

Электроника СВЧ

УДК 621.371/537.862

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-1-63-69>

Исследование полосовых фильтров К-диапазона на прямоугольных концентрических резонаторах

В. В. Комаров✉, С. К. Бушанский

Саратовский государственный технический университет
им. Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

✉ vyacheslav.komarov@gmail.com

Аннотация

Введение. Объемные резонаторы простой формы – прямоугольные, цилиндрические и коаксиальные – широко применяются в современной микроволновой технике при проектировании различных функциональных устройств среднего и высокого уровня мощности. Параметры таких резонаторов можно установить аналитически, используя соотношения, взятые из литературы. Концентрические резонаторы, выполненные на основе классических объемных резонаторов простой формы с центральным металлическим ядром, представляют собой отдельный класс электродинамических систем, свойства которых остаются малоизученными. Одна из таких структур, а именно прямоугольный концентрический резонатор (ПКР), предложена в настоящей статье в качестве базового элемента полосовых фильтров К-диапазона (18...26 ГГц).

Цель работы. Изучение потенциальных возможностей ПКР для создания устройств фильтрации электромагнитных сигналов микроволнового диапазона.

Материалы и методы. Собственные электродинамические характеристики ПКР и параметры матрицы рассеяния СВЧ-фильтров на его основе исследуются с помощью метода конечных элементов, реализованного в пакете программ COMSOL.

Результаты. На первом этапе моделирования получены простые полиномиальные соотношения для расчета нормированных резонансных длин волн ПКР. Далее построены две модели полосовых СВЧ-фильтров на ПКР с разными размерами и исследованы их электродинамические характеристики. В ходе численного анализа установлены размеры резонаторов и сформулированы практические рекомендации по реализации полосно-пропускающих и полосно-заграждающих СВЧ-фильтров нового типа.

Заключение. Приведены результаты конечно-элементного анализа амплитудно-частотных характеристик двух моделей полосовых фильтров К-диапазона на ПКР, впервые предложенных для этих целей. Указаны основные преимущества таких фильтров. Получены аналитические соотношения для расчета собственных резонансных длин волн рассматриваемых в работе концентрических резонаторов.

Ключевые слова: СВЧ-фильтр, полоса пропускания, прямоугольный концентрический резонатор, численное моделирование

Для цитирования: Комаров В. В., Бушанский С. К. Исследование полосовых фильтров К-диапазона на прямоугольных концентрических резонаторах // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 1. С. 63–69. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-63-69

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.11.2019; принята к публикации после рецензирования 13.12.2019; опубликована онлайн 28.02.2020



Investigation of Band-Pass Filters of K-Range on Rectangular Concentric Resonators

Vyacheslav V. Komarov✉, Sergey K. Bushanskiy

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

✉ vyacheslav.komarov@gmail.com

Abstract

Introduction. Simple-shaped cavity resonators: rectangular, cylindrical and coaxial, are widely applied in modern microwave engineering in design of different functional devices of middle and high power levels. Parameters of resonators can be obtained analytically by using expressions from literature. Concentric resonators, performed on the basis of classical simple-shaped cavities with a central metallic core represent a new class of electrodynamic systems of microwave range, the properties of which remain poorly studied. One of these structures, named a rectangular concentric resonator (RCR) is proposed in the paper as a basic unit of K-band bandpass filters (18...26 GHz).

Aim. To study potential possibilities of RCR for creation electromagnetic signals filtration devices of microwave range.

Materials and methods. The finite element method implemented in the package COMSOL was used to investigate electrodynamic characteristics of RCR and scattering matrix parameters of the microwave filters on RCR-basis.

Results. Simple polynomial expressions for computation of normalized resonant wavelengths of RCR were obtained at the first stage of modeling. Next, two models of passband microwave filters by RCR with different sizes were built and their EM characteristics were studied. Cavities sizes were determined numerically and practical recommendations on the realization of a new type bandpass microwave filters were formulated.

Conclusion. New results of the finite-element analysis of spectral characteristics of two models of bandpass K-range filters on rectangular concentric resonators were represented. The advantages of the filters were indicated. Simple analytical expressions for calculation of the resonance wavelengths of the considered concentric resonators were obtained.

Keywords: microwave filter, band pass, rectangular concentric cavity, numerical modeling

For citation: Komarov V. V., Bushanskiy S. K. Investigation of Band-Pass Filters of K-Range on Rectangular Concentric Resonators. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 1, pp. 63–69. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-63-69

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 26.11.2019; accepted 13.12.2019; published online 28.02.2020

Введение. Одним из приоритетных направлений усовершенствования СВЧ-устройств различного назначения является снижение их массогабаритных показателей и повышение уровня передаваемой мощности, что особенно актуально для бортовой радиоэлектронной аппаратуры авиационной и космической техники [1–3]. Применение в качестве базовых элементов таких устройств волноводов и резонаторов сложной конфигурации в ряде случаев позволяет найти приемлемые технические решения. В частности, для расширения функциональных возможностей СВЧ-фильтров высокого и среднего уровня мощности все чаще используются прямоугольные резонаторы (ПР) с

неоднородным металлodieлектрическим заполнением. К примеру, на базе ПР с металлическими спиралями (helical resonators) выполняются полосовые фильтры диапазона 200...500 МГц для бортовых радиоэлектронных комплексов систем космической связи [4, 5].

Чаще в литературе можно встретить структуры фильтров на ПР с более простыми включениями. В частности, в [6, 7] описаны конструкции каскадных полосовых фильтров (ПФ) различных частотных диапазонов на ПР с металлическими аксиально-симметричными штырями различной топологии. Еще один пример построения аналогичных структур фильтрации электромагнитных

сигналов на ПР с металлическими штырями и коаксиальными элементами связи, а также конструкции СВЧ-фильтров L- и X-диапазонов можно найти в [8, 9]. Наконец в [10, 11] приведены результаты численного расчета и измерений мало-размерных ПФ на ПР с металлическими ребрами (ridged resonators) различных диапазонов с волноводными и с коаксиальными элементами связи.

Общей особенностью всех конструкций СВЧ-фильтров, описанных в [4–11], является крепление внутренних включений (спиралей, штырей или ребер) к одной из стенок ПР. Альтернативный подход к размещению металлических включений внутри резонатора реализован в так называемых концентрических резонаторах, наиболее известным из которых является сферический концентрический резонатор (СКР) [12]. В таких структурах в центре резонатора, форма которого в общем случае может быть любой, размещается металлическая сфера, диаметр которой меньше определяющего размера резонатора. В [13] впервые показано, что СКР могут быть адаптированы для разработки компактных полосовых СВЧ-фильтров К-диапазона.

Исследования, представленные в [13], показали, что сферическая форма базовых резонаторов не всегда удобна для проектирования каскадных СВЧ-фильтров. Более приемлемыми для этого представляются ПР, использованные в [4–11]. В связи с этим целью настоящей статьи является поиск технических решений устройств фильтрации на базе прямоугольного концентрического резонатора (ПКР) (рис. 1). В статье рассмотрен частный случай такого резонатора с размерами $a = a_x = a_y = a_z = \text{const}$, в центре которого размещается металлическая сфера диаметром b .

Метод численного анализа. Учитывая сложность реализации граничных условий на криволинейной поверхности сферического элемента конструкции ПКР (рис. 1), в качестве основного инструмента численного моделирования был выбран трехмерный метод конечных элементов (МКЭ) и универсальный пакет программ COMSOL на его основе. Сходимость данного метода исследовалась на примере экспериментальных данных для ПР ($x \times y \times z = 50 \times 50 \times 51$ мм) с цилиндрическими вставками высотой 15.8 мм и диаметром 14 мм, размещенными на диагонали нижней стенки резонатора, имеющего коаксиальные элементы связи, измерения которого в ча-

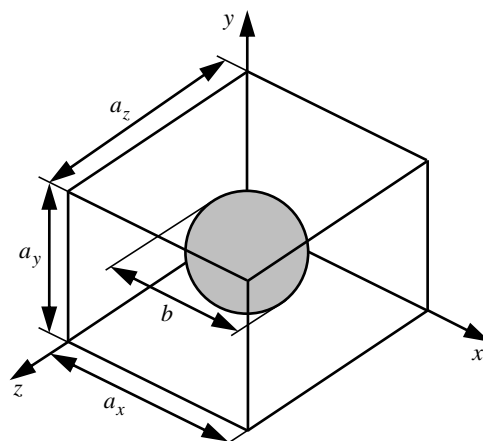


Рис. 1. Прямоугольный концентрический резонатор

Fig. 1. Rectangular concentric resonator

стотном диапазоне 2.5...4 ГГц были описаны в [14]. Особенностью конструкции многомодового фильтра, предложенного в [14], является размещение коаксиальных портов в центре боковых стенок под углом 90° друг к другу. Результаты моделирования и измерений для данного случая приведены в таблице.

Коэффициент отражения прямоугольного резонатора с двумя цилиндрическими вставками

Reflection coefficient of rectangular resonator with two cylindrical insertions

f , ГГц	S_{11} , дБ	
	Измерения [14]	Модель на МКЭ
2.50	-0.073	-0.054
2.75	-11.1	-12.3
3.00	-19.3	-21.1
3.25	-12.6	-15.2
3.50	-14.8	-17.1
3.75	-0.37	-0.42
4.00	-0.11	-0.13

Тестирование численной модели этого фильтра, построенной с привлечением пакета COMSOL, позволило установить плотность сетки тетраэдрических конечных элементов Уитни второго порядка, обеспечивающую необходимую точность вычислений.

Результаты моделирования. На первом этапе исследований с помощью МКЭ были найдены собственные электродинамические параметры ПКР (рис. 1) в зависимости от нормированного размера b/a . Результаты численного моделирования собственных значений (резонансных длин волн) основного H -вида колебаний были аппроксимированы полиномом третьей степени с привлечением системы математических расчетов

MATLAB для интервала изменения размеров $0.1 \leq b/a \leq 0.9$:

$$\lambda/a = -0.4961(b/a)^3 + 1.9722(b/a)^2 - 0.1278(b/a) + 1.4115, \quad (1)$$

где λ – резонансная длина волны.

Корреляция результатов численного моделирования и аппроксимации по методу наименьших квадратов определяется величиной $R^2 = 0.9991$, где R – коэффициент корреляции.

Для ПКР со стенкой размером $a = 10$ мм из меди с электропроводностью $\sigma = 5.8 \cdot 10^7$ См/м в [15] получены значения собственной добротности с учетом (1). Расчеты показали, что собственная добротность ПКР для низшего H -вида колебаний достигает значений $Q_c = 16\,000 \dots 18\,000$ при вариациях размеров $0.2 \leq b/a \leq 0.5$, в то время как для низшего E -вида – $Q_c = 15\,000 \dots 17\,000$ при $0.3 \leq b/a \leq 0.6$.

По аналогии с [13], 3D-модель ПР была дополнена стандартными коаксиальными элементами связи ($D/d = 3.5/1.52$, где D и d – диаметры внешнего и внутреннего проводника коаксиальной линии соответственно, мм). Размер стенки резонатора был выбран $a = 13.5$ мм. Для размещения внутреннего сферического элемента в ПР был использован цилиндрический стержень, являю-

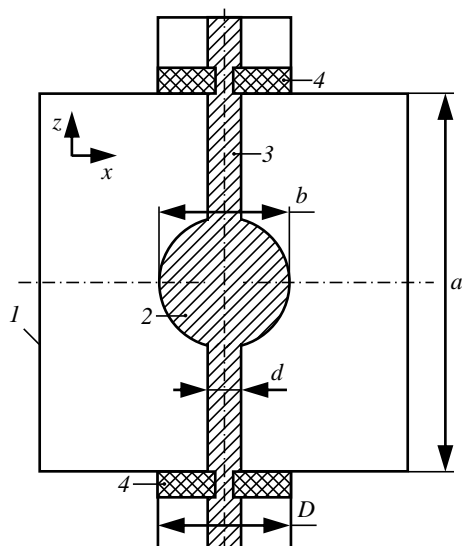


Рис. 2. Однорезонаторный полосовой фильтр:

1 – прямоугольный резонатор; 2 – сферический элемент; 3 – цилиндрический стержень; 4 – опорная шайба

Fig. 2. Single-resonator bandpass filter: 1 – rectangular cavity; 2 – spherical element; 3 – cylindrical rod; 4 – bead

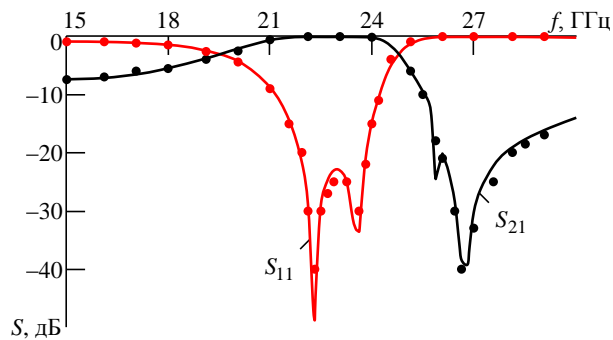


Рис. 3. S-параметры однорезонаторного фильтра. Линии – модель на основе трехмерного метода конечных элементов; маркеры – модель на основе трехмерного метода конечных разностей

Fig. 3. S-parameters of single-resonator filter.

Lines – model based on 3D-method of the finite elements; markers – model based on 3D-method of finite differences

щийся продолжением внутренних проводников коаксиальных линий (рис. 2, 3). Конструкция фильтра также включает тонкие фторопластовые шайбы 4, размеры которых выбраны так, чтобы волновое сопротивление на участке шайбы было равно волновому сопротивлению коаксиальной линии.

На входе рассматриваемого СВЧ-четырёхполосника задавались условия распространения поперечной ТЕМ-волны единичной амплитуды для частотного диапазона 15...30 ГГц. На выходе были заданы поглощающие граничные условия, имитирующие идеализированную согласованную нагрузку. Единственным варьируемым параметром 3D-модели СВЧ-фильтра был диаметр сферы b .

Исследования, проведенные с помощью этой модели, позволили установить наличие двух резонансов слева и справа от центральной частоты $f_0 = 23$ ГГц, формирующих полосу пропускания 24 % при $b/a = 0.4148$. Результаты численного анализа для этого случая показаны на рис. 3.

Для верификации результатов вычислений была построена аналогичная 3D-модель фильтра, основанная на методе конечных разностей (МКР) во временной области, реализованном в пакете программ QuickWave3D, и установлены частотные зависимости коэффициента отражения и передачи такого четырехполосника. Как видно из рис. 3, в ходе проверки было получено хорошее совпадение численных данных, полученных двумя независимыми методами расчета.

Из приведенной на рис. 3 амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) видно, что затухание сигнала в длинноволновой части полосы заграждения на ча-

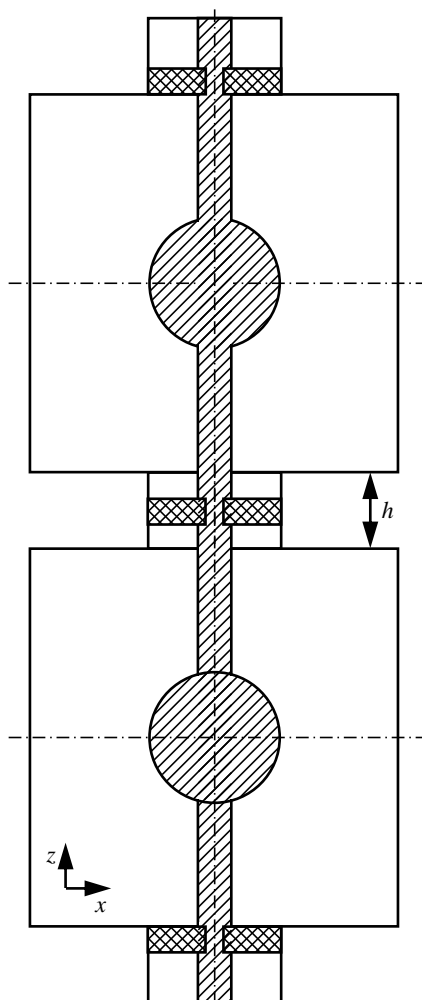


Рис. 4. Двухрезонаторный полосовой фильтр
 Fig. 4. Double-resonator bandpass filter

стотах ниже 21 ГГц оказывается недостаточным. Для устранения этого недостатка построена еще одна численная модель полосового фильтра на двух ПКР с размером стенки $a = 15$ мм каждый, связанных коаксиальной диафрагмой толщиной $h = 1$ мм (рис. 4). Сферические включения, как и в конструкции фильтра на СКР [13], соединяются металлическим штырем, являющимся продолжением внутренних проводников коаксиальных линий. Диаметр отверстия связи между резонаторами был выбран равным диаметру внешнего проводника D (рис. 2).

В ходе численного анализа и оптимизации данной структуры в диапазоне 18...24 ГГц были определены размеры фильтра $b/a = 0.2533$, обеспечивающие полосу пропускания не более 6.3 % на центральной частоте 19.9 ГГц и полосу заграждения 10.4 % в диапазоне 20.5...22.7 ГГц. Результаты моделирования для этого случая представлены на рис. 5, из которого следует, что для каскадной конструкции фильтра на ПКР уда-

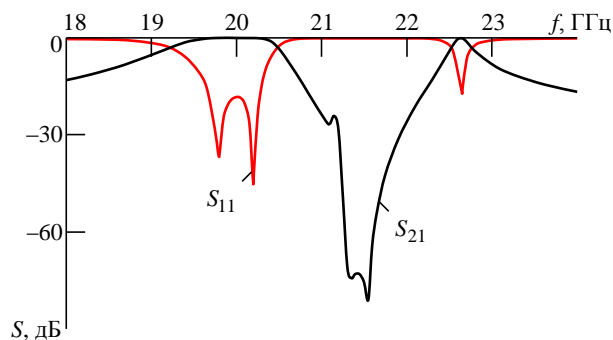


Рис. 5. S-параметры двухрезонаторного фильтра
 Fig. 5. S-parameters of double-resonator filter

ется добиться затухания ~ 20 дБ в полосе пропускания и более приемлемой крутизны АЧХ в длинноволновой части полосы заграждения, чем ранее (рис. 3). Кроме того, благодаря еще одному резонансу, наблюдаемому на частоте 22.6 ГГц, формируется участок АЧХ с центральной частотой 21.5 ГГц, который может быть использован для создания полосно-заграждающего фильтра диапазона 20.2...22.6 ГГц.

Обсуждение результатов. Исследования, представленные в настоящей статье, показали, что в однорезонаторном фильтре с коаксиальными элементами связи (рис. 2) в диапазоне 15...30 ГГц наблюдаются 2 резонанса, обусловленных низшими четным и нечетным H -колебаниями ПКР с размером стенки $a = 13.5$ мм. У двухрезонаторного фильтра (рис. 4) на ПКР с $a = 15$ мм аналогичная АЧХ формируется в более узком диапазоне 18...22 ГГц (рис. 5), в то время как на частоте 22.6 ГГц появляется дополнительный узкополосный резонанс, соответствующий низшему E -колебанию ПКР.

Таким образом, несмотря на более низкие значения собственной добротности, чем у других концентрических резонаторов [15], ПКР может быть успешно адаптирован для создания узкополосных пропускающих и заграждающих фильтров. При этом конструкция фильтров на ПКР получается более простой для проектирования и изготовления, чем, к примеру, аналогичная конструкция фильтра на СКР [13]. Благодаря более высоким значениям резонансной длины волны основного типа колебаний, чем у классических ПР, функциональные СВЧ-устройства на основе ПКР оказываются более компактными. Кроме того, такие устройства обладают более высокой электрической прочностью, чем аналогичные элементы на ПР с металлическими вставками [6, 10, 16], так как в них отсутствуют области с высокой напряженностью электрического поля.

Заключение. В настоящей статье представлены две модификации компактных ПФ К-диапазона на ПКР с коаксиальными элементами связи. Анализ электродинамических характеристик этих устройств проводился МКЭ. На предварительных этапах моделирования с помощью взятых из литературы экспериментальных данных установлены значения плотности сетки тетраэдрических элементов, обеспечивающие высокую точность расчета при минимальных вычислительных затратах. Дополнительная верификация численных данных для одного из фильтров проводилась с привлечением еще одного численного подхода – МКР во временной области.

Результаты численного моделирования подтвердили перспективность использования ПКР для реализации СВЧ-фильтров, АЧХ которых в полосе пропускания формируется двумя высокодобротными резонансами, соответствующими низшими H -колебаниям ПКР. Рассмотренные структуры (см. рис. 2 и 4) являются предельно простыми и не содержат элементов подстройки в виде дополнительных штырей, применение которых в ряде случаев позволяет улучшить параметры СВЧ-устройств [7]. Одним из перспективных направлений дальнейших исследований СВЧ-фильтров на концентрических резонаторах является анализ таких структур с элементами подстройки.

Список литературы

1. СВЧ-фильтры и мультиплексоры для систем космической связи / под ред. В. П. Мещанова. М.: Радиотехника, 2017. 256 с.
2. Cameron R. J., Kudzia C. M., Mansour R. R. *Microwave Filters for Communication Systems*. New York: Wiley, 2007. 772 p.
3. Broun T. M. *Satellite communication payload and system*. Boston: Wiley-IEEE, 2012. 400 p.
4. Doumanis E., Goussetis G., Kosmopoulos S. *Filter Design for Satellite Communications*. Boston: Artech House, 2015. 203 p.
5. 3D Printed Filter based on Helical Resonators with Variable Width / X. Shang, J. Li, C. Guo, M. J. Lancaster, J. Xu // Proc. of the IEEE MTT-S Intern. Symp. Honolulu, USA, 2017. P. 1587–1590. doi: 10.1109/MWSYM.2017.8058936
6. Flexible and Efficient Computer-Aided Design Tool for Advanced Comb-Line Rectangular Waveguide Filters / A. San-Blas, A. Vidal, A. A. Muller, P. Soto, F. Mira, F. J. Perez-Soler, B. Gimeno, V. E. Boria // Intern. J. of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2015. Vol. 25, № 8. P. 696–708. doi: 10.1002/mmce.20908
7. On the Alingment of Low-Fidelity and High-Fidelity Simulation Spaces for the Design of Microwave Waveguide Filters / J. Ossorio, J. C. Melgarejo, V. E. Boria, M. Guglielmi, J. W. Bandler // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2018. Vol. 66, № 12. P. 5183–5196. doi: 10.1109/TMTT.2018.2871022
8. Wideband Generalized Admittance Matrix Representation for the Analysis and Design of Waveguide Filters with Coaxial Excitation / F. Mira, A. A. San Blas, V. E. Boria, L. J. Rogla, B. Gimeno // Radio Science. 2013. Vol. 48, № 1. P. 50–60. doi: 10.1002/rds.20013
9. Bastioli S., Snyder R. V., Macchiarella G. Design of In-Line Filters with Strongly Coupled Resonator Triplet // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2018. Vol. 66, № 12. P. 5585–5592. doi: 10.1109/TMTT.2018.2867004
10. Bastioli S., Marcaccioli L., Sorrentino R. Compact Dual-Mode Rectangular Waveguide Filters using Square Ridge Resonators // Intern. J. of Microwave and Wireless Technologies. 2009. Vol. 1, № 4. P. 241–247. doi: 10.1017/S1759078709990286
11. Compact Ridge Waveguide Filters with Arbitrary Placed Transmission Zeros using Nonresonanting Nodes / M. M. Fahmi, J. A. Ruiz-Cruz, R. R. Mansour, K. A. Zaki // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2009. Vol. 57, № 12. P. 3354–3361. doi: 10.1109/TMTT.2009.2034423
12. Давидович М. В. Итерационные методы решения задач электродинамики. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2014. 240 с.
13. Комаров В. В., Бушанский С. К. СВЧ-фильтры на объемных концентрических резонаторах // Радиотехника. 2018. № 8. С. 140–143. doi: 10.18127/j00338486-201808-26
14. Design of Wideband Bandpass Filter using Quadruple-Mode Rectangular Cavity Resonator / Y.-M. Wu, S.-Y. Zhou, J.-Y. Lin, L. W. Zhou, S.-W. Wong, L. Zhu, Q.-X. Chu // Proc. of the IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation. 2017, Xian, China, 16–19 Oct. 2017. P. 1–3. doi: 10.1109/APCAP.2017.8420607
15. Комаров В. В., Бушанский С. К. Добротность концентрических резонаторов // Радиотехника. 2019. № 7. С. 32–37. doi: 10.18127/j00338486-201907(10)-06
16. Шаров Г. А. Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн. М.: Горячая Линия – Телеком, 2016. 640 с.

Информация об авторах

Комаров Вячеслав Вячеславович – доктор технических наук (2007), профессор (2007) кафедры "Радиоэлектроника и телекоммуникации" Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А. Автор 150 научных работ. Сфера научных интересов – прикладная и вычислительная электродинамика, математическое моделирование и компьютерное проектирование функциональных устройств микроволновой и терагерцевой техники, исследование процессов взаимодействия электромагнитных волн с различными материалами. Адрес: СГТУ им. Гагарина Ю. А., ул. Политехническая, д. 77, Саратов, 410054, Россия
E-mail: vyacheslav.komarov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2345-086X>

Бушанский Сергей Константинович – магистр по направлению "Управление в технических системах" (2016), аспирант Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А. по кафедре радиоэлектроники и телекоммуникаций. Автор восьми научных публикаций. Сфера научных интересов – разработка и проектирование устройств микроволновой техники, численные методы анализа электромагнитных полей. Адрес: СГТУ им. Гагарина Ю. А., ул. Политехническая, д. 77, Саратов, 410054, Россия
E-mail: 8908_07@mail.ru

References

1. *SVCh-fil'try i multipleksory dlya sistem kosmicheskoi svyazi* [Microwave Filters and Multiplexers for Space Communications Systems], ed. by V. P. Meshchanov. Moscow, *Radiotekhnika*, 2017, 256 p. (In Russ.)
2. Cameron R. J., Kudsia C. M., Mansour R. R. *Microwave Filters for Communication Systems*. New York, Wiley, 2007, 772 p.
3. Broun T. M. *Satellite Communication Payload and System*. Boston, Wiley-IEEE, 2012, 400 p.
4. Doumanis E., Goussetis G., Kosmopoulos S. *Filter Design for Satellite Communications*. Boston, Artech House, 2015, 203 p.
5. Shang X., Li J., Guo C., Lancaster M. J., Xu J. 3D Printed Filter based on Helical Resonators with Variable Width. Proc. of the IEEE MTT-S Intern. Symp. Honolulu, USA, 2017, pp. 1587–1590. doi: 10.1109/MWSYM.2017.8058936
6. San-Blas A., Vidal A., Muller A. A., Soto P., Mira F., Perez-Soler F. J., Gimeno B., Boria V. E. Flexible and Efficient Computer-Aided Design Tool for Advanced Comb-Line Rectangular Waveguide Filters. Intern. J. of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2015, vol. 25, no. 8, pp. 696–708. doi: 10.1002/mmce.20908
7. Ossorio J., Melgarejo J. C., Boria V. E., Guglielmi M., Bandler J. W. On the Alingment of Low-Fidelity and High-Fidelity Simulation Spaces for the Design of Microwave Waveguide Filters. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2018, vol. 66, no. 12, pp. 5183–5196. doi: 10.1109/TMTT.2018.2871022
8. Mira F., San Blas A. A., Boria V. E., Rogla L. J., Gimeno B. Wideband Generalized Admittance Matrix Representation for the Analysis and Design of Waveguide Filters with Coaxial Excitation. Radio Science. 2013, vol. 48, no. 1, pp. 50–60. doi: 10.1002/rds.20013
9. Bastioli S., Snyder R. V., Macchiarella G. Design of In-Line Filters with Strongly Coupled Resonator Triplet. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2018, vol. 66, no. 12, pp. 5585–5592. doi: 10.1109/TMTT.2018.2867004
10. Bastioli S., Marcaccioli L., Sorrentino R. Compact Dual-Mode Rectangular Waveguide Filters using Square Ridge Resonators. Intern. J. of Microwave and Wireless Technologies. 2009, vol. 1, no. 4, pp. 241–247. doi: 10.1017/S1759078709990286
11. Fahmi M. M., Ruiz-Cruz J. A., Mansour R. R., Zaki K. A. Compact Ridge Waveguide Filters with Arbitrary Placed Transmission Zeros using Nonresonating Nodes. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2009, vol. 57, no. 12, pp. 3354–3361. doi: 10.1109/TMTT.2009.2034423
12. Davidovich M. V. *Iteratsionnye metody resheniya zadach elektrodinamiki* [Iterative methods for solving electrodynamics problems]. Saratov, *Izd-vo Sarat. un-ta*, 2014, 240 p. (In Russ.)
13. Komarov V. V., Bushanskiy S. K. Microwave Filters on Concentric Cavity Resonators. Radioengineering. 2018, no. 8, pp. 140–143. doi: 10.18127/j00338486-201808-26 (In Russ.)
14. Wu Y.-M., Zhou S.-Y., Lin J.-Y., Zhou L. W., Wong S.-W., Zhu L., Chu Q.-X. Design of Wideband Bandpass Filter using Quadruple-Mode Rectangular Cavity Resonator. Proc. of the IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation. 2017, Xian, China, 16–19 Oct., 2017, pp. 1–3. doi: 10.1109/APCAP.2017.8420607
15. Komarov V. V., Bushanskiy S. K. The Quality Factor of Concentric Resonators. Radioengineering. 2019, no. 7, pp. 32–37. doi: 10.18127/j00338486-201907(10)-06
16. Sharov G. A. *Volnovodnye ustroystva santimetrovykh i millimetrovykh voln* [Waveguide Devices of Centimeter and Millimeter Waves]. Moscow, *Goryachaya Liniya – Telekom*, 2016, 640 p. (In Russ.)

Information about the authors

Vyacheslav V. Komarov, Dr. Sci. (Eng.) (2007), Professor (2007) of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. The author of 150 scientific publications. Area of expertise: applied and computational electrodynamics; mathematical modeling and computer-aided design of functional devices of microwave and terahertz technology; study of the processes of interaction of electromagnetic waves with various materials.

Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya Str., Saratov 410054, Russia
E-mail: vyacheslav.komarov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2345-086X>

Sergey K. Bushanskiy, Master on management in technical systems (2016), Postgraduate Student of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov on department of Radio Electronics and Telecommunications. The author of 8 scientific publications. Area of expertise: development and design of microwave devices; numerical methods for the analysis of electromagnetic fields.

Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya Str., Saratov 410054, Russia
E-mail: 8908_07@mail.ru