

УДК 621.372

Полосно-пропускающий фильтр на метаволноводе

Сдобнова В. П., Махно А. С., Крутиев С. В.

*Южный федеральный университет
ул. Большая Садовая, 105/42,
г. Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация
skrutiev@sfedu.ru*

Получено: 21 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: В статье предлагается альтернативный метод проектирования миниатюрных волноводных фильтров на основе локально резонансных метаматериалов, а также реализация сверхмалых метаматериальных фильтров (метафильтры) с использованием механизма субволнового направления в полых волноводах, нагруженных небольшими резонаторами. В частности, используются композитные штыревые волноводы, построенные из полых металлической трубы, нагруженной набором резонансных штырей, которые разнесены на глубокие субволновые расстояния. В таких структурах многократное резонансное рассеяние приводит к возникновению суб- λ моды с настраиваемой полосой пропускания ниже индуцированного гибридного зазора. Чтобы гарантировать совместимость с существующими технологиями, предложен субволновой метод согласования небольших фильтров со стандартными волноводными интерфейсами, которые можно назвать метапортом. Расчеты производились с помощью среды компьютерного автоматизированного проектирования CST Studio.

Ключевые слова: метаматериалы, метапорт, субволновой метод согласования, CST Studio.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Сдобнова В. П., Махно А. С., Крутиев С. В. Полосно-пропускающий фильтр на метаволноводе // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 3. С. 353—360.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Сдобнова, В. П. Полосно-пропускающий фильтр на метаволноводе / В. П. Сдобнова, А. С. Махно, С. В. Крутиев // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 3. — С. 353—360.

1. Введение

За последние несколько лет развитие спутниковых систем следующего поколения, таких как нано- и микроспутники, стимулировало поиск миниатюрных микроволновых и мм-волновых систем. Микроволновые фильтры являются основными строительными блоками пассивных устройств, которые, как правило, основаны на микрополосковых, диэлектрических, коаксиальных и волноводных технологиях. Волноводные фильтры являются идеальным решением для космических приложений благодаря низким потерям энергии и возможности обработки большой мощности без ограничения частоты [1]. Основным недостатком волноводных фильтров является их большой объем и большой вес из-за размеров образующих их волноводных полостей, которые напрямую зависят от рабочей длины волны (λ). Эти полости соединяются с помощью диафрагм в E - или H -плоскости, заглушек или стоек [2—4]. Среди различных попыток сделать микроволновые фильтры меньше, коаксиальные комбинированные фильтры [4] и фильтры на волноводе [5—10] зарекомендовали себя как компактные микроволновые фильтры для космического применения, соответственно, с коаксиальным и волноводным интерфейсами. Метаматериалы — это искусственные волновые среды, структурированные на субволновых масштабах, в которых коллективное действие составляющих элементов (мета-атомов) вызывает эффективные свойства, не встречающиеся у природных материалов.

2. Теория

Модель метаволновода состоит из двух прямоугольных волноводов разного сечения; в волноводе меньшего сечения находятся металлические штыри высотой h_r , радиусом r и периодичностью a . Штыри касаются только нижней стенки волновода и резонируют, когда h_r приближается к состоянию четверти длины волны. Для регулировки критической частоты $f_c = c/2W$ можно менять ширину волновода W , сохраняя фиксированную высоту волновода $h = 9,52$ мм, что соответствует высоте стандартного волновода $WR75$. Стандарт $WR75$ широко используется в системах спутниковой связи в диапазонах X и Ku диапазонах (10—18 ГГц). Значение параметра $h_r = 5$ мм, чтобы штыри резонировали в целевом диапазоне частот ($f_r = 15$ ГГц). Предполагаем, что диаметр штыря $2r$ составляет от 0,5 до 1 мм, что близко к минимальной толщине, которая может быть обеспечена методом селективного лазерного плавления (SLM) с использованием алюминиевого сплава с низкими потерями $AlSi10Mg$, в соответствии с современными технологическими стандартами.

Чтобы получить допустимое согласование импеданса в полосе пропускания первый и последний штыри фильтра вставляются на границе между двух волноводов. Согласование может быть улучшено еще больше путем разработки компактных метапортов.

На рис 1 показана схема полосно-пропускающего фильтра в двух проекциях. В таблице 1 представлены размеры одиночного фильтра.

На рис. 2 представлена амплитудно-частотная характеристика одиночного фильтра. На графике сплошной линией изображен коэффициент прохождения S_{21} , пунктирной линией коэффициент отражения S_{11} .

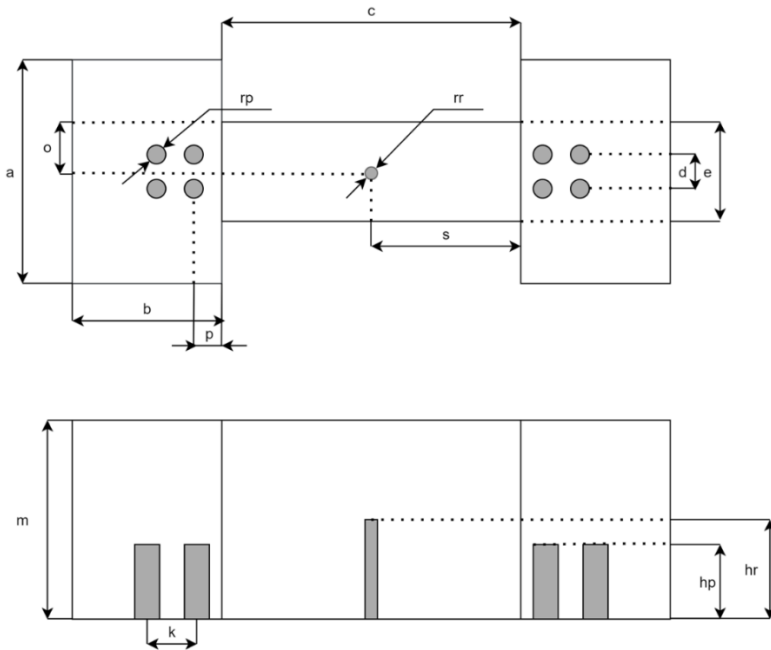


Рис. 1. Схема полосно-пропускающего фильтра.

Fig. 1. Scheme of the bandpass filter

Таблица 1 — Table 1

a, mm	b, mm	c, mm	d, mm	e, mm	s, mm	p, mm	rr, mm	rp, mm	m, mm	hp, mm	hr, mm	o, mm	k, mm
19.05	9	3.5	1.5	7	6.75	1.5	0,3	0.5	9.52	3.5	5.15	3.5	1.5

Как видно из графика, резонансная частота фильтра $f = 12,15$ ГГц, добротность $Q = 20$. Таким образом на данной топологии можно синтезировать фильтры более высокого порядка.

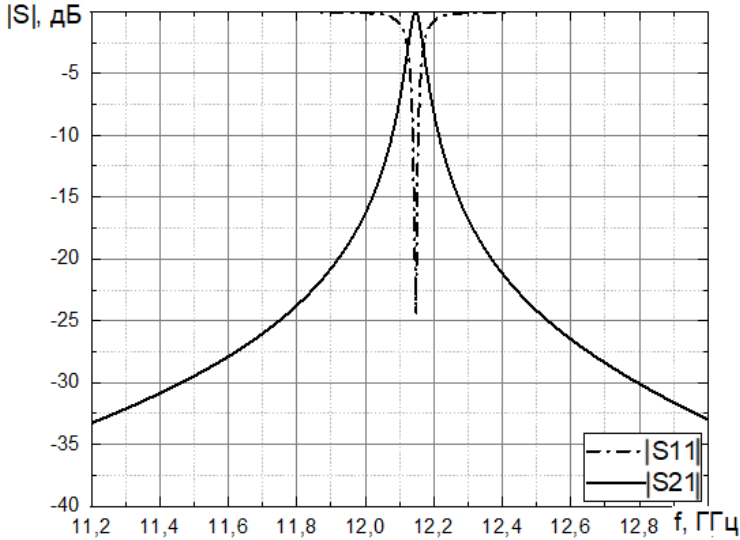


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика полосно-пропускающего фильтра с одним резонансом.

Fig. 2. Frequency response of a band pass filter with one resonant

На рис. 3 и 4 представлены зависимости частоты от геометрических размеров. Так, при увеличении параметра hr — высоты штыря — резонансная частота смещается в область нижних частот, а добротность увеличивается. Такой же эффект наблюдается при увеличении параметра rr .

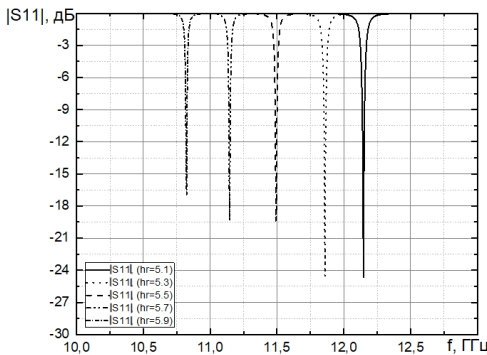


Рис. 3. Зависимость $|S_{11}|$ от частоты при изменении параметра hr .

Fig. 3. Dependence $|S_{11}|$ on the frequency when changing the parameter hr

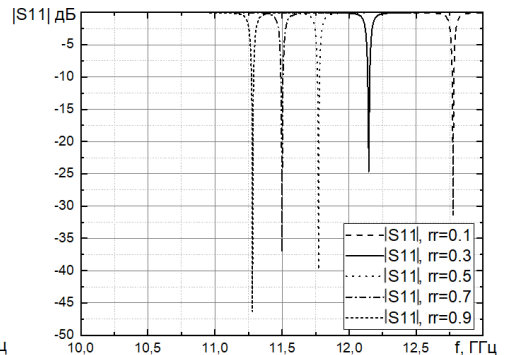


Рис. 4. Зависимость $|S_{11}|$ от частоты при изменении параметра rr

Fig. 4. Dependence $|S_{11}|$ on the frequency when changing the parameter rr

Далее были синтезированы полосно-пропускающие фильтры второго, третьего и четвертого порядка. На рис. 5 представлены амплитудно-частотные характеристики синтезированных фильтров.

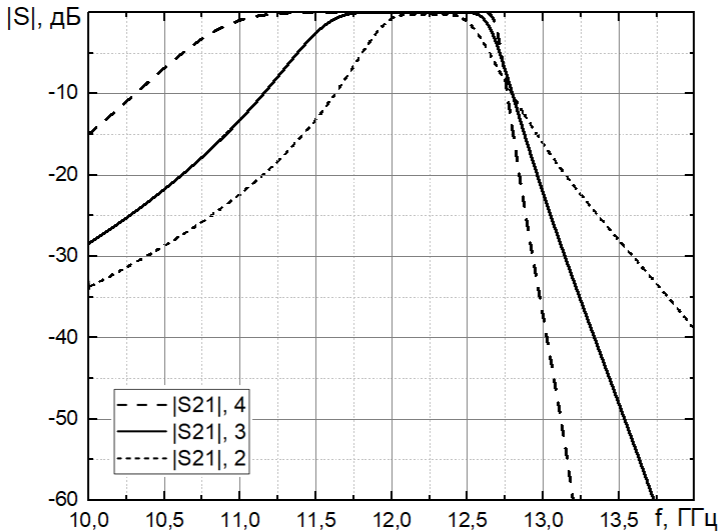


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики синтезированных полосно-пропускающих фильтров второго, третьего и четвертого порядка.

Rice. 5. Amplitude-frequency characteristics of the synthesized band-pass filters of the second, third and fourth order

3. Заключение

В данной работе продемонстрировано применение локально резонансных метаматериалов для создания метаматериальных волноводных фильтров (метафильтров), совместимых со стандартными волноводными интерфейсами и имеющих значительно меньшие размеры и вес по сравнению с существующими решениями. Концепция также совместима с периодическим и случайным расположением резонаторов и различными типами портов. Показана возможность синтеза и дальнейшего производства полосно-пропускающих фильтров старших порядков.

Список литературы

1. Boria V. E., Gimeno B. Waveguide filters for satellites // IEEE Microw. Mag. 2007. Vol. 8, no 5. P. 60—70.
2. Matthaei G. L., Schiffman B., Cristal E., Robinson L. Microwave Filters and Coupling Structures. New Jersey, U.S. Army electronics research and development laboratory. 1963. 116 p.

3. Kudsia C., Cameron R., Tang W.-C. Innovations in microwave filters and multiplexing networks for communications satellite systems // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1992. Vol. 40, no. 6. P. 1133—1149.
4. Levy R., Cohn S. B. A history of microwave filter research, design, and development // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1984. Vol. 32, no. 9. P. 1055—1067.
5. Craven G. F., Mok C. K. The design of evanescent mode waveguide bandpass filters for a prescribed insertion loss characteristic, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1971. Vol. 19, no. 3 P. 295—308.
6. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Т. 1. М. : Высшая школа, 1970. 440 с.
7. Крутиев С. В., Земляков В. В., Заргано Г. Ф. Волноводный полосно-пропускающий фильтр на сложных резонансных диафрагмах // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60, № 12. С. 1231—1236.
8. Волноводный квазиэллиптический фильтр на сложных резонансных диафрагмах / Г. Ф. Заргано и др. // Физические основы приборостроения. 2019. Т. 8, № 1. С. 47—54.
9. Электродинамический анализ и синтез эллиптического фильтра на сложных резонансных диафрагмах в прямоугольном волноводе / В. В. Земляков и др. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 12. С. 1130—1139.
10. A design of waveguide elliptic filter based on resonant diaphragms with a complex aperture / V. Zemlyako et al. // International Journal of Circuit Theory and Applications. 2019. No 47. P. 55—64.

Информация об авторах

Сдобнова В. П., сотрудник Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Махно А. С., сотрудник Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

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

Band-Pass Filter on a Metawaveguide

V. P. Sdobnova, A. S. Makhno, and S. V. Krutiev

South Federal University

105/42 Bolshaya Sadovaya st., Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation
skrutiev@sfnu.ru

Received: May 21, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: This article proposes an alternative method for designing miniature waveguide filters based on locally resonant metamaterials. Implementation of ultra-small metamaterial filters (metafilters) using the subwavelength direction mechanism in hollow waveguides loaded with small resonators. In particular, composite pin waveguides are used, constructed from a hollow metal tube loaded with a set of resonant pins that are spaced over deep subwavelength distances. In such structures, multiple resonance scattering leads to the emergence of a sub- λ mode with a tunable bandwidth below the induced hybridization gap. In order to guarantee compatibility with existing technologies, a subwavelength method of matching small filters with standard waveguide interfaces, which can be called a meta-port, is proposed. Calculations were performed using the CST Studio computer-aided design environment.

Keywords: metamaterials, metaport, subwavelength matching method, CST Studio.

For citation (IEEE): V. P. Sdobnova, A. S. Makhno, and S. V. Krutiev, "Band-Pass Filter on a Metawaveguide," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 353–360, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.3.26. (In Russ.).

References

- [1] V. Boria and B. Gimeno, "Waveguide filters for satellites," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 8, no. 5, pp. 60–70, Oct. 2007, doi: 10.1109/mmm.2007.903649.
- [2] G. L. Matthaei, B. Schiffman, E. Cristal, and L. Robinson, *Microwave Filters and Coupling Structures*. New Jersey, U.S. Army electronics research and development laboratory, 1963.
- [3] C. Kudsia, R. Cameron, and W.-C. Tang, "Innovations in microwave filters and multiplexing networks for communications satellite systems," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 40, no. 6, pp. 1133–1149, Jun. 1992, doi: 10.1109/22.141345.
- [4] R. Levy and S. B. Cohn, "A History of Microwave Filter Research, Design, and Development," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 32, no. 9, pp. 1055–1067, Sep. 1984, doi: 10.1109/TMTT.1984.1132817.
- [5] G. F. Craven and C. K. Mok, "The Design of Evanescent Mode Waveguide Bandpass Filters for a Prescribed Insertion Loss Characteristic," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 19, no. 3, pp. 295–308, Mar. 1971, doi: 10.1109/tmtt.1971.1127503.
- [6] I. V. Lebedev, *Technique and microwave devices*. Vol. 1. Moscow: Vysshaya Shkola, 1970. (In Russ.).

- [7] V. V. Zemlyakov, G. F. Zargano, and S. V. Krutiev, “Waveguide bandpass filter on complex resonance diaphragms,” *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 60, no. 12, pp. 1305–1310, Dec. 2015, doi: 10.1134/s1064226915110170. (In Russ.).
- [8] G. F. Zargano, V. V. Zemlyakov, S. V. Krutiev, and A. B. Kleschenkov, “Waveguide quasi-elliptic filter on complex resonant diaphragms,” *Fizicheskiye osnovy priborostroyeniya*, vol. 8, no. 1, pp. 47–54, Mar. 2019, doi: 10.25210/jfop-1901-047054. (In Russ.).
- [9] V. V. Zemlyakov, G. F. Zargano, S. V. Krutiev, and M. Yu. Tyaglov, “Electrodynamic Analysis and Synthesis of an Elliptic Filter Based on Complex Resonant Irises in a Rectangular Waveguide,” *Radiophysics and Quantum Electronics*, vol. 61, no. 12, pp. 915–923, Jun. 2019, doi: 10.1007/s11141-019-09947-0. (In Russ.).
- [10] V. Zemlyakov, S. Krutiev, M. Tyaglov, and V. Shevchenko, “A design of waveguide elliptic filter based on resonant diaphragms with a complex aperture,” *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 47, no. 1, pp. 55–64, Oct. 2018, doi: 10.1002/cta.2566.

Information about the authors

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

A. S. Makhno, employee of South Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

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