information about the authors

D. V. Lonkina, employee of South Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

V. V. Zemlyakov, employee of South Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

D. S. Gubskiy, employee of South Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

S. V. Krutiev, employee of South Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.