

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Д.Г. Фомин¹, С.Н. Даровских², Н.В. Дударев³, И.И. Прокопов⁴, С.В. Дударев⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

¹ Fomin95@ya.ru

² darovskikhsn@susu.ru

³ dudarevnn@susu.ru

⁴ Prokopov174@mail.ru

⁵ asp20dsv252@susu.ru

Аннотация. Одной из неотъемлемых составных частей современных радиопередающих устройств являются полосно-пропускающие фильтры, выполняющие функцию ограничения внеполосного и побочного спектра электромагнитного излучения, что является необходимым в рамках плотного распределения полос радиочастот между радиослужбами. Аналогичные функции полосно-пропускающие фильтры выполняют в составе радиоприемных устройств и устанавливаются на входе. При этом они также выполняют функцию согласующего устройства между радиоприемным устройством и антенно-фидерным трактом. В настоящее время известны методы разработки полосно-пропускающих фильтров на основе микрополосковой технологии, обладающей такими достоинствами, как: широкая теоретическая база, технологичность изготовления, широкий выбор диэлектрических оснований, возможность моделирования без использования дорогостоящего программного обеспечения. При этом недостатком микрополосковой технологии является необходимость расширения площади диэлектрических оснований при увеличении числа частотно-селективных звеньев. В настоящее время перспективным направлением реализации полосно-пропускающих фильтров является их конструирование на основе многослойной технологии, позволяющей увеличивать число частотно-селективных звеньев без расширения площади диэлектрических оснований. **Цель исследования.** Целью настоящей работы является исследование частотно-селективных свойств вариантов конструкции полосно-пропускающего фильтра на основе многослойной технологии, базовым элементом которой является микрополосковый переход. **Материалы и методы.** Для рассмотренных конструкций полосно-пропускающего фильтра проведено численное электродинамическое моделирование в программе ANSYS HFSS с оценкой зависимости S-параметров в диапазоне частот 0,2–4 ГГц и получено графическое распределение электромагнитного поля в микрополосковом переходе. **Результаты.** Из результатов проведенного моделирования следует, что рассматриваемые конструкции полосно-пропускающего фильтра характеризуются хорошим согласованием с волновым сопротивлением 50 Ом (КСВН не более 1,5 в широком диапазоне частот), малым затуханием на центральной частоте (не более 0,5 дБ), а также значительным подавлением сигнала вне полосы его пропускания (более 30 дБ). **Заключение.** Результаты моделирования доказывают возможность практического применения полосно-пропускающих фильтров, разработанных на основе многослойной технологии, в составе радиопередающих устройств современных систем радиолокации и радионавигации.

Ключевые слова: многослойная технология, микрополосковый переход, полосно-пропускающий фильтр, S-параметры, моделирование

Для цитирования: Моделирование полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной технологии / Д.Г. Фомин, С.Н. Даровских, Н.В. Дударев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 1. С. 77–87. doi: 10.14529/ctcr220106.

SIMULATION OF BAND PASS FILTERS BASED ON MULTILAYER TECHNOLOGY

Dmitriy G. Fomin¹, Stanislav N. Darovskikh², Nikolay V. Dudarev³,
Igor I. Prokopov⁴, Svyatoslav V. Dudarev⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

¹ Fomin95@ya.ru

² darovskikhsn@susu.ru

³ dudarevnn@susu.ru

⁴ Prokopov174@mail.ru

⁵ asp20dsv252@susu.ru

Abstract. One of the integral parts of modern radio transmitting devices are bandpass filters that limit the out-of-band spectrum of electromagnetic radiation and the side effect of electromagnetic radiation, which is important in the framework of the dense distribution of the radio frequency band between radio services. Similar functions of bandpass filters are made as part of radio receivers and placed at the input. At the same time, they also perform the functions of a matching device between the radio receiving connection and the antenna-feeder path. Currently, there are known methods for the development of bandpass filters based on microstrip technology, which has such advantages as: a broad theoretical base, manufacturability, a wide selection of dielectric bases, and the possibility of simulation without using expensive software. At the same time, the disadvantage of microstrip technology is the need to expand the area of dielectric bases with an increase in the number of frequency-selective elements. Currently, a promising direction in the implementation of bandpass filters is their design based on a multilayer technology, which makes it possible to increase the number of frequency-selective elements without expanding the area of dielectric bases.

Purpose of the study. The purpose of this article is to study the frequency-selective properties of design options for a bandpass filter based on multilayer technology, the basic element of which is a microstrip transition. **Materials and methods.** For the considered designs of the bandpass filter, a numerical electro-dynamics simulation was carried out in the ANSYS HFSS software with an estimate of the dependence of the S-parameters in the frequency range of 0.2–4 GHz. The graphical distribution of the electromagnetic field in the microstrip transition was obtained. **Results.** From the results of the simulation it follows that the considered designs of the bandpass filter are characterized by good matching with a wave impedance of 50 Ohm (VSWR no more than 1.5 in a wide frequency range), low attenuation at the center frequency (no more than 0.5 dB), and by significant suppression of a signal outside its bandwidth (more than 30 dB). **Conclusion.** The simulation results prove the possibility of practical application of bandpass filters, developed on the basis of multilayer technology, as part of radio transmitting devices of radar and radio navigation systems.

Keywords: multilayer technology, microstrip transition, bandpass filter, S-parameters, simulation

For citation: Fomin D.G., Darovskikh S.N., Dudarev N.V., Prokopov I.I., Dudarev S.V. Simulation of band pass filters based on multilayer technology. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(1):77–87. (In Russ.) doi: 10.14529/ctcr220106.

Введение

Неотъемлемой частью современных радиопередающих устройств радиолокационных и радионавигационных систем, а также систем связи являются полосно-пропускающие фильтры (ППФ), выполняющие функции подавления внеполосного спектра электромагнитного излучения [1]. Одним из наиболее распространенных методов конструирования ППФ является применение микрополосковой технологии, достоинствами которой являются технологичность, широкий выбор диэлектрических оснований, возможность схемотехнического моделирования и хорошо разработанная теория конструирования всех типов фильтров [2–9]. Из недостатков микрополосковой технологии следует выделить увеличение габаритных размеров (площади диэлектрических оснований) СВЧ-устройств при увеличении количества частотно-селективных звеньев в составе их конструкций. В свою очередь, увеличение количества частотно-селективных звеньев без увеличения площади диэлектрических оснований возможно за счет использования многослойной технологии, базовым структурным элементом которой является микрополосковый переход. Преимуществом такого подхода является модульность конструкции, отсутствие переходных метал-

лизированных отверстий и реализация принципа бесконтактной электромагнитной связи между слоями [10]. Целью настоящей работы является оценка частотно-селективных свойств многослойных конструкций ППФ на основе микрополоскового перехода в составе передающих устройств современных радиоэлектронных систем.

1. Особенности конструкции многослойного ППФ на основе микрополоскового перехода

Микрополосковый переход представляет собой (рис. 1) конструкцию из двух диэлектрических оснований 1, 2, на каждом из которых расположена микрополосковая линия 3, 4 с обрывом на конце. Между диэлектрическими основаниями расположен металлический экран 5 с вырезанным щелевым резонатором 6, длина которого составляет половину длины волны, соответствующей частоте его основной моды. Микрополосковые линии пересекаются с проекцией щелевого резонатора. Участок микрополосковых линий от места пересечения с проекцией щелевого резонатора до обрыва образует микрополосковый резонатор 7, 8, длина которого составляет четверть длины волны на центральной частоте [11].

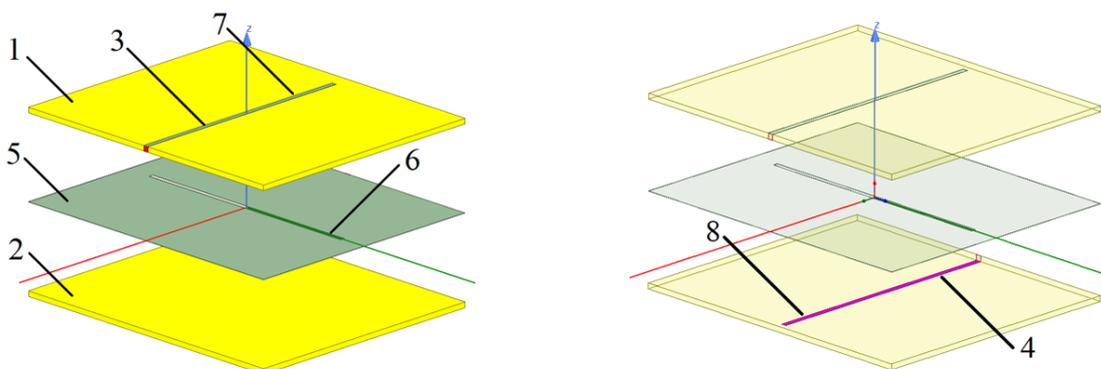


Рис. 1. Модель микрополоскового перехода в программе ANSYS HFSS
Fig. 1. Model of the microstrip transition in ANSYS HFSS software

Особенностью микрополоскового перехода является возможность «возбуждения» многомодового режима его щелевого резонатора (рис. 2), что позволяет расширить диапазон рабочих частот, а также увеличить прямоугольность амплитудно-частотных характеристик коэффициента передачи [12, 13]. Для этого требуется обеспечить необходимое положение микрополосковых линий относительно центра щелевого резонатора (рис. 3, 4). Так, для «возбуждения» первых двух мод щелевого резонатора расстояние между микрополосковыми линиями должно составлять треть длины щелевого резонатора (рис. 3а, 4а); для «возбуждения» первых трех мод – половину длины щелевого резонатора (рис. 3б, 4б).

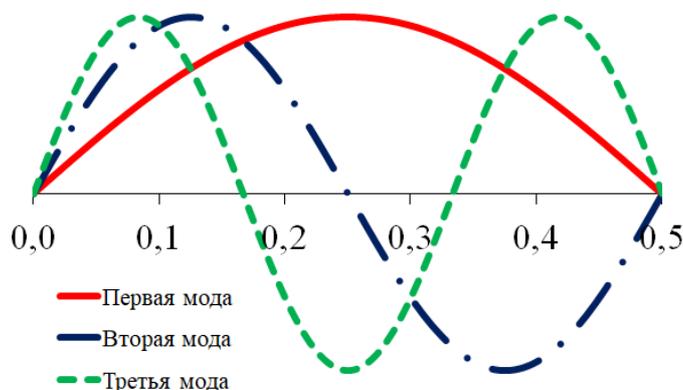


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля вдоль щелевого резонатора, длина которого составляет половину длины волны на частоте, соответствующей его основной моде
Fig. 2. Distribution of the electric field strength along the slot resonator, the length of which is half the wavelength at the frequency corresponding to its first mode

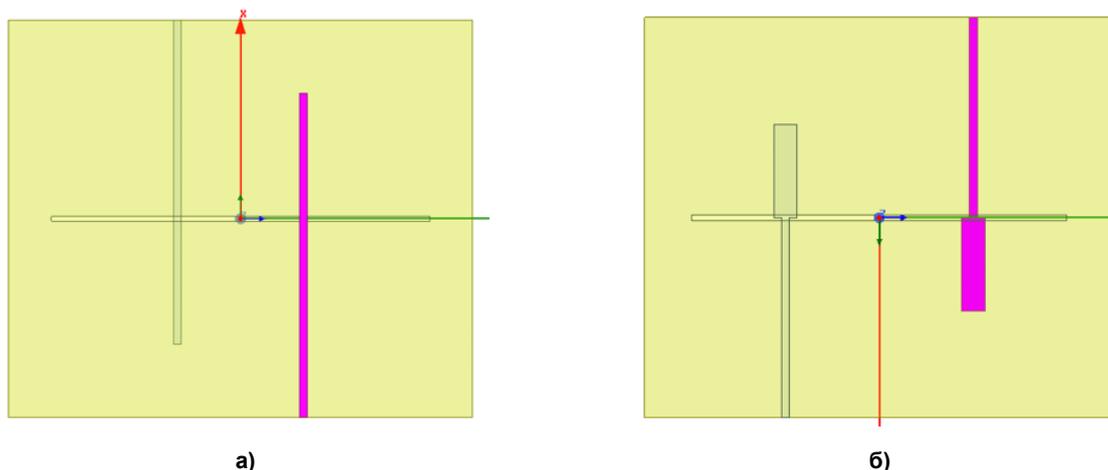


Рис. 3. Расположение микрополосковых линий при «возбуждении»:
а) 1, 2 моды щелевого резонатора; б) 1–3 моды щелевого резонатора
Fig. 3. Location of microstrip lines for “excitation” of:
a) 1, 2 modes of the slot resonator; b) 1–3 modes of a slot resonator

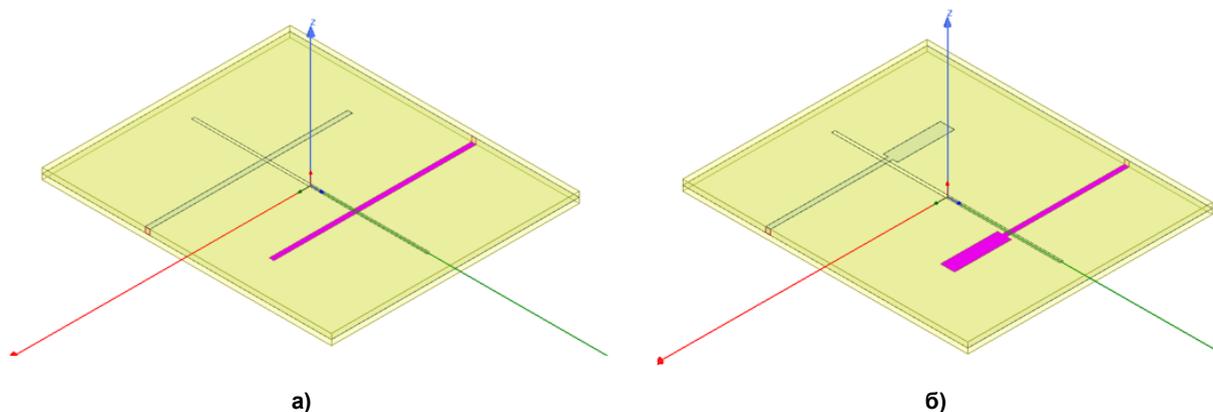


Рис. 4. Расположение микрополосковых линий при «возбуждении»:
а) 1, 2 моды щелевого резонатора; б) 1–3 моды щелевого резонатора
Fig. 4. Location of microstrip lines for “excitation” of:
a) 1, 2 modes of the slot resonator; b) 1–3 modes of a slot resonator

Таким образом, для исследования многомодового режима щелевого резонатора целесообразно рассмотреть следующие варианты конструкции ППФ на основе микрополоскового перехода:

- 1) первая конструкция ППФ (далее – конструкция ППФ № 1) содержит микрополосковый переход, расположение микрополосковых линий которого обеспечивает «возбуждение» основной моды щелевого резонатора (см. рис. 1);
- 2) вторая конструкция ППФ (далее – конструкция ППФ № 2) содержит микрополосковый переход, расположение микрополосковых линий которого обеспечивает «возбуждение» первых двух мод щелевого резонатора (см. рис. 3а, 4а);
- 3) третья конструкция ППФ (далее – конструкция ППФ № 3) содержит микрополосковый переход, расположение микрополосковых линий которого обеспечивает «возбуждение» первых трех мод щелевого резонатора (см. рис. 3б, 4б).

2. Электродинамическое моделирование ППФ

Для исследования трех представленных выше конструкций ППФ (см. рис. 1, 3, 4) проведено численное электродинамическое моделирование в программе ANSYS HFSS. Моделирование было выполнено при использовании суперкомпьютерных ресурсов НИУ ЮУрГУ [14]. При выполнении моделирования были использованы следующие параметры:

- в качестве источника сигнала (волна ТЕМ-типа), поступающего на микрополосковые линии, использованы дискретные порты с волновым сопротивлением 50 Ом;
 - в качестве материала подложки использован ARLON AD1000 толщиной 1,27 мм (относительная диэлектрическая проницаемость 10,2, тангенс угла диэлектрических потерь 0,0023);
 - размеры диэлектрических оснований составляют (70×60) мм.
- Параметры основных элементов конструкций ППФ приведены в табл. 1.

Параметры основных элементов конструкций ППФ

Таблица 1

Parameters of the main elements of BPFs designs

Table 1

Наименование параметра	Конструкция ППФ № 1	Конструкция ППФ № 2	Конструкция ППФ № 3
Центральная частота, МГц	1000	1500	2000
Ширина микрополосковых резонаторов, мм	1,18	1,18	3,5
Длина микрополосковых резонаторов, мм	27	18	13,9
Ширина щелевого резонатора, мм	0,7	0,7	0,7
Длина щелевого резонатора, мм	56	56	56

Так, длина щелевого резонатора во всех конструкциях была равна 56 мм, что соответствует половине длины волны на частоте 1000 МГц (частота основной моды) с учетом коэффициента её укорочения в диэлектрике. Длина микрополосковых резонаторов соответствует четверти длины волны на центральной частоте для каждой конструкции. Ширина микрополоскового резонатора в составе конструкции ППФ № 3 была определена по результатам моделирования.

3. Результаты моделирования

3.1. S-параметры

В результате моделирования для трех рассматриваемых конструкций ППФ были получены следующие зависимости S-параметров в диапазоне частот 0,2–4 ГГц (рис. 5–7, табл. 2).

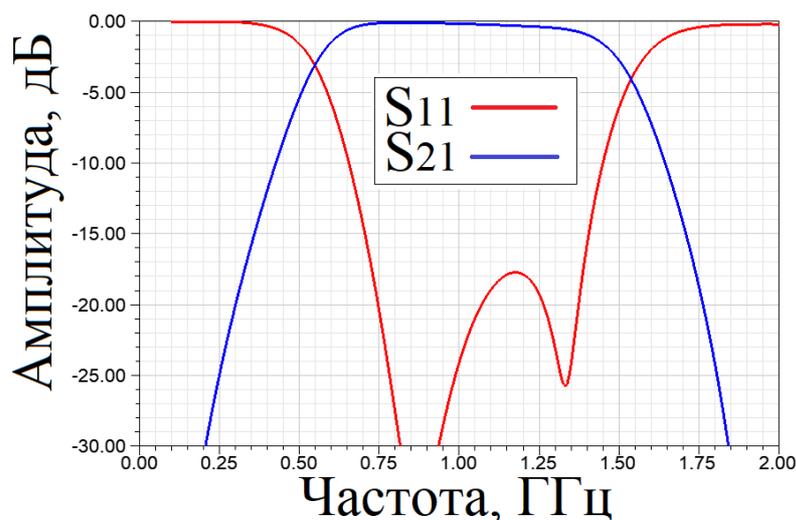


Рис. 5. Зависимости коэффициентов передачи и отражения в диапазоне частот для конструкции ППФ № 1

Fig. 5. Dependences of the transmission and reflection coefficients in the frequency range for the design of BPF No. 1

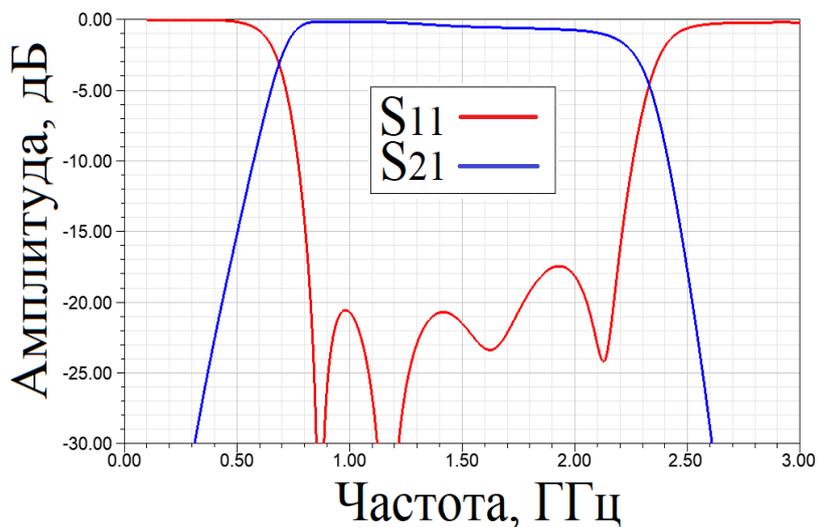


Рис. 6. Зависимости коэффициентов передачи и отражения в диапазоне для конструкции ППФ № 2
Fig. 6. Dependences of the transmission and reflection coefficients in the frequency range for the design of BPF No. 2

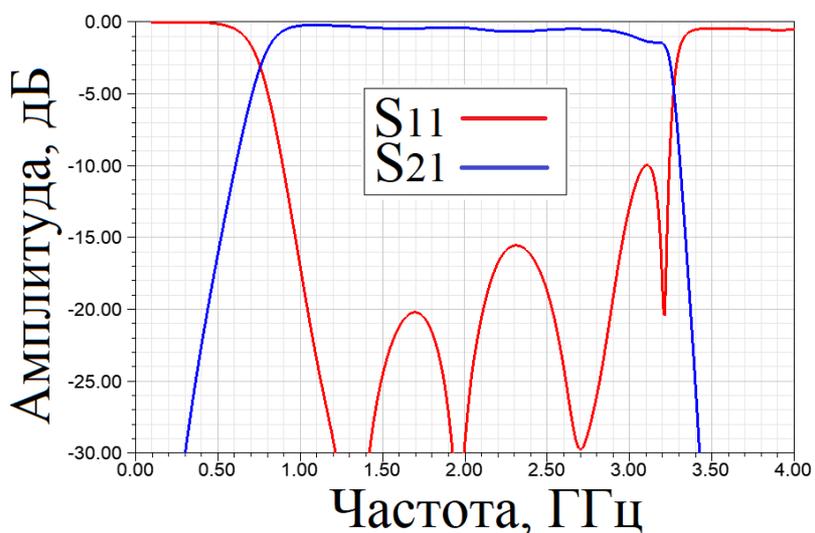


Рис. 7. Зависимости коэффициентов передачи и отражения в диапазоне частот для конструкции ППФ № 3
Fig. 7. Dependences of the transmission and reflection coefficients in the frequency range for the design of BPF No. 3

Амплитудно-частотные характеристики исследуемых ППФ
Amplitude-frequency characteristics of the investigated BPFs

Таблица 2

Table 2

Наименование параметра	Конструкция ППФ № 1	Конструкция ППФ № 2	Конструкция ППФ № 3
Центральная частота, МГц	1000	1500	2000
Затухание на центральной частоте, дБ	0,15	0,5	0,5
Полоса пропускания по уровню -3 дБ	950	1600	2500
Полоса пропускания по уровню -20 дБ	1480	2090	2930
Полоса пропускания по уровню КСВН ≤ 1,5, МГц	720	1420	2030

Из результатов моделирования следует, что рассматриваемые конструкции ППФ характеризуются хорошим согласованием с волновым сопротивлением 50 Ом (КСВН менее 1,5 в широком диапазоне частот), малым затуханием на центральной частоте (не более 0,5 дБ), а также значительным подавлением сигнала вне полосы его пропускания (более 30 дБ).

3.2. Распределение электромагнитных полей

С помощью программы ANSYS HFSS получено распределение электромагнитного поля для каждой из конструкций ППФ (рис. 8–10). Для анализа физического процесса частотно-селективной передачи СВЧ-сигнала с одного порта к другому обратимся к распределению напряженности электрического и магнитного полей (рис. 8) в конструкции ППФ № 1. Так из распределения напряженности магнитного поля (рис. 8а) следует, что его наибольшая амплитуда соответствует месту пересечения проекции щелевого резонатора и микрополосковой линии. Это приводит к «возбуждению» щелевого резонатора, в пространстве которого образуется электрическое поле (рис. 8б), направление которого перпендикулярно магнитному полю.

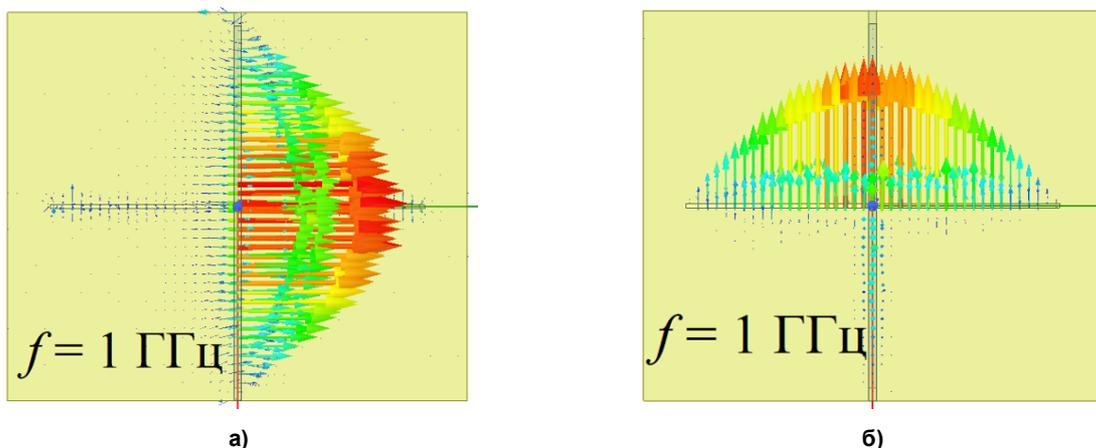


Рис. 8. Распределение: а) напряженности магнитного поля вдоль микрополосковой линии на частоте 1 ГГц для конструкции ППФ № 1; б) напряженности электрического поля вдоль щелевого резонатора на частоте 1 ГГц для конструкции ППФ № 1
Fig. 8. Distribution of: a) magnetic field strength along the microstrip line at a frequency of 1 GHz for the design of BPF No. 1; b) the electric field strength along the slot resonator at a frequency of 1 GHz for the design of BPF No. 1

Аналогичным образом происходит «возбуждение» щелевого резонатора в составе конструкций ППФ № 2 (рис. 9) и № 3 (рис. 10).

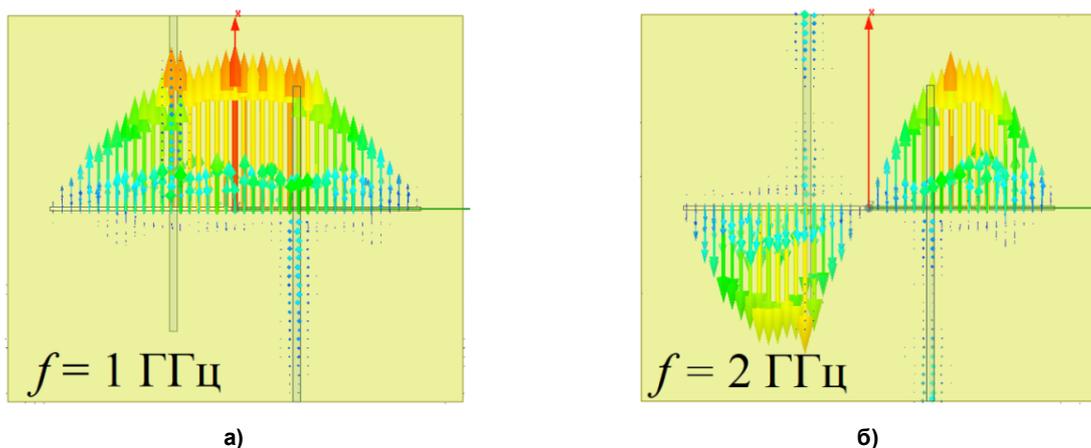


Рис. 9. Распределение напряженности электрического поля вдоль щелевого резонатора на частоте: а) 1 ГГц, б) 2 ГГц для конструкции ППФ № 2
Fig. 9. Distribution of the electric field strength along the slot resonator at the frequency: a) 1 GHz, b) 2 GHz for the design of BPF No. 2

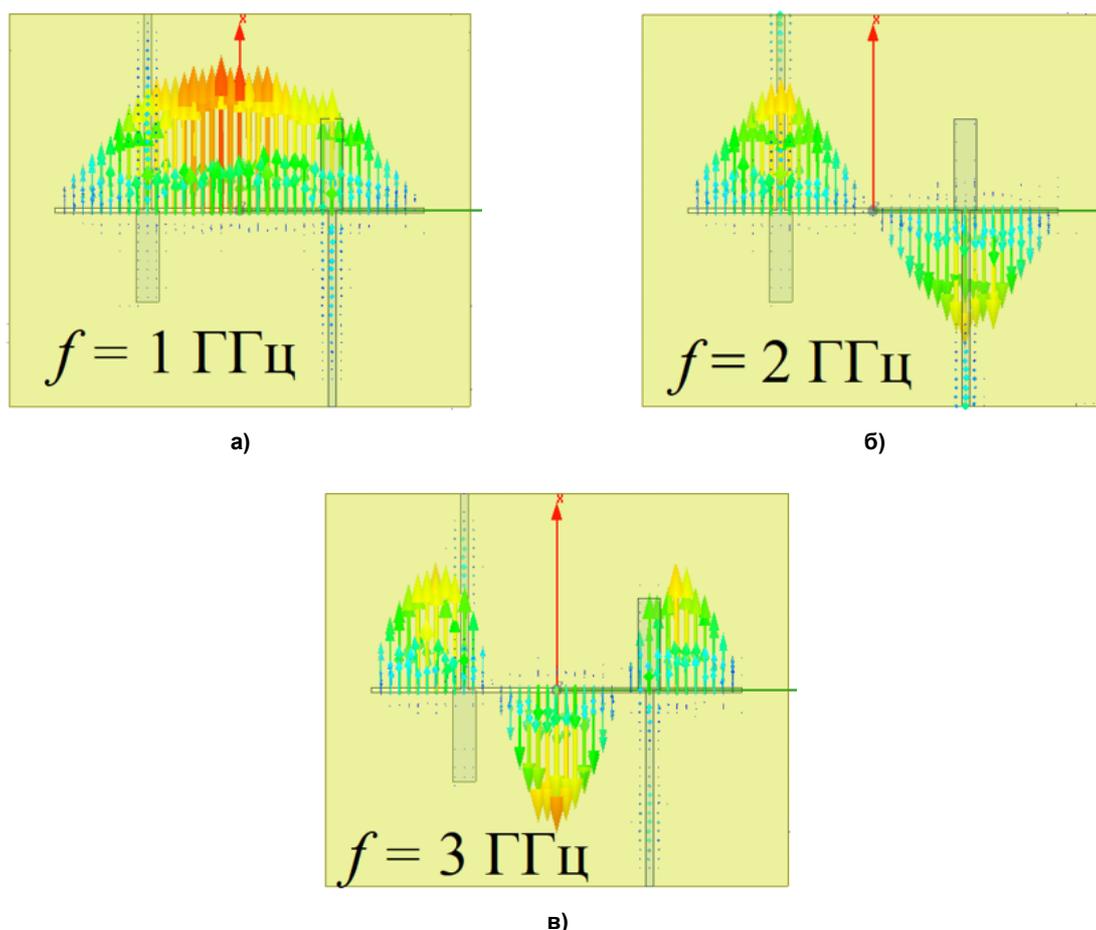


Рис. 10. Распределение напряженности электрического поля вдоль щелевого резонатора на частоте:
а) 1 ГГц, б) 2 ГГц, в) 3 ГГц для конструкции ППФ № 3
Fig. 10. Distribution of the electric field strength along the slot resonator at the frequency:
a) 1 GHz, b) 2 GHz, c) 3 GHz for the design of BPF No. 3

Из представленных распределений напряженности электрического поля (см. рис. 8–10) можно сделать выводы о том, что оно имеет синусоидальный характер с различным периодом его повторения. Это соответствует характеру распределения электрического поля вдоль щелевой линии передачи с коротким замыканием на её конце [15].

Равенство нулю амплитуды напряженности электрического поля в непосредственной близости к коротким краям щелевого резонатора для каждой из конструкций ППФ объясняется выполнением граничных условий для тангенциальной составляющей электрического поля по поверхности металла [16].

Заключение

Результаты проведенного исследования доказывают возможность практического применения полосно-пропускающих фильтров, разработанных на основе многослойной технологии в составе радиопередающих устройств современных систем радиолокации и радионавигации. Так, согласно полученным результатам исследуемые полосно-пропускающие фильтры характеризуются хорошим согласованием с антенно-фидерным трактом 50 Ом ($K_{СВН} \leq 1,5$), затуханием на центральной частоте – не более 0,5 дБ, а также подавлением внеполосного электромагнитного излучения более чем на 30 дБ. Также в работе получены распределения напряженности электрического поля вдоль щелевого резонатора для каждой из представленных конструкций ППФ. Согласно полученным распределениям можно сделать вывод об его синусоидальной зависимости, что соответствует характеру распределения электрического поля вдоль щелевой линии передачи с коротким замыканием на её конце.

Список литературы

1. Таблица распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации (статистические данные). URL: <https://digital.gov.ru/opendata/7710474375-trpch/table/> (дата обращения: 17.12.2021).
2. Li-Tian Wang, Yang Xiong, Ming He. Review on UWB Bandpass Filters. In book: *UWB Technology – Circuits and Systems*. London, IntechOpen. 2019. URL: <http://doi.org/10.5772/intechopen.87204> (дата обращения: 17.12.2021).
3. Hsu C.-L., Hsu F.-C., Kuo J.-K. Microstrip Bandpass Filters for Ultra-Wideband (UWB) Wireless Communications // *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. 2005. P. 679–682. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2005.1516698>.
4. Xu L., Zhu T. Design of a Ultra-Wideband (UWB) Filter based on Defected Ground Structure // *2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. 2015. P. 1–3. <https://doi.org/10.1109/APMC.2015.7413142>.
5. Han L., Wu K., Zhang X. Development of Packaged Ultra-wideband Bandpass Filters // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2010. Vol. 58. P. 220–228. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2009.2036399>.
6. Wang Y.X., Chen Y.L., Zhou W.H., Yang W.C., Zen J. Dual-Band Bandpass Filter Design Using Stub-Loaded Hairpin Resonator and Meandering Uniform Impedance Resonator // *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2021. Vol. 95. P. 147–153. doi: 10.2528/PIERL20102102.
7. Wu L., Hu P., Li C., Li L., Tang C. A Novel Compact Microstrip UWB BPF with Quad Notched Bands Using Quad-Mode Stepped Impedance Resonator // *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2019. Vol. 83. P. 51–57. doi: 10.2528/PIERL18123002.
8. Gao Y.-Q., Shen W., Wu L., Sun X.-W. Compact Microstrip BPF with High Selectivity Using Extended Tapped Lines // *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2018. Vol. 80. P. 39–46. doi: 10.2528/PIERL18081303.
9. Liu J., Lu J., He Z., Luo T., Ying X., Zhao J. Super Compact Microstrip UWB BPF with Triple-Notched Bands // *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2018. Vol. 73. P. 61–67. doi: 10.2528/PIERL17110804.
10. Фомин Д.Г., Дударев Н.В., Даровских С.Н., Клыгач Д.С., Вахитов М.Г. Особенности применения объемно-модульной технологии в проектировании СВЧ электронных устройств // *Ural Radio Engineering Journal*. 2021. Т. 5, № 2. С. 91–103. doi: 10.15826/urej.2021.5.2.001.
11. Фомин Д.Г., Дударев Н.В., Даровских С.Н. Сверхширокополосный полосно-пропускающий фильтр на основе микрополоскового перехода для обеспечения высокого уровня скрытности инфокоммуникационных систем // *Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере*. 2021. № 3(41). С. 30–37. doi: 10.14529/secur210304.
12. Guo X., Zhu L., Wang J., Wu W. Wideband Microstrip-to-Microstrip Vertical Transitions Via Multiresonant Modes in a Slotline Resonator // *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. 2015. Vol. 63, no. 6. P. 1902–1909. doi: 10.1109/TMTT.2015.2422695.
13. Yang L., Zhu L., Choi W.-W., Tam K.-W. Analysis and design of wideband microstrip-to-microstrip equal ripple vertical transitions and their application to bandpass filters // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017. Vol. 65. P. 2866–2877. doi: 10.1109/TMTT.2017.2675418.
14. Kostenetskiy P., Semenikhina P. SUSU Supercomputer Resources for Industry and fundamental Science // *2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, 13–15 November 2018. Chelyabinsk, 2018. P. 1–7. doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570068*.
15. Фомин Д.Г., Дударев Н.В., Даровских С.Н. Сверхширокополосный полосно-пропускающий фильтр на основе многослойного полосково-щелевого перехода // *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2021, № 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.10.13>.
16. Pozar D.M. *Microwave Engineering*. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2011. 732 p.

References

1. *Tablica raspredeleniya polos radiochastot mezhdu radiosluzhбами Rossijskoj Federacii (statisticheskie dannye)* [Table of distribution of radio frequency bands between the radio services of the Russian Federation (statistical data)]. Available at: <https://digital.gov.ru/opendata/7710474375-trpch/table/> (accessed 17.12.2021). (In Russ.)
2. Li-Tian Wang, Yang Xiong, Ming He. Review on UWB Bandpass Filters. In book: *UWB Technology – Circuits and Systems*. London, IntechOpen. 2019. Available at: <http://doi.org/10.5772/intechopen.87204> (accessed 17.12.2021).
3. Hsu C.-L., Hsu F.-C., Kuo J.-K. Microstrip Bandpass Filters for Ultra-Wideband (UWB) Wireless Communications. In: *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*; 2005. P. 679–682. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2005.1516698>.
4. Xu L., Zhu T. Design of a Ultra-Wideband (UWB) Filter based on Defected Ground Structure. In: *2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*; 2015. P. 1–3. <https://doi.org/10.1109/APMC.2015.7413142>.
5. Han L., Wu K., Zhang X. Development of Packaged Ultra-wideband Bandpass Filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2010;58:220–228. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2009.2036399>.
6. Wang Y.X., Chen Y.L., Zhou W.H., Yang W.C., Zen J. Dual-Band Bandpass Filter Design Using Stub-Loaded Hairpin Resonator and Meandering Uniform Impedance Resonator. *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2021;95:147–153. doi: 10.2528/PIERL20102102.
7. Wu L., Hu P., Li C., Li L., Tang C. A Novel Compact Microstrip UWB BPF with Quad Notched Bands Using Quad-Mode Stepped Impedance Resonator. *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2019;83:51–57. doi: 10.2528/PIERL18123002.
8. Gao Y.-Q., Shen W., Wu L., Sun X.-W. Compact Microstrip BPF with High Selectivity Using Extended Tapped Lines. *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2018;80:39–46. doi: 10.2528/PIERL18081303.
9. Liu J., Lu J., He Z., Luo T., Ying X., Zhao J. Super Compact Microstrip UWB BPF with Triple-Notched Bands. *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2018;73:61–67. doi: 10.2528/PIERL17110804.
10. Fomin D.G, Dudarev N.V., Darovskikh S.N., Klygach D. S., Vakhitov M.G. [Specific features of volume-modular technology application in the design of microwave electronic devices]. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(2):91–103. (In Russ.) doi: 10.15826/urej.2021.5.2.001.
11. Fomin D.G, Dudarev N.V., Darovskikh S.N. [Ultra-wideband band-pass filter based on a microstrip transition to ensure a high level of secrecy of infocommunication systems]. *Bulletin of the Ural Federal District. Information security*. 2021;3(41):30–37. (In Russ.) doi: 10.14529/secur210304.
12. Guo X., Zhu L., Wang J., Wu W. Wideband Microstrip-to-Microstrip Vertical Transitions Via Multiresonant Modes in a Slotline Resonator. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. 2015;63(6):1902–1909. doi: 10.1109/TMTT.2015.2422695.
13. Yang L., Zhu L., Choi W.-W., Tam K.-W. Analysis and design of wideband microstrip-to-microstrip equal ripple vertical transitions and their application to bandpass filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017;65:2866–2877. doi: 10.1109/TMTT.2017.2675418.
14. Kostenetskiy P., Semenikhina P. SUSU Supercomputer Resources for Industry and fundamental Science. In: *2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, 13–15 November 2018*. Chelyabinsk; 2018. P. 1–7. doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570068.
15. Fomin D.G, Dudarev N.V., Darovskikh S.N. [Ultra-wideband band-pass filter based on a multi-layer strip-slot transition]. *Journal of Radio Electronics*. 2021;(10). (In Russ.) <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.10.13>
16. Pozar, D.M. *Microwave Engineering*. 4th ed. Hoboken: Wiley; 2011. 732 p.

Информация об авторах

Фомин Дмитрий Геннадьевич, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; Fomin95@ya.ru.

Даровских Станислав Никифорович, д-р техн. наук, доц., заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; darovskikhsn@susu.ru.

Дударев Николай Валерьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; dudarevvn@susu.ru.

Прокопов Игорь Игоревич, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; Prokopov174@mail.ru.

Дударев Святослав Валерьевич, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; asp20dsv252@susu.ru.

Information about the authors

Dmitriy G. Fomin, postgraduate student of the Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; Fomin95@ya.ru.

Stanislav N. Darovskikh, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; darovskikhsn@susu.ru.

Nikolay V. Dudarev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Senior Lecturer of the Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; dudarevvn@susu.ru.

Igor I. Prokopov, postgraduate student of the Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; Prokopov174@mail.ru.

Svyatoslav V. Dudarev, postgraduate student of the Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; asp20dsv252@susu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.12.2021; одобрена после рецензирования 10.01.2022; принята к публикации 17.01.2022.

The article was submitted 20.12.2021; approved after reviewing 10.01.2022; accepted for publication 17.01.2022.