

УДК 62.372.544.2

Miniature Bandpass Microwave Filter with Ultradeep Suppression in a Wide Stopband

**Maksim O. Savishnikov,
Dmitry D. Dmitriev* and Eduard D. Kabanov**
*Siberian Federal University
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia*

Received 04.04.2019, received in revised form 10.07.2019, accepted 17.09.2019

The paper presents the results of a study of the design of a miniature band-pass filter based on multi-conductor strip resonators. Using the software for electrodynamic analysis, a sixth-order band-pass filter on seven-conductor resonators was designed and manufactured. Designed filter is characterized by small size and deep repression of the stop band. The measured filter characteristics exceed the characteristics of known analogs. The measured width of the high-frequency stop band of 24 times the center frequency of the bandwidth at the level of suppression at least 160 dB.

Keywords: ultra-high frequency, band-pass filter, strip resonator, stopband, suppression depth.

Citation: Savishnikov M.O., Dmitriev D.D., Kabanov E.D. Miniature bandpass microwave filter with ultradeep suppression in a wide stopband, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2019, 12(7), 758-764. DOI: 10.17516/1999-494X-0175.

Миниатюрный полосно-пропускающий СВЧ-фильтр со сверхглубоким уровнем подавления в широкой полосе заграждения

М.О. Савишников, Д.Д. Дмитриев, Э.Д. Кабанов
*Сибирский федеральный университет
Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

В работе приведены результаты исследования конструкции миниатюрного полосно-пропускающего фильтра на основе многопроводниковых полосковых резонаторов. В программе электродинамического анализа спроектирован, а затем изготовлен полосно-пропускающий фильтр шестого порядка на семипроводниковых резонаторах. Измеренные характеристики фильтра показали, что по сравнению с известными аналогами он характеризуется не только

малыми габаритами, но и глубоким подавлением в полосах заграждения. Так, измеренная ширина высокочастотной полосы заграждения в 24 раза превышает центральную частоту полосы пропускания при уровне подавления не менее 160 дБ.

Ключевые слова: сверхвысокие частоты, полосно-пропускающий фильтр, полосковый резонатор, полоса заграждения, глубина подавления.

Введение

Развитие систем связи, радиолокации, радионавигации, специальной радиоаппаратуры требует улучшения характеристик частотно-селективных сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств – полосно-пропускающих фильтров (ППФ). Основное внимание при создании новых конструкций фильтров разработчики уделяют увеличению их избирательности, уменьшению габаритов, технологичности в изготовлении и, конечно, стоимости. Известно, что традиционные СВЧ-фильтры полосно-пропускающие фильтры имеют паразитные «окна прозрачности» на резонансных частотах высших мод колебаний, поэтому у них сравнительно узкая высокочастотная полоса заграждения. Однако для современных систем связи и различной специальной радиоаппаратуры требуются миниатюрные планарные ППФ, обладающие не только широкой полосой заграждения (ПЗ), но и высоким уровнем подавления в ней. Нарращивание числа звеньев в конструкции ППФ позволяет улучшить подавление помех в полосах заграждения, но приводит к неприемлемо большим потерям мощности полезного сигнала и значительному увеличению габаритов устройств.

Улучшить характеристики ПЗ удастся построением планарных фильтров на подвешенной подложке с двухсторонним рисунком полосковых проводников [1]. Однако рекордно высокими характеристиками ПЗ отличаются фильтры на миниатюризованных коаксиальных резонаторах [2]. Например, в фильтре четвертого порядка на таких резонаторах полоса заграждения по уровню минус 90 дБ простирается до $47 \cdot f_0$ [3, 4]. Но фильтры на таких резонаторах менее технологичны по сравнению с планарными конструкциями.

Одним из перспективных подходов к преодолению указанных выше проблем является применение многопроводниковых полосковых резонаторов. Фильтры на многопроводниковых полосковых резонаторах благодаря ряду достоинств по сравнению с традиционными однопроводниковыми резонаторами находят все большее применение в технике СВЧ [5-9]. Многопроводниковые резонаторы обладают рекордной миниатюрностью и добротностью даже в метровом диапазоне длин волн, причем их добротность растет, а размеры уменьшаются с увеличением числа проводников структуры и уменьшением толщины диэлектрических слоев [10]. В то же время систематических исследований частотно-селективных свойств фильтров на их основе не проводилось. В настоящей работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований селективных свойств ППФ на основе многопроводниковых полосковых резонаторов. Такие исследования очень важны с точки зрения как возможности достижения предельных характеристик, так и перспективности их применения в технике СВЧ.

Разработка миниатюрного полосно-пропускающего фильтра на основе многопроводниковых полосковых резонаторов

Полосковый многопроводниковый резонатор (рис. 1) содержит многослойную структуру, подвешенную между двумя экранами в металлическом корпусе. Структура состоит из поло-

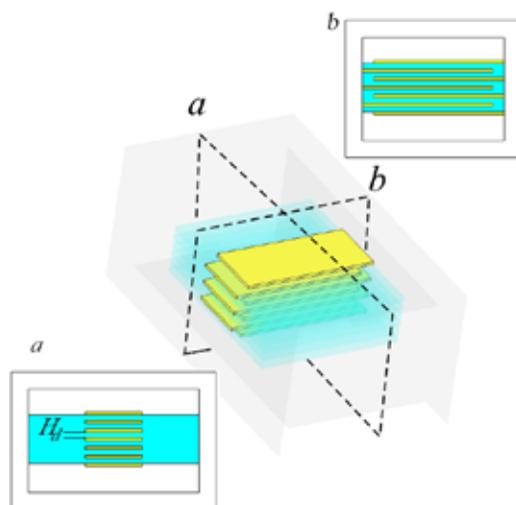


Рис. 1. Конструкция многопроводникового полоскового резонатора

Fig. 1. The design of multi-conductor strip resonator

сковых металлических проводников, электромагнитно связанных между собой и разделенных тонкими диэлектрическими слоями. Проводники с нечетными номерами одним концом замкнуты на экран с одной стороны, а проводники с четными номерами замкнуты одним концом на экран с противоположной стороны.

В ходе исследований в программе электродинамического анализа были синтезированы ППФ-фильтры с числом резонаторов от двух до шести, амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) которых представлены на рис. 2. Все фильтры настраивались в программе электродинамического анализа на одинаковую центральную частоту $f_0 = 1$ ГГц и относительную ширину полосы пропускания в $\Delta f/f_0 = 10\%$. Максимумы обратных потерь в полосе пропускания были на уровне минус 14 дБ. В каждом из фильтров использовали диэлектрические подложки толщиной $H_d = 0.127$ мм и диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 2.2$, соответствующие материалу RT/Duroid 5880. Каждый из резонаторов представляет собой систему из семи проводников. Высота экранов над проводниками резонаторов 4 мм, длина резонаторов 6.5 мм; ширина полосковых проводников всех резонаторов $w = 2$ мм, а их длина – около 6 мм (проводники средних резонаторов в фильтрах с числом резонаторов больше двух необходимо укорачивать для обеспечения нужного уровня отражения мощности в полосе пропускания).

Из представленных на рис. 2 зависимостей видно, что протяженность высокочастотной полосы заграждения по заданному уровню подавления определяется, в первую очередь, ослаблением мощности на частотах паразитных полос пропускания.

На рис. 3 показан график зависимости минимального ослабления в полосе заграждения от числа резонаторов в фильтре. Зависимость получена для полосы заграждения, простирающейся до частоты, в десять раз превышающей центральную частоту полосы пропускания ($10 f_0$). Видно, что увеличение количества резонаторов фильтра приводит к практически линейному росту ослабления сигнала, выраженному в децибелах. При этом добавление каждого нового резонатора приводит к увеличению затухания в полосе подавления примерно на 40 дБ.

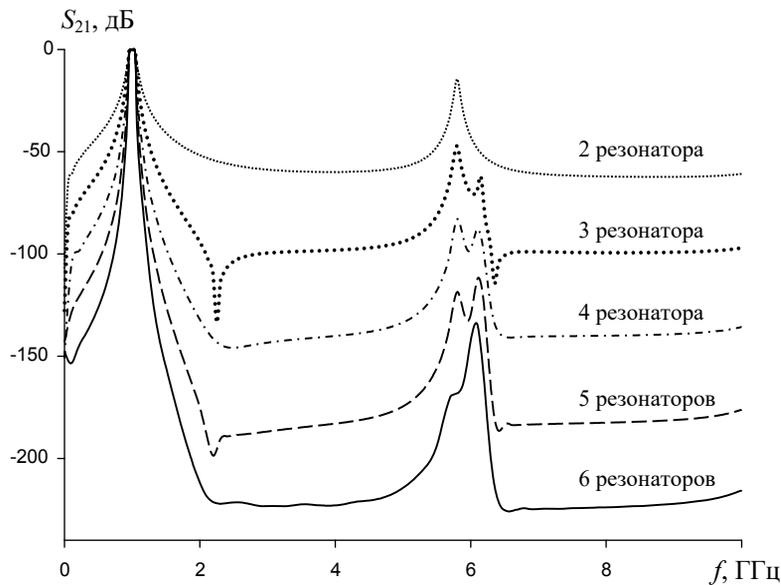


Рис. 2. Рассчитанные АЧХ полосно-пропускающих фильтров с различным числом резонаторов

Fig. 2. Calculated amplitude-frequency characteristics of band-pass filters with a different number of resonators

Таким образом, рассчитанные в программе электродинамического анализа зависимости показывают, что для достижения глубоких (120 дБ и более) уровней подавления в широких полосах заграждения фильтров на основе многопроводниковых полосковых резонаторов необходимо использовать многозвенные конструкции с числом резонаторов не менее пяти.

Для экспериментальной проверки возможности реализации полосно-пропускающих фильтров с уникальными характеристиками полосы заграждения был синтезирован и изготовлен фильтр шестого порядка на основе семипроводниковых полосковых резонаторов. Фотография изготовленного макета фильтра представлена на рис. 3. Центральная частота полосы пропускания фильтра составляет $f_0 = 440$ МГц при ее относительной ширине $\Delta f/f_0 = 6\%$. Диэлектрическая проницаемость слоев $\epsilon = 3.5$ (материал слоев – полиамид толщиной 50 мкм), ширина проводников 2 мм, расстояние от верхнего и нижнего экранов до поверхности многослойной структуры 4 мм, материал проводников – медь. Длина резонаторов при таких конструктивных параметрах составила 7 мм. Размеры полосковой структуры фильтра равны 7×45.6 мм или в длинах волн в вакууме на центральной частоте полосы пропускания $0.01\lambda \times 0.067\lambda$.

На рис. 4 изображены измеренные АЧХ коэффициента передачи и коэффициента отражения изготовленного макета фильтра в широкой и узкой полосе частот. Из представленных зависимостей видно, что фильтр обладает высокой крутизной склонов вблизи полосы пропускания и значительным уровнем затухания в полосах подавления.

Высокочастотная полоса заграждения простирается до частоты $\sim 44 f_0$ при уровне затухания в этой полосе более 60 дБ, а по уровню затухания 160 дБ она простирается до частоты $24 f_0$, что является рекордной на текущий момент величиной для конструкций полосковых фильтров. При этом фильтр характеризуется значительной миниатюрностью даже на частотах метрового диапазона длин волн.

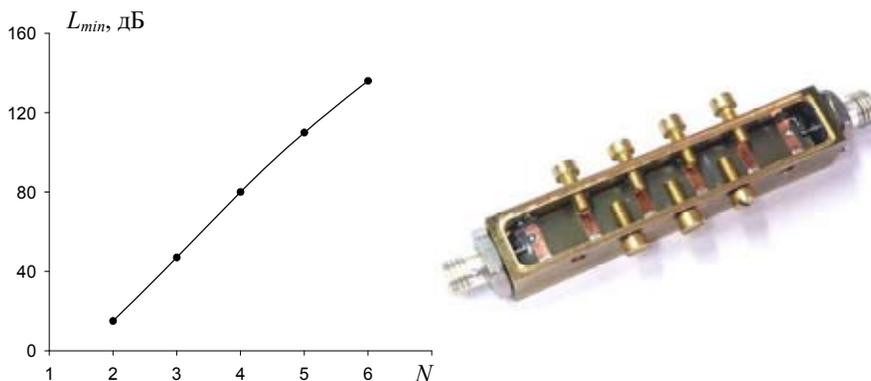


Рис. 3. График ослабления мощности в высокочастотной полосе заграждения (протяженностью $10f_0$) в зависимости от количества резонаторов фильтра и фотография изготовленного макета устройства

Fig. 3. Graph of the power attenuation in the high-frequency obstacle band ($10f_0$ length) depending on the number of filter resonators, and a photo of the filter layout made

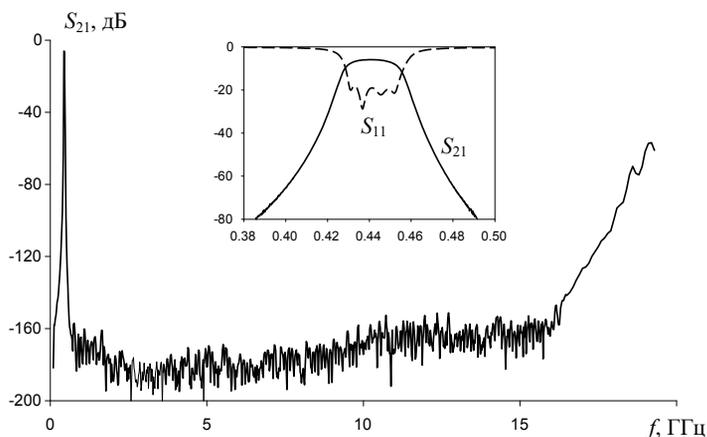


Рис. 4. Измеренные АЧХ фильтра шестого порядка в узкой (на вставке) и широкой полосе частот

Fig. 4. The measured amplitude-frequency characteristics of the filter of the sixth order in a narrow (inset) and a wide frequency band

Выводы

Таким образом, результаты исследований полосно-пропускающих фильтров на основе многопроводниковых полосковых резонаторов показывают, что такие устройства по сравнению с известными полосковыми конструкциями обладают не только меньшими габаритами, но и значительно более протяженной и глубокой высокочастотной полосой заграждения. В табл. 1 приводится сравнение характеристик изготовленного фильтра с известными мировыми аналогами [5-9]. Конструктивной особенностью изготовленного фильтра является наличие элементов регулировки, позволяющих в небольших пределах изменять резонансные частоты резонаторов и величину их связи между собой, что дает возможность достаточно просто настроить фильтр на требуемые параметры полосы пропускания и необходимый уровень отражений СВЧ-мощности в полосе рабочих частот.

Таблица 1. Сравнение характеристик изготовленного фильтра с известными мировыми аналогами

Table 1. Comparison of the characteristics of the manufactured filter with well-known world analogues

Источник	f_0 (МГц)/ Полоса (%)	Порядок/ Потери (дБ)	Размер (λ)	Полоса заграждения
[5]	2400/5	3/2.4	0.132×0.081	40 дБ до $8.76f_0$
[6]	1500/9	2/2.5	0.16×0.12	23.7 дБ до $10.6f_0$
[7]	2450/11	2/2.5	0.054×0.045×0.013	26 дБ до $4f_0$
[8]	500/20	4/3.5	0.03×0.06	30 дБ до $7f_0$
[9]	960/8	3/4.0	0.027×0.13×0.013	30 дБ до $5f_0$
Данная работа	440/6	6/5.9	0.01×0.067×0.0125	60 дБ до $44f_0$ 160 дБ до $24f_0$

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в ходе реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства (договор № 03.G25.31.0279 от 30 мая 2017 г.).

Список литературы

- [1] Belyaev B.A., Leksikov A.A., Tyurnev V.V., Kazakov A.V. Strip-line filter with suspended substrate. *2005 15th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2005)*, Sevastopol, 2015, 506–507.
- [2] Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Tyurnev V.V., Leksikov A.A. Miniature bandpass filter with a wide stopband up to $40f_0$. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2012, 54 (5), 1117–1118.
- [3] Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Tyurnev V.V., Leksikov A.A., Leksikov An.A. Miniature coaxial resonator and related bandpass filter with ultra-wide stopband. *Technical Physics Letters*, 2012, 38 (1), 47–50.
- [4] Belyaev B.A., Leksikov A.A., Serzhantov A.M., Tyurnev V.V., Bal'va Ya.F., Leksikov An.A. Bandpass filter with an ultra-wide stopband designed on miniaturized coaxial resonators. *J. Comm. Technol. Electron*, 2013, 58 (2), 110–117.
- [5] Peng Chu, Wei Hong, Linlin Dai et al. Wide Stopband Band-pass Filter Implemented With Spur Stepped Impedance Resonator and Substrate Integrated Coaxial Line Technology. *IEEE Microwave and Component Letters*, 4, 218–220.
- [6] Chan Ho Kim and Kai Chang. Wide-Stopband Bandpass Filters Using Asymmetric Stepped-Impedance Resonators. *IEEE Microwave and Component Letters*, 2013, 2, 69–71.
- [7] Xin Dai, Xiu Yin Zhang, Hsuan-Ling Kao, et al. LTCC Band-pass Filter With Wide Stopband Based on Electric and Magnetic Coupling Cancellation. *IEEE Transaction on IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol*, 2014, 10, 1705–1713.
- [8] L. Hepburn and Jiasheng Hong. Compact Integrated Lumped Element LCP Filter. *IEEE Microwave and Component Letters*, 2016, 1, 19–21.
- [9] Hai Hoang Ta and Anh-Vu Pham. Compact Wide Stopband Bandpass Filter on Multilayer Organic Substrate. *IEEE Microwave and Component Letters*, 2014, 3, 161–163.

[10] Беляев Б.А., Бальва Я.Ф., Сержантов А.М., Лексиков Ан.А., Галеев Р.Г. Миниатюрный многопроводниковый полосковый резонатор на многослойной подвешенной подложке. *Известия высших учебных заведений. Физика*, 2015, 10 (3), 159–161 [Belyaev B.A., Bal'va Ya.F., Serzhanov A.M., Leksikov An.A., Galeev R.G. A miniature multiconductor stripline resonator based on a multilayer suspended substrate. *Russian Physics Journal*, 2015, 10 (3), 159–161 (in Russian)]