

Волноводные четвертьволновые поперечные гребневые резонаторы на квази-ТЕМ-волне и фильтры на их основе

А. А. Соркин, А. В. Минаков, Ю. П. Саломатов

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

✉ alexandr.sorkin.781@mail.ru

Аннотация

Введение. В современных системах связи требования к массогабаритным и частотным характеристикам фильтров во входных и выходных трактах антенно-фидерных устройств (АФУ) становятся все жестче. С учетом этого исследован поперечный волноводный гребневый резонатор, но не полуволновый, а четвертьволновый, что позволяет сократить ширину и длину фильтра. Показано влияние различных параметров резонатора на его резонансную частоту. Рассчитана зависимость нагруженной добротности от высоты поперечного гребневого четвертьволнового резонатора. Рассчитанные волноводные фильтры на резонаторах данного типа показывают возможность формирования полюсов затухания как выше, так и ниже полосы пропускания.

Цель работы. Исследование различных типов фильтров на гребневых четвертьволновых резонаторах, а также оценка полосы заграждения по уровню и ширине.

Материалы и методы. Численные исследования проведены методом конечных элементов (finite element method – FEM) и методом конечных разностей во временной области (finite difference in the time domain – FDTD).

Результаты. Проведено моделирование различных типов пяти- и десятизвенных фильтров на гребневых четвертьволновых резонаторах. Установлено, что пятизвенные фильтры в зависимости от расположения резонаторов могут формировать полюсы затухания как выше полосы пропускания, так и ниже. Десятизвенный фильтр на поперечных гребневых четвертьволновых резонаторах на приемных частотах X -диапазона (7.25...7.75 ГГц) обеспечивает вносимые потери не выше 1.2 дБ, при этом уровень ослабления в диапазоне частот передачи (7.9...8.4 ГГц) составляет не менее 80 дБ.

Заключение. Применение фильтров на гребневых четвертьволновых резонаторах позволяет существенно сократить длину и улучшить массогабаритные характеристики при сохранении высокого уровня ослабления в полосе заграждения.

Ключевые слова: поперечный гребневый резонатор, волноводный фильтр, нагруженная добротность, полюс затухания

Для цитирования: Соркин А. А., Минаков А. В., Саломатов Ю. П. Волноводные четвертьволновые поперечные гребневые резонаторы на квази-ТЕМ-волне и фильтры на их основе // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 3. С. 95–105.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-3-95-105

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО "Сибирский федеральный университет" (номер FSRZ-2023-0008).

Статья поступила в редакцию 03.10.2024; принята к публикации после рецензирования 30.11.2024; опубликована онлайн 30.06.2025



Waveguide Quarter-Wave Transverse Ridge Resonators on Quasi-TEM Wave and Filters on Their Basis

Alexandr A. Sorkin, Andrey V. Minakov, Yury P. Salomatov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

✉ alexandr.sorkin.781@mail.ru

Abstract

Introduction. In modern communication systems, the requirements imposed on the weight, size, and frequency characteristics of filters in the input and output paths of antenna-feeder devices (AFD) are becoming increasingly stringent. Taking this into account, we investigate a transverse waveguide ridge resonator of a quarter-wave structure. The use of a quarter-wave resonator, rather than a half-wave structure, allows the width and length of the filter to be reduced. The influence of various resonator parameters on its resonant frequency is demonstrated. The dependence of the loaded Q-factor on the height of the transverse ridge quarter-wave resonator is calculated. The calculated waveguide filters on resonators of this type offer the possibility of forming attenuation poles both above and below the passband.

Aim. Investigation of various types of filters on ridge quarter-wave resonators, as well as evaluation of the rejection band by level and by width.

Materials and methods. Numerical studies were carried out using the methods of finite elements (FEM) and finite difference in the time domain (FDTD).

Results. Simulation of various types of five- and ten-order filters on ridge quarter-wave resonators was performed. Five-order filters, depending on the arrangement of the resonators, are capable of forming attenuation poles both above and below the passband. A ten-order filter on transverse ridge quarter-wave resonators at receiving frequencies of the X-band (7.25...7.75 GHz) provides insertion losses of no more than 1.2 dB, while the attenuation level in the transmission frequency range (7.9...8.4 GHz) is at least 80 dB.

Conclusion. The use of filters on ridge quarter-wave resonators ensures a significant reduction in length and improvement in weight and size characteristics, while maintaining a high level of attenuation in the stop band.

Keywords: transverse ridge resonator, waveguide filter, loaded Q, attenuation pole

For citation: Sorkin A. A., Minakov A. V., Salomatov Yu. P. Waveguide Quarter-Wave Transverse Ridge Resonators on Quasi-TEM Wave and Filters on Their Basis. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 3, pp. 95–105.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-3-95-105

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. The reported study was funded by the Ministry of Education and Science of Russian Federation, FSRZ-2023-0008.

Submitted 03.10.2024; accepted 16.03.2025; published online 30.04.2025

Введение. В современных спутниковых системах связи требуются входные фильтры с малыми потерями и малыми габаритными размерами. В X-диапазоне частоты приема и передачи находятся очень близко (частоты приема 7.25...7.75 ГГц, либо укороченная полоса пропускания 7.25...7.55 ГГц частоты передачи: 7.9...8.4 ГГц). Для данного диапазона требуется фильтр с высокой селективностью и при этом компактный. Для получения высокой селективности приемного фильтра требуется

формирование полюсов затухания на частотах передачи. Одним из способов формирования несимметричной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) является применение синглетов, которые обеспечивают дополнительную связь между входом и выходом [1]. Синглеты работают на моде H_{201} или H_{301} . В фильтрах на полуволновых резонаторах можно обеспечивать связи между несоседними резонаторами [2]. Однако такие фильтры имеют в составе полуволновые резонаторы на моде H_{102} или

H_{103} , что увеличивает габаритные размеры фильтра. Формировать полюса затухания можно и на двухмодовых или одномодовых ТМ-резонаторах [3–7]. Фильтры на двухмодовых резонаторах обычно имеют более сложную настройку, требуют минимальных допусков и реализуют полосы пропускания до 10 %, хотя при этом обладают хорошими массогабаритными характеристиками. В волноводной технике широко известны фильтры на гофрированных волноводах [8–10], на таких структурах в основном делают фильтры нижних частот (ФНЧ) с низкими потерями и широкими полосами заграждения [11], известны ФНЧ на гофрированных волноводах без входных трансформаторов [12]. Использование в фильтрах резонаторов на диафрагмах при сохранении высокой селективности позволяет уменьшить общую длину [13, 14].

Также распространение получили фильтры на гребневых полуволновых одно- и двухмодовых резонаторах, позволяющие увеличивать крутизну скатов АЧХ [15–17]. Задачу создания фильтра с малыми потерями в X -диапазоне предлагается решить с помощью фильтра на гребневых четвертьволновых резонаторах. Для этого требуется исследовать гребневый четвертьволновый резонатор и влияние его размеров на добротность и частотные характеристики. Следует учесть, что резонаторы в фильтрах могут располагаться по-разному друг относительно друга как по широкой стенке волновода, так и по узкой.

Материалы и методы. Численные исследования проведены методом конечных элементов (finite element method – FEM) и методом

конечных разностей во временной области (final difference in the time domain – FDTD).

Результаты. Волноводный четвертьволновый поперечный гребневый резонатор. Для рассмотрения влияния различных параметров волноводного четвертьволнового поперечного гребневого резонатора на частотные характеристики введем их обозначения согласно рис. 1: H – высота гребня; L – длина резонатора; W – ширина резонатора; A – ширина волновода, в котором расположен резонатор; все значения будут приведены в миллиметрах. В данном типе резонаторов ток течет преимущественно по верхней грани гребня, поэтому резонатор работает на квази-ТЕМ-волне. Таким образом, длина четвертьволнового резонатора близка к четверти длины волны в свободном пространстве на резонансной частоте [17].

При увеличении ширины волновода, в котором размещается данный резонатор, резонансная частота и полюс затухания смещаются вниз (рис. 2, *a*, *b*), при этом постоянными являются параметры $H = 10.6$ мм, $L = 10$ мм и $W = 2$ мм. В данном случае при увеличении ширины волновода резонансная частота смещается вниз из-за уменьшения входной и выходной индуктивности, возникающей при переходе от сечения подводящих волноводов к волноводу зауженного сечения, в котором расположен гребневый резонатор.

Емкость между верхней гранью гребня и широкой стенкой волновода можно изменять высотой самого гребня, при этом уменьшение высоты гребня приводит к смещению резонансной частоты и полюса затухания вверх

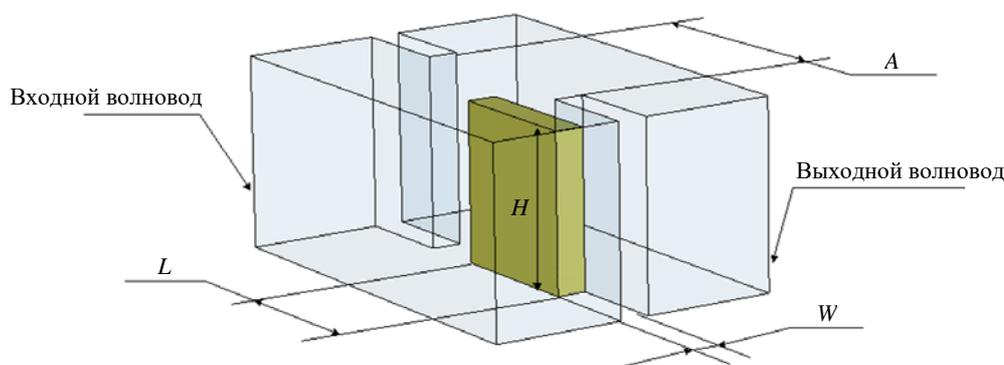


Рис. 1. Параметры четвертьволнового поперечного гребневого резонатора с подводящими волноводами стандартного сечения

Fig. 1. Parameters of a quarter-wave transverse ridge resonator with standard cross-section feeder waveguides

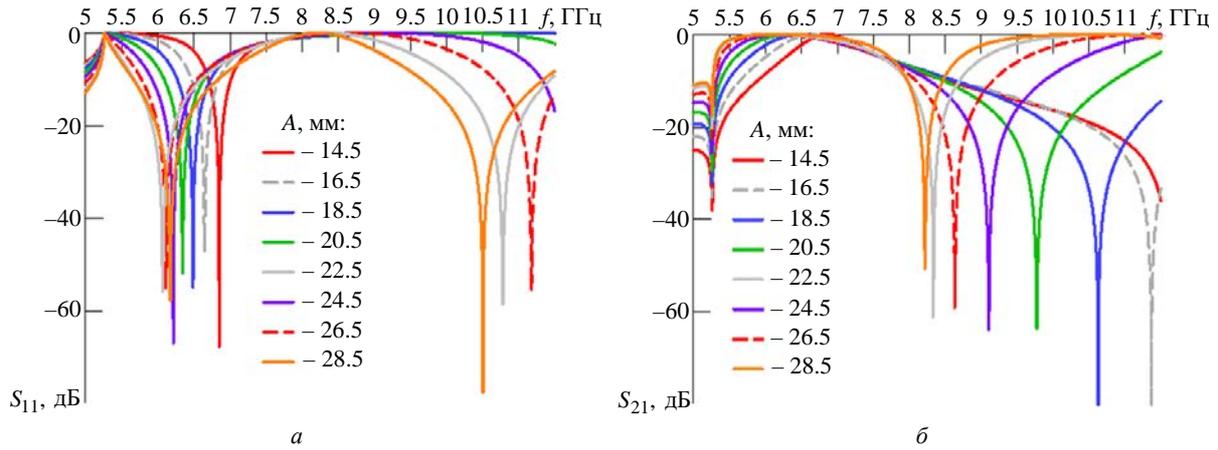


Рис. 2. Зависимость возвратных потерь S_{11} (а) и коэффициента передачи S_{21} (б) волноводного четвертьволнового поперечного гребневого резонатора от ширины волновода

Fig. 2. Dependence of return loss S_{11} (a) and transmission coefficient S_{21} (б) of waveguide quarter-wave transverse ridge resonator on the waveguide width

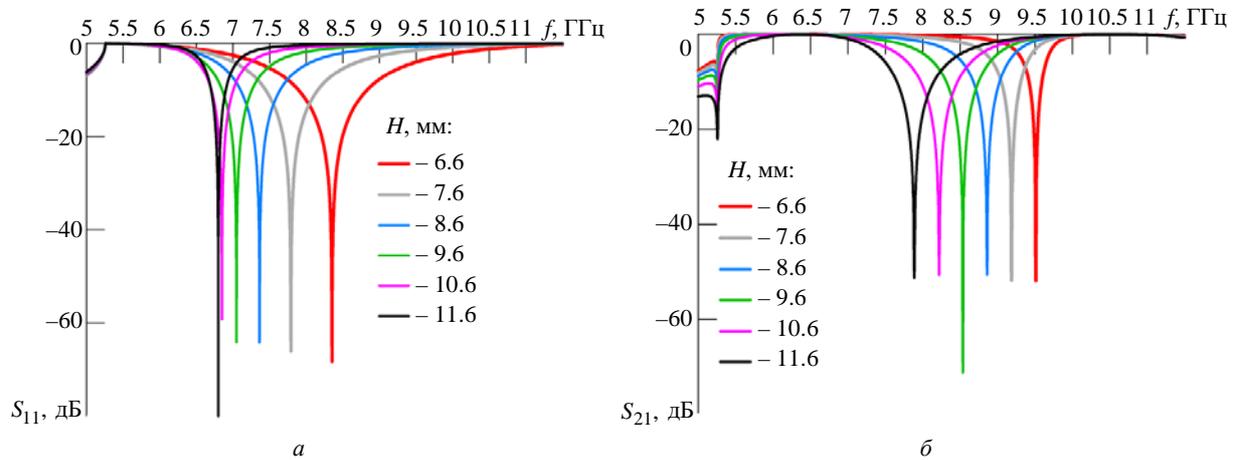


Рис. 3. Зависимость возвратных потерь S_{11} (а) и коэффициента передачи S_{21} (б) волноводного четвертьволнового поперечного гребневого резонатора от высоты гребня

Fig. 3. Dependence of return losses S_{11} (a) and transmission coefficient S_{21} (б) of a waveguide quarter-wave transverse ridge resonator on the ridge height

(рис. 3, а, б), при этом постоянными являются параметры $A = 14.25$ мм, $L = 10$ мм и $W = 2$ мм.

Изменение длины резонатора L будет изменять емкость между верхней гранью гребня и широкой стенкой волновода, увеличение параметра L будет приводить к смещению резонансной частоты вниз (рис. 4, а, б), при этом постоянными являются параметры $A = 28.5$ мм, $H = 11.6$ мм и $W = 2$ мм.

Изменение ширины резонатора W будет изменять емкость между верхней гранью гребня и широкой стенкой волновода, увеличение параметра W будет приводить к незначительному смещению резонансной частоты вниз (рис. 5, а, б),

при этом постоянными являются параметры $A = 28.5$ мм, $L = 10$ мм и $H = 11.6$ мм.

Важным параметром любого резонатора является добротность, которая определяет вносимые потери в полосе пропускания. На рис. 6 показана зависимость нагруженной добротности волноводного четвертьволнового гребневого резонатора от высоты гребня H , из которой видно, что уменьшение высоты гребня приводят к увеличению нагруженной добротности, а значит, к уменьшению вносимых потерь в полосе пропускания, при этом постоянными являются параметры $A = 16.2$ мм, $L = 10$ мм и $W = 2$ мм. Расчет добротности проводился с

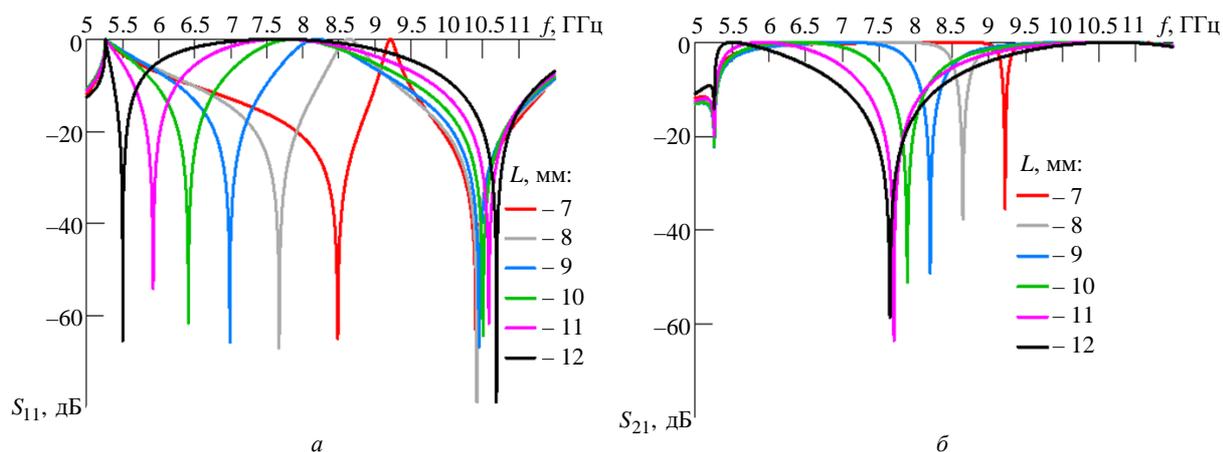


Рис. 4. Зависимость возвратных потерь S_{11} (а) и коэффициента передачи S_{21} (б) волноводного четвертьволнового резонатора от длины гребня

Fig. 4. Dependence of return losses S_{11} (a) and transmission coefficient S_{21} (б) of a waveguide quarter-wave resonator on the ridge length

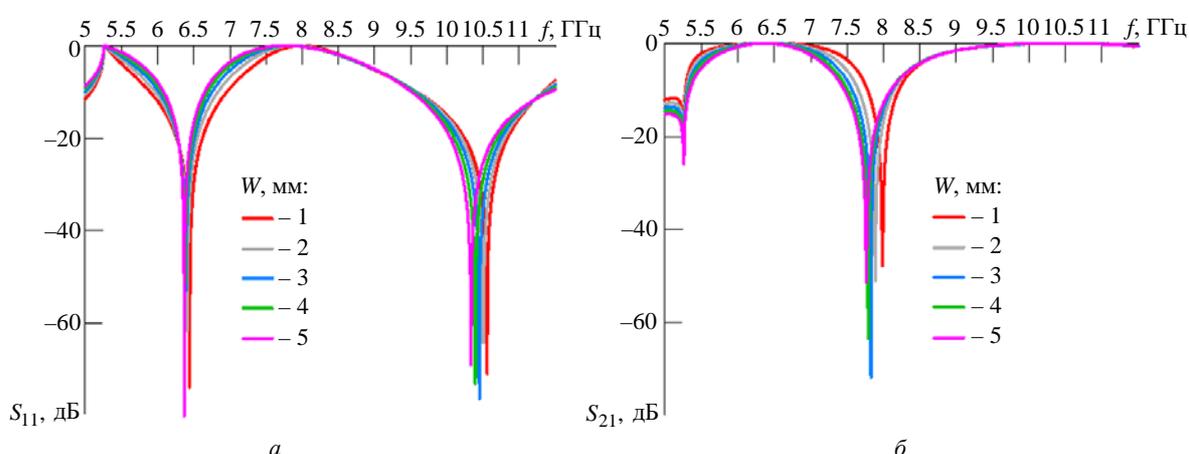


Рис. 5. Зависимость возвратных потерь S_{11} (а) и коэффициента передачи S_{21} (б) волноводного четвертьволнового поперечного гребневого резонатора от ширины гребня

Fig. 5. Dependence of return loss S_{11} (a) and transmission coefficient S_{21} (б) of waveguide quarter-wave transverse ridge resonator on the ridge width

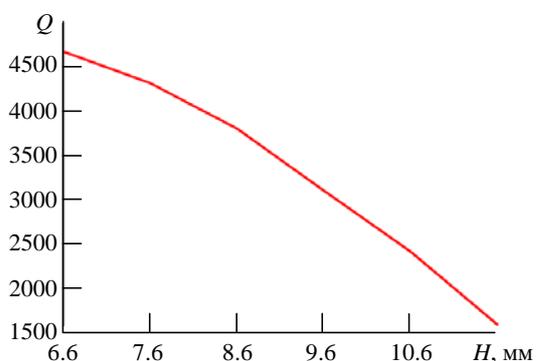


Рис. 6. Зависимость нагруженной добротности волноводного четвертьволнового гребневого резонатора от высоты гребня

Fig. 6. Dependence of the loaded quality factor of a waveguide quarter-wave ridge resonator on the ridge height

помощью программы CSTMWS с использованием приложения "потери и добротность" (loss and Q), используемый материал – алюминий.

Фильтры на волноводных четвертьволновых поперечных гребневых резонаторах. Были исследованы несколько типов фильтров на волноводных четвертьволновых поперечных гребневых резонаторах, различие заключается в расположении резонаторов. Моделирование всех фильтров проводилось с помощью программы CST MWS методом расчета в частотной области. В фильтре первого типа резонаторы располагаются противоположно, соседние резонаторы подключаются к противоположным узким стенкам волновода, причем

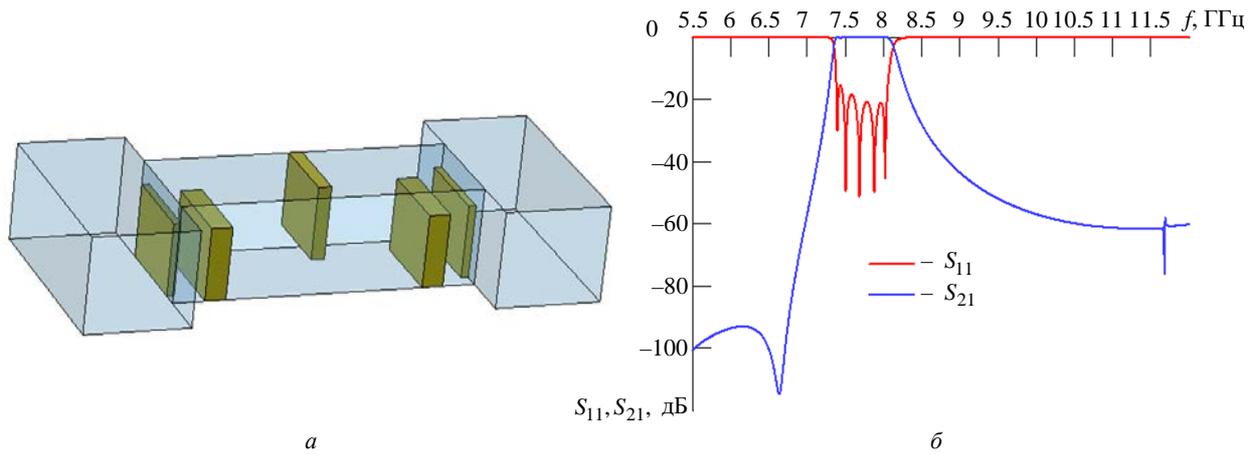


Рис. 7. Электродинамическая модель пятизвенного фильтра первого типа (а) и его частотные характеристики (б)
 Fig. 7. Electrodynamic model of a five-order filter of the first type (a) and its frequency characteristics (b)

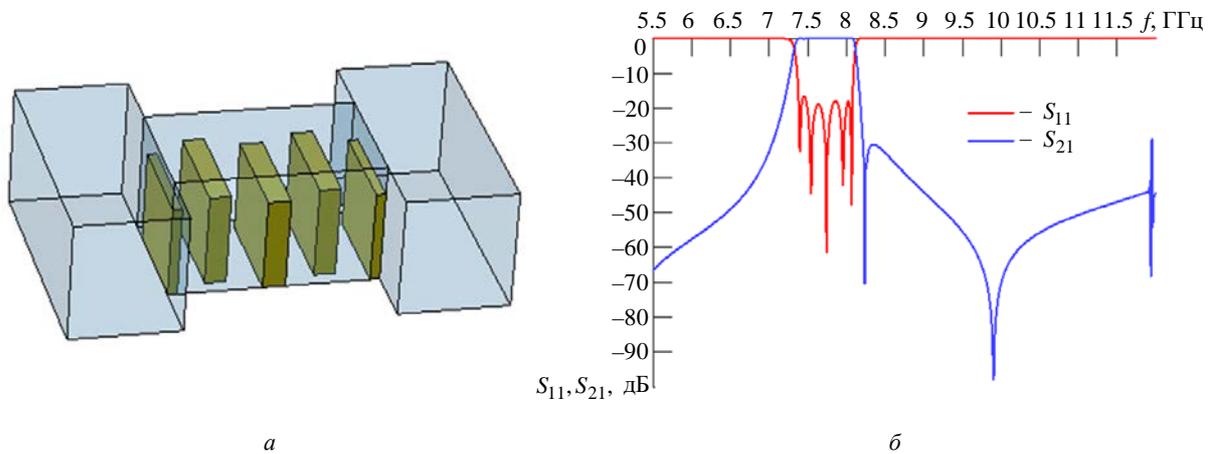


Рис. 8. Электродинамическая модель пятизвенного фильтра второго типа (а) и его частотные характеристики (б)
 Fig. 8. Electrodynamic model of a five-order filter of the second type (a) and its frequency characteristics (b)

Табл. 1. Геометрические размеры волноводных пятизвенных фильтров на четвертьволновых поперечных гребневых резонаторах

Tab. 1. Geometric dimensions of waveguide five-order filters on quarter-wave transverse ridge resonators

№	Параметр, мм											
	A	L ₁	L ₂	L ₃	S ₁	S ₂	W ₁	W ₂	W ₃	H ₁	H ₂	H ₃
1	14	10.75	11.45	11.95	12.45	3.35	1.8	2.85	1	9.5	9.5	9.5
2	14	12.4	12.25	11.65	3.7	3.5	2.6	2.45	1.1	9.6	9.6	9.6
3	13.3	12.6	12.65	10.7	9.1	9	1.15	1.05	1	9.8	9.8	9.8

центральный резонатор отличается тем, что подключен к другой широкой стенке в отличие от остальных. Данное расположение резонаторов позволяет сформировать полюс затухания ниже полосы пропускания. Электродинамическая модель фильтра первого типа и ее частотные характеристики представлены на рис. 7, а, б. Размеры фильтра приведены в табл. 1 под номером 1. Длина фильтра 41.1 мм.

Во втором типе резонаторы располагаются противоположно, соседние резонаторы под-

ключаются к противоположным узким стенкам волновода, при этом все резонаторы подключены к одной и той же широкой стенке волновода. Данное расположение резонаторов позволяет сформировать полюс затухания выше полосы пропускания. Электродинамическая модель фильтра второго типа и ее частотные характеристики представлены на рис. 8, а, б. Размеры фильтра приведены в табл. 1 под номером 2. Длина фильтра 24.1 мм.

Третий тип фильтров содержит сонаправленные резонаторы, которые подключаются

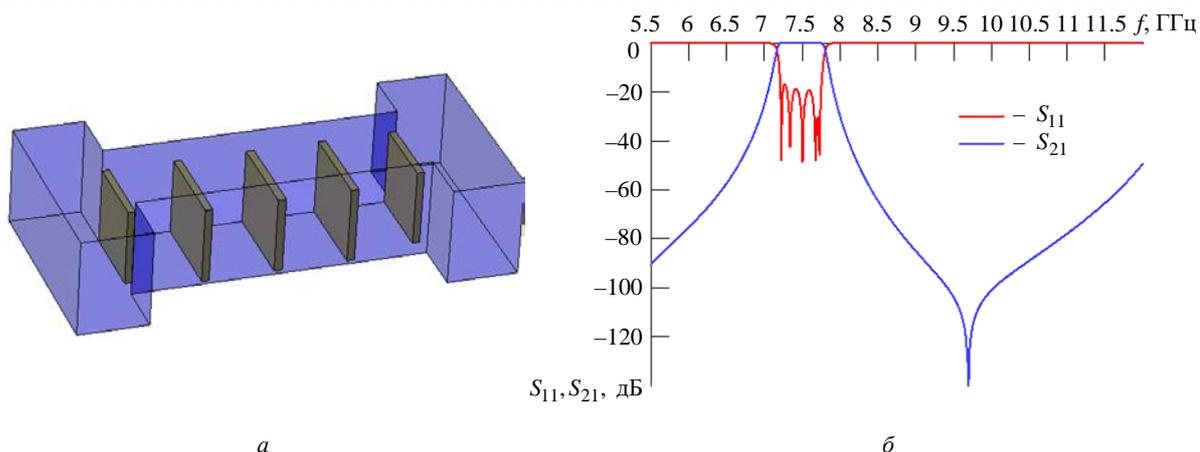


Рис. 9. Электродинамическая модель пятизвенного фильтра третьего типа (а) и его частотные характеристики (б)
 Fig. 9. Electrodynamics model of a five-order filter of the third type (a) and its frequency characteristics (b)

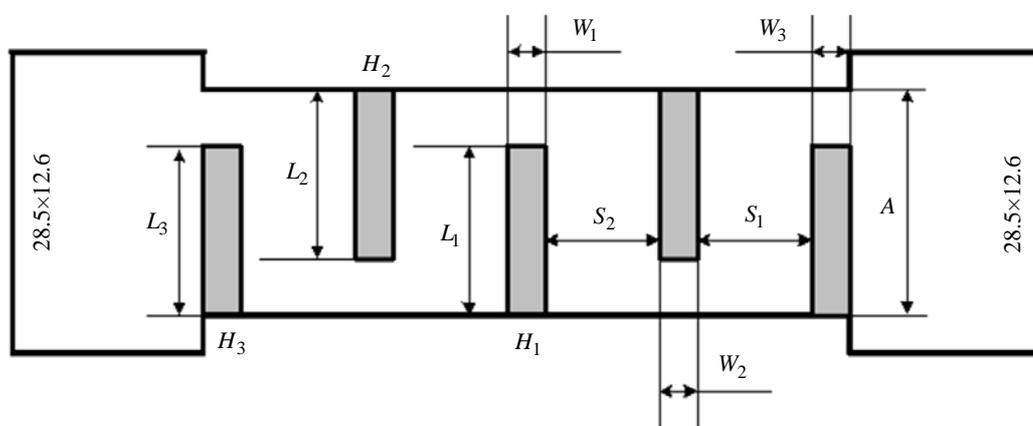


Рис. 10. Параметризованная модель пятизвенного волноводного фильтра на четвертьволновых поперечных гребневых резонаторах

Fig. 10. Parameterized model of a five-order waveguide filter on quarter-wave transverse ridge resonators

к одной и той же узкой стенке волновода. Электродинамическая модель фильтра третьего типа и ее частотные характеристики представлены на рис. 9, а, б. Размеры фильтра приведены в табл. 1 под номером 3. Длина фильтра 41.45 мм.

Параметризованная модель пятизвенного фильтра приведена на рис. 10, но следует учитывать расположение резонаторов в зависимости от рассмотренных типов фильтра.

Следует отметить, что положение полюса затухания зависит от того, на какой частоте магнитный коэффициент связи k_L равен электрическому k_C . Определяется эта частота с помощью системы уравнений для связанных линий. Каждый из элементов системы связанных линий является четвертьволновым гребневым резонатором, поэтому число уравнений равно порядку фильтра.

Также были рассчитаны два десятизвенных фильтра. Один из фильтров имеет постоянную длину. Волноводные четвертьволновые поперечные гребневые резонаторы на квази-ТЕМ-волне и фильтры на их основе
 Waveguide Quarter-Wave Transverse Ridge Resonators on Quasi-TEM Wave and Filters on Their Basis

ширину, другой имеет расширение в некоторых областях межрезонаторных связей.

Первый тип десятизвенного фильтра содержит противонаправленные резонаторы, которые по очереди подключаются к разным узким стенкам волновода. Электродинамическая модель десятизвенного фильтра первого типа и ее частотные характеристики представлены на рис. 11, а, б. Размеры фильтра приведены в табл. 2 под номером 1. Длина фильтра 62.7 мм. Параметрическая модель приведена на рис. 13, а.

Фильтр из алюминия имеет полосу пропускания 7.25...7.75 ГГц, вносимые потери не более 1 дБ, возвратные потери $S_{11} \leq -15$ дБ, паразитная полоса пропускания находится выше 12 ГГц.

Второй тип десятизвенного фильтра содержит противонаправленные резонаторы, которые по очереди подключаются к разным узким стенкам волновода, при этом часть областей связи имеют расширение. Электродинамическая модель приведена на рис. 13, б.

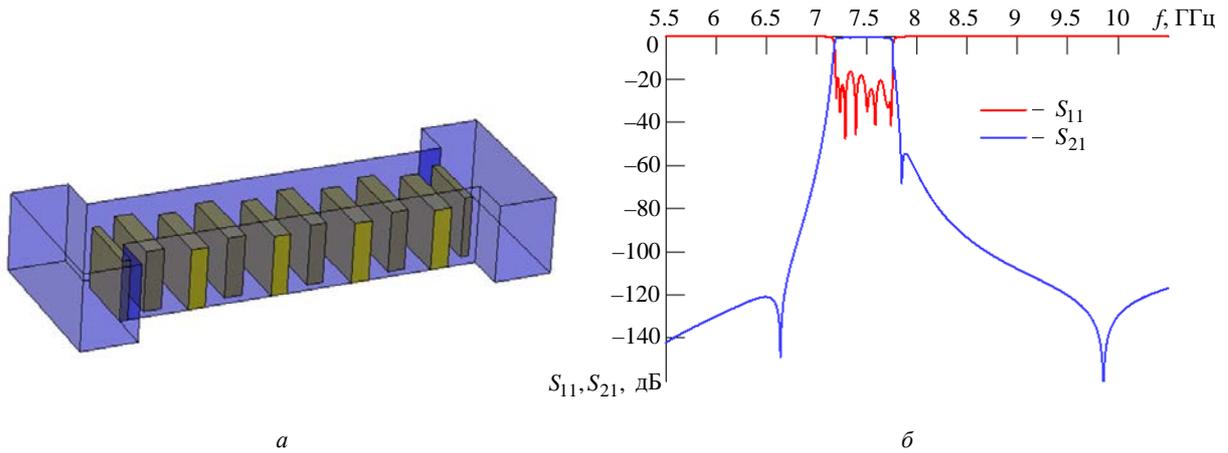


Рис. 11. Электродинамическая модель десятизвенного фильтра первого типа (а) и его частотные характеристики (б)
 Fig. 11. Electrodynamic model of a ten-order filter of the first type (a) and its frequency characteristics (b)

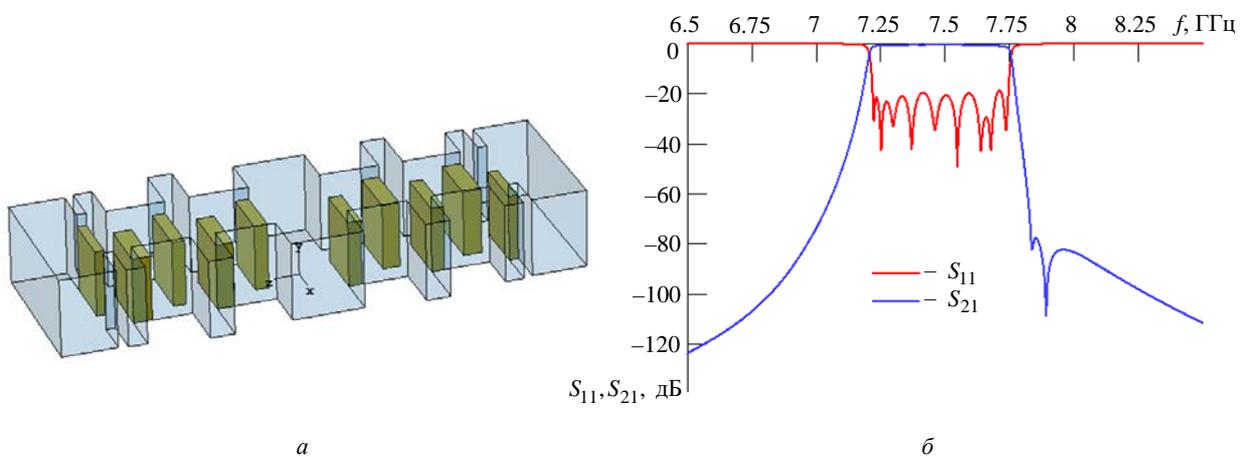


Рис. 12. Электродинамическая модель десятизвенного фильтра второго типа (а) и его частотные характеристики (б)
 Fig. 12. Electrodynamic model of a ten-order filter of the second type (a) and its frequency characteristics (b)

Табл. 2. Геометрические размеры волноводных десятизвенных фильтров на четвертьволновых поперечных гребневых резонаторах

Tab. 2. Geometrical dimensions of waveguide ten-order filters on quarter-wave transverse ridge resonators

Параметр, мм	Фильтр		Параметр, мм	Фильтр	
	№ 1	№ 2		№ 1	№ 2
A	14.2	15	H_3	9.8	10.6
L_1	12.55	9.9	H_4	9.8	10.6
L_2	12.4	10.25	H_5	9.8	10.6
L_3	12.6	10.6	S_1	4.3	12.4
L_4	12.45	10.25	S_2	4.25	5
L_5	11.85	9.85	S_3	4.2	4.2
W_1	2.8	2.3	S_4	3.9	4.7
W_2	3.1	2.95	S_5	3.5	3.25
W_3	2.95	2.2	A_1	-	29.4
W_4	3.1	3.2	A_2	-	14
W_5	1.4	1.6	A_3	-	32.95
H_1	9.8	10.6	A_4	-	14.2
H_2	9.8	10.6	A_5	-	30.5

ская модель десятизвенного фильтра второго типа и ее частотные характеристики представлены на рис. 12, а, б. Размеры фильтра приведены в табл. 2 под номером 2. Длина фильтра 71.2 мм. Параметрическая модель приведена на рис. 13, б.

Фильтр из алюминия имеет полосу пропускания 7.25...7.75 ГГц, вносимые потери не более 1.2 дБ, возвратные потери $S_{11} \leq -19$ дБ, паразитная полоса пропускания находится выше 12 ГГц.

Закключение. По результатам моделирования поперечного гребневого четвертьволнового резонатора можно сделать вывод о том, что увеличение высоты или длины гребня смещает резонансную частоту вниз, увеличение ширины гребня незначительно смещает резонансную частоту вниз. Проведено моделирование трех типов пятизвенных фильтров на поперечных гребневых четвертьволновых резонаторах, резонаторы размещаются в волноводе зауженного сечения. Если соседние резонаторы подключены к разным уз-

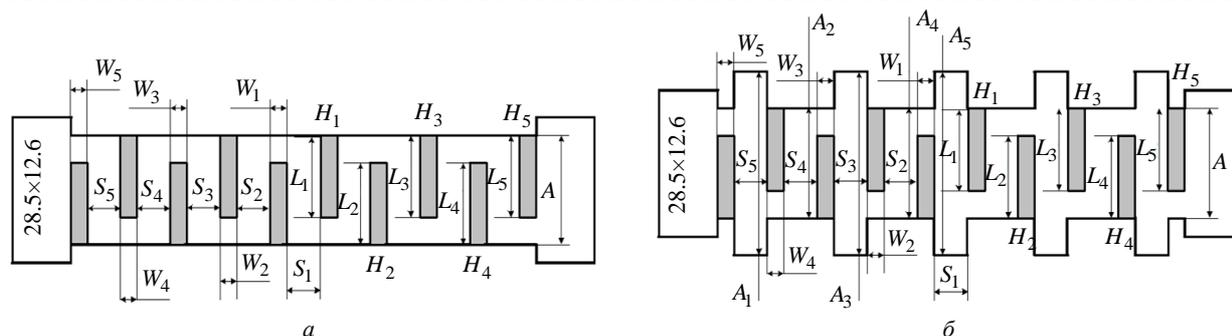


Рис. 13. Параметрическая модель десятизвенного фильтра: *a* – первого типа; *б* – второго типа

Рис. 13. Parameterized model of a ten-order waveguide filter: *a* – first type; *б* – second type

ким стенкам волновода, а центральный резонатор подключен к другой широкой стенке, то полюс затухания формируется ниже полосы пропускания. Если все резонаторы подключены к одной и той же широкой стенке, то формируются два полюса затухания выше полосы пропускания. Если соседние резонаторы подключены к одной и той же узкой стенке, то формируется один полюс затухания выше полосы пропускания. Также промоделированы два десятизвенных фильтра на четвертьволновых резонаторах из алюминия. В первом фильтре резонаторы расположены в волноводе зауженного сечения, при этом все резонаторы подключены к одной и той же широ-

кой стенке, а соседние резонаторы подключены к разным узким стенкам. В таком фильтре формируются два полюса затухания, один ниже полосы пропускания, другой – выше. Вносимые потери фильтра не более 1 дБ, возвратные потери составили не менее 15 дБ. Другой десятизвенный фильтр содержит противонаправленные резонаторы, подключенные по очереди к разным стенкам волновода, при этом некоторые области связи имеют расширение. В таком фильтре формируются два близко расположенных друг к другу полюса затухания выше полосы пропускания. Вносимые потери такого фильтра не более 1.2 дБ, возвратные потери составили не менее 19 дБ.

Список литературы

1. Design of Waveguide Filters with Cascaded Singlets Through a Synthesis-Based Approach / G. Macchiarella, G. G. Gentili, C. Tomassoni, S. Bastioli, R. V. Snyder // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2020. Vol. 68, № 6. P. 2308–2319. doi: 10.1109/TMTT.2020.2970414
2. Waveguide quadruplet diplexer for multi-beam satellite applications / J. Garcia, J. C. Melgarejo, S. Cogollos, V. Boria, M. Guglielmi // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 110116–110128. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3002818
3. Tang B., Yang Y., Zheng X. The Design of Linear TM Mode Filters with Nonresonating TE Mode // Intern. Conf. on Computer, Control and Robotics (ICCCR), Shanghai, China, 08–10 Jan. 2021. IEEE, 2021. P. 246–249. doi: 10.1109/ICCCR49711.2021.9349394
4. Compact broadband waveguide filter with wide spurious-free range based on mixed TM and combline resonators / C. Tomassoni, L. Pelliccia, F. Cacciamani, P. Vallerotonda, R. Sorrentino, J. Galdeano, C. Ernst // 47th European Microwave Conf. (EuMC), Nuremberg, Germany, 10–12 Oct. 2017. IEEE, 2017. P. 985–988. doi: 10.23919/EuMC.2017.8231011
5. Eskandari A., Kheiridoost A. Compact and narrow-band waveguide filters using TM dual-mode cavities for input multiplexer in communication satellites //

- 10th Intern. Symp. on Telecommunications (IST), Tehran, Iran, 15–17 Dec. 2020. IEEE, 2020. P. 234–239. doi: 10.1109/IST50524.2020.9345871
6. Very-compact waveguide bandpass filter based on dual-mode TM cavities for satellite applications in Ku-band / L. Pelliccia, C. Tomassoni, F. Cacciamani, P. Vallerotonda, R. Sorrentino, J. Galdeano, C. Ernst // 48th European Microwave Conf. (EuMC), Madrid, Spain, 23–27 Sept. 2018. IEEE, 2018. P. 93–96. doi: 10.23919/EuMC.2018.8541740
7. Bastioli S., Tomassoni C., Sorrentino R. A new class of waveguide dual-mode filters using TM and nonresonating modes // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2010. Vol. 58, iss. 12. P. 3909–3917. doi: 10.1109/TMTT.2010.2086068
8. Sensitivity Analysis of a 3-D Printed Low-Cost Compact Waveguide Low-Pass Filter / F. Teberio, A. Gomez-Torrent, I. Arregui, J. M. Percaz, I. Arnedo, M. Chudzik, T. Lopetegi, M. A. G. Laso // 46th European Microwave Conf. (EuMC), England, London, 4–6 Oct. 2016. P. 249–252. doi: 10.1109/EuMC.2016.7824325
9. Compact Broadband Waveguide Diplexer for Satellite Applications / F. Teberio, I. Arregui, M. Guglielmi, A. Gomez-Torrent, P. Soto, M. A. G. Laso, V. E. Boria // IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp., San Francisco, USA, 22–27 May 2016. P. 1–4. doi: 10.1109/MWSYM.2016.7540231

10. Chirping Techniques to Maximize the Power-Handling Capability of Harmonic Waveguide Low-Pass Filters / F. Teberio, I. Arregui, A. Gomez-Torrent, I. Arnedo, M. Chudzik, M. Zedler, F. Görtz, R. Jost, T. Lopetegi, M. A. G. Laso // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2016. Vol. 64, № 9. P. 2814–2823.
doi: 10.1109/TMTT.2016.2586479

11. Design of Wide Stopband for Waveguide Low-Pass Filter Based on Circuit and Field Combined Analysis / Y. Mingyu, W. Haiyang, Y. Tao, H. Biao, L. Hao, Z. Yihong, L. Tianming // IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2021. Vol. 31, № 11. P. 1199–1202.
doi: 10.1109/LMWC.2021.3087703

12. High-Performance Compact Diplexers for Ku/K-Band Satellite Applications / F. Teberio, I. Arregui, P. Soto, M. A. G. Laso, V. E. Boria, M. Guglielmi // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2017. Vol. 65, № 10. P. 3866–3876.
doi: 10.1109/TMTT.2017.2691773

13. Bahrami H., Fallahzadeh S., Tayarani M. Compact bandpass waveguide filter using CSRR // 3rd Intern. Congress on Advanced Electromagnetic Materials

in Microwaves and Optics, London, UK, 30 Aug.–4 Sept. 2009. P. 677–679.

14. Krutiev S. V., Zemlyakov V. V., Kleschenkov A. B. Synthesis of Elliptic Filter on Complex Resonant Diaphragms in Rectangular Waveguide // Intern. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), Saratov, Russia, 27–28 Sept. 2018. IEEE, 2018. P. 274–280.
doi: 10.1109/APEDE.2018.8542292

15. Sorrentino R., Pelliccia L. Filtri Passabanda Miniaturizzati in Guida d'Onda per Applicazioni Satellitari // Workshop Nazionale "La Componentistica Nazionale per lo Spazio: Statodell'arte, Sviluppi e Prospettive". ASI Roma, 18–20 Gennaio 2016. P. 1–44.

16. Bastioli S., Marcaccioli L., Sorrentino R. Waveguide Pseudoelliptic Filters Using Slant and Transverse Rectangular Ridge Resonators // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2008. Vol. 56, iss. 12. P. 3129–3136.

17. Beukman T. S. An efficient design workflow of a compact ridged waveguide filter // IEEE AFRICON, Cape Town, South Africa, 18–20 Sept. 2017. IEEE, 2017. P. 569–573.
doi: 10.1109/AFRCON.2017.8095544

Информация об авторах

Соркин Александр Анатольевич – магистр по направлению "Радиотехника" (2018, Сибирский федеральный университет), аспирант кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 16 научных работ. Сфера научных интересов – пассивные устройства и фильтры СВЧ.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: alexandr.sorkin.781@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7088-8373>

Минаков Андрей Викторович – доктор физико-математических наук (2021), доцент (2024), директор Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета. Автор 300 научных работ. Сфера научных интересов – численное моделирование; механика и электродинамика сплошных сред.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: aminakov@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1956-5506>

Саломатов Юрий Петрович – кандидат технических наук (1982), профессор (2013) кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 240 научных работ. Сфера научных интересов – ФАР; ЦФАР; квазиоптические антенны.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4306-226X>

References

1. Macchiarella G., Gentili G. G., Tomassoni C., Bastioli S., Snyder R. V. Design of Waveguide Filters with Cascaded Singlets Through a Synthesis-Based Approach. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2020, vol. 68, no. 6, pp. 2308–2319.
doi: 10.1109/TMTT.2020.2970414

2. Garcia J., Melgarejo J. C., Cogollos S., Boria V., Guglielmi M. Waveguide Quadruplet Diplexer for Multi-Beam Satellite Applications. IEEE Access. 2020, vol. 8, pp. 110116–110128.
doi: 10.1109/ACCESS.2020.3002818

3. Tang B., Yang Y., Zheng X. The Design of Linear TM Mode Filters with Nonresonating TE Mode. Intern. Conf. on Computer, Control and Robotics (ICCCR), Shanghai, China, 08–10 Jan. 2021. IEEE, 2021, pp. 246–249.

doi: 10.1109/ICCCR49711.2021.9349394

4. Tomassoni C., Pelliccia L., Cacciamani F., Vallero-tonda P., Sorrentino R., Galdeano J., Ernst C. Compact broadband waveguide filter with wide spurious-free range based on mixed TM and combline resonators. 47th European Microwave Conf. (EuMC), Nuremberg, Germany, 10–12 Oct. 2017. IEEE, 2017, pp. 985–988.
doi: 10.23919/EuMC.2017.8231011

5. Eskandari A., Kheiridoost A. Compact and Narrow-Band Waveguide Filters Using TM Dual-Mode Cavities for Input Multiplexer in Communication Satellites. 10th Intern. Symp. on Telecommunications (IST), Tehran, Iran, 15–17 Dec. 2020. IEEE, 2020, pp. 234–239.
doi: 10.1109/IST50524.2020.9345871

6. Pelliccia L., Tomassoni C., Cacciamani F., Val-lerotonda P., Sorrentino R., Galdeano J., Ernst C. Very-Compact Waveguide Bandpass Filter Based on Dual-Mode TM Cavities for Satellite Applications in Ku-band. 48th European Microwave Conf. (EuMC), Madrid, Spain, 23–27 Sept. 2018. IEEE, 2018, pp. 93–96. doi: 10.23919/EuMC.2018.8541740
7. Bastioli S., Tomassoni C., Sorrentino R. A New Class of Waveguide Dual-Mode Filters Using TM and Non-resonating Modes. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2010, vol. 58, iss. 12, pp. 3909–3917. doi: 10.1109/TMTT.2010.2086068
8. Teberio F., Gomez-Torrent A., Arregui I., Percz J. M., Arnedo I., Chudzik M., Lopetegi T., Laso M. A. G. Sensitivity Analysis of a 3-D Printed Low-Cost Compact Waveguide Low-Pass Filter. 46th European Microwave Conf. (EuMC), England, London, 4–6 Oct. 2016, pp. 249–252. doi: 10.1109/EuMC.2016.7824325
9. Teberio F., Arregui I., Guglielmi M., Gomez-Torrent A., Soto P., Laso M. A. G., Boria V. E. Compact Broadband Waveguide Diplexer for Satellite Applications. IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp., San Francisco, USA, 22–27 May 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/MWSYM.2016.7540231
10. Teberio F., Arregui I., Gomez-Torrent A., Arnedo I., Chudzik M., Zedler M., Görtz F., Jost R., Lopetegi T., Laso M. A. G. Chirping Techniques to Maximize the Power-Handling Capability of Harmonic Waveguide Low-Pass Filters. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2016, vol. 64, no. 9, pp. 2814–2823. doi: 10.1109/TMTT.2016.2586479
11. Mingyu Y., Haiyang W., Tao Y., Biao H., Hao L., Yihong Z., Tianming L. Design of Wide Stopband for Waveguide Low-Pass Filter Based on Circuit and Field Combined Analysis. IEEE Microwave and Wireless Components Lett. 2021, vol. 31, no. 11, pp. 1199–1202. doi: 10.1109/LMWC.2021.3087703
12. Teberio F., Arregui I., Soto P., Laso M. A. G., Boria V. E., Guglielmi M. High-Performance Compact Diplexers for Ku/K-Band Satellite Applications. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2017, vol. 65, no. 10, pp. 3866–3876. doi: 10.1109/TMTT.2017.2691773
13. Bahrami H., Fallahzadeh S., Tayarani M. Compact Bandpass Waveguide Filter Using CSRR. 3rd Intern. Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, London, UK, 30 Aug.–4 Sept. 2009, pp. 677–679.
14. Krutiev S. V., Zemlyakov V. V., Kleschenkov A. B. Synthesis of Elliptic Filter on Complex Resonant Diaphragms in Rectangular Waveguide. Intern. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), Saratov, Russia, 27–28 Sept. 2018. IEEE, 2018, pp. 274–280. doi: 10.1109/APEDE.2018.8542292
15. Sorrentino R., Pelliccia L. Filtri Passabanda Miniaturizzati in Guida d'Onda per Applicazioni Satellitari. Workshop Nazionale "La Componentistica Nazionale per lo Spazio: Statodell'arte, Sviluppi e Prospettive". ASI Roma, 18–20 Gennaio 2016, pp. 1–44.
16. Bastioli S., Marcaccioli L., Sorrentino R. Waveguide Pseudoelliptic Filters Using Slant and Transverse Rectangular Ridge Resonators. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2008, vol. 56, iss. 12, pp. 3129–3136.
17. Beukman T. S. An Efficient Design Workflow of a Compact Ridged Waveguide Filter. IEEE AFRI-CON, Cape Town, South Africa, 18–20 Sept. 2017. IEEE, 2017, pp. 569–573. doi: 10.1109/AFRCON.2017.8095544

Information about the authors

Alexander A. Sorkin, Master in "Radio Engineering" (2018, Siberian Federal University), Postgraduate student of the Department of Radio Engineering of Siberian Federal University. The author of 16 scientific publications. Area of expertise: passive devices and microwave filters.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: alexandr.sorkin.781@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7088-8373>

Andrey V. Minakov, Dr Sci. (Eng.) (2021), Associate Professor (2024), Director of the Institute of Engineering Physics and Radioelectronics of Siberian Federal University. The author of 300 scientific publications. Area of expertise: numerical modeling; mechanics and electrodynamics of continuous media.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: aminakov@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1956-5506>

Yury P. Salomatov, Cand. Sci. (Eng.) (1982), Professor (2013) of the Department of Radio Engineering of Siberian Federal University. The author of 240 scientific publications. Area of expertise: phased arrays; digital phased arrays; quast-optical antennas.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4306-226X>