

11.1

Высокоселективный полосковый фильтр нижних частот с уровнем заграждения более 100 dB в широкой полосе

© Б.А. Беляев^{1,2}, А.М. Сержантов², Ан.А. Лексиков¹, Я.Ф. Бальва¹, Е.О. Грушевский¹, С.А. Ходенков³¹ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия³ Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

Поступило в Редакцию 14 января 2020 г.

В окончательной редакции 14 января 2020 г.

Принято к публикации 23 января 2020 г.

Разработана новая миниатюрная конструкция высокоселективного фильтра нижних частот на подвешенной подложке с двусторонним рисунком полосковых проводников. Крутизна склона амплитудно-частотной характеристики фильтра и глубина полосы заграждения определяются нулями коэффициента передачи, число которых равно порядку фильтра. Синтез экспериментального образца фильтра нижних частот пятого порядка на подложке из поликора толщиной 0.5 mm с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 9.8$ проведен на основе численного электродинамического анализа его 3D-модели. Частота среза полосы пропускания фильтра, измеренная по уровню -1 dB, составляет $f_c = 1.75$ GHz, а протяженность полосы заграждения по уровню -100 dB достигает величины $4.4f_c$.

Ключевые слова: фильтр нижних частот, подложка, полосковый резонатор, полоса заграждения.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.08.49300.18203

Известно, что фильтры сверхвысоких частот (СВЧ) являются важнейшими элементами в системах связи, радиолокации, радионавигации и в измерительной радиоаппаратуре [1,2]. В радиотехнике особенно востребованы полосно-пропускающие фильтры, однако во многих случаях необходимы фильтры нижних частот (ФНЧ), которые с малыми потерями пропускают электромагнитные волны в полосе от нуля до заданной частоты среза f_c , обеспечивая заграждение от помех в высокочастотной области. В настоящее время растет потребность в сверхширокополосных полосно-пропускающих фильтрах [3,4] для систем связи с большими скоростями передачи информации. Такие сверхширокополосные фильтры, в частности, легко реализуются каскадным соединением ФНЧ с фильтрами верхних частот [5]. Отметим, что характеристики фильтров зачастую определяют качество, а их размеры — габариты СВЧ-устройств. Поэтому разработка новых миниатюрных конструкций ФНЧ, обладающих высокой избирательностью и малыми потерями в полосе пропускания, — важная и актуальная задача.

В технике СВЧ широко используются миниатюрные конструкции ФНЧ, изготовленные в виде монолитной структуры по технологии многослойных интегральных схем на основе керамик с низкой температурой отжига LTCC (low temperature co-fired ceramics) [6]. В таких фильтрах основой являются резонансные структуры, состоящие из квазисосредоточенных емкостных и индуктивных элементов [7], имеющих, как известно, сравнительно низкую собственную добротность, что и отражается на невысоких параметрах амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) таких устройств. Высокими параметрами АЧХ обладают двумерные конструкции ФНЧ

на микрополосковых резонаторах [8], но они имеют большие размеры. Кроме того, недостатком большинства известных конструкций микрополосковых ФНЧ является сравнительно малый уровень подавления помех в полосе заграждения. Этот недостаток отсутствует в новой конструкции миниатюрного высокоселективного фильтра нижних частот на подвешенной в металлическом корпусе диэлектрической подложке с двусторонним рисунком полосковых проводников, который исследуется в настоящей работе.

На рис. 1, *a* представлена конструкция разработанного ФНЧ пятого порядка на подложке толщиной h_d , подвешенной в металлическом корпусе с воздушным зазором h_a от поверхностей подложки до стенок корпуса. В фильтре к полосковой линии на верхней стороне подложки, соединяющей его вход и выход с волновым сопротивлением портов 50Ω , подключены пять полосковых шлейфов со свободными противоположными концами. На нижней стороне подложки строго под каждым из этих шлейфов находятся отрезки полосковых проводников, имеющих ту же ширину, что и шлейфы. Один из концов этих проводников свободен, а другой замкнут на металлический корпус фильтра. Шлейфы вместе с отрезками полосковых проводников образуют резонаторы, которые на эквивалентной схеме (рис. 1, *b*) представлены последовательными контурами $L_{Si} C_i$ ($i = 1-3$). Рассматриваемая конструкция фильтра симметрична относительно входа и выхода, что отражено в обозначениях индуктивностей и емкостей на эквивалентной схеме.

Отличие такого фильтра от известных конструкций заключается в том, что его резонаторы электромагнитно

Номиналы элементов эквивалентных схем и величин коэффициентов связи резонаторов ФНЧ

Фильтр	L_1 , нН	L_2 , нН	L_3 , нН	L_{S1} , нН	L_{S2} , нН	L_{S3} , нН	C_1 , пФ	C_2 , пФ	C_3 , пФ	$k_{13} \cdot 10^{-3}$	$k_{24} \cdot 10^{-3}$	$k_{15} \cdot 10^{-6}$
Исследуемый	5.90	11.28	13.58	2.37	4.80	0.308	3.63	3.33	5.55	3.544	17.0	5.0
Классический	8.4	16.48	17.32	—	—	—	4.88	5.61	5.72	—	—	—

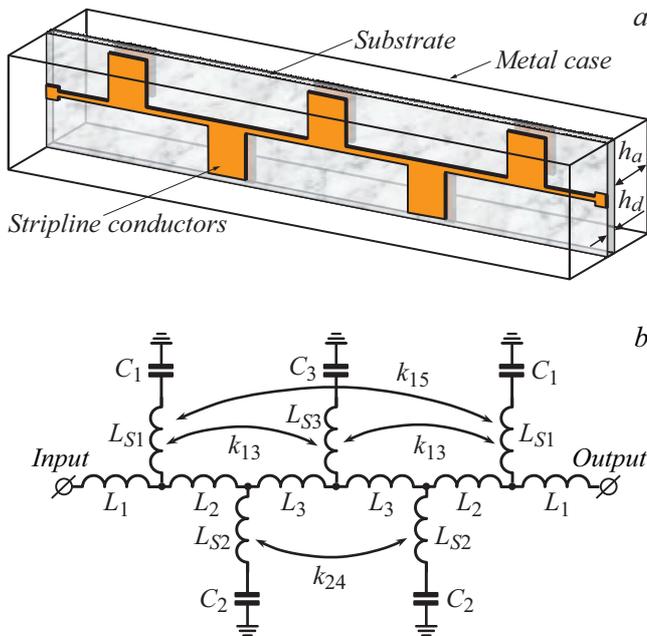


Рис. 1. Конструкция (а) и эквивалентная схема (b) высокоселективного ФНЧ пятого порядка.

связаны между собой. В результате, регулируя величину связей резонаторов параметрами топологии проводников, удастся после настройки фильтра получить в полосе заграждения его амплитудно-частотной характеристики нули коэффициента передачи, количество которых равно порядку фильтра. Это подтверждает расчет АЧХ, выполненный с использованием эквивалентной схемы пятирезонаторной конструкции фильтра, который для определенности настраивался так, чтобы его частота среза была равна $f_c = 1 \text{ GHz}$. Частотная зависимость прямых потерь ФНЧ после его настройки представлена сплошной линией на рис. 2, а номиналы элементов эквивалентной схемы исследуемого фильтра и величин коэффициентов связи его резонаторов k_{ij} приведены в таблице.

Для сравнения на рис. 2 штриховой линией показана характеристика классического ФНЧ пятого порядка с той же частотой среза $f_c = 1 \text{ GHz}$. Видно, что классический ФНЧ значительно уступает по селективным свойствам предложенной конструкции. Номиналы элементов эквивалентной схемы классического фильтра в соответствии с обозначениями на рис. 1, b также приведены в таблице. Важно отметить, что частоты

нулей коэффициента передачи в полосе заграждения предложенного ФНЧ можно изменять в широких пределах варьированием величин элементов эквивалентной схемы, что позволяет увеличивать не только крутизну склона АЧХ, но и затухание в полосе заграждения, причем на определенных частотах можно устанавливать особенно сильное подавление помех.

Объективно сравнить частотно-селективные свойства предложенного и классического фильтров удобно по крутизне склона АЧХ, которая вычисляется по формуле [8]:

$$K = \frac{\Delta f_3}{\Delta f_{30} - \Delta f_3}, \quad (1)$$

где Δf_3 — ширина полосы пропускания фильтра по уровню -3 dB от уровня минимальных потерь, Δf_{30} — ширина полосы пропускания по уровню -30 dB , измеренная также от уровня минимальных потерь. В результате крутизна склона АЧХ у классического фильтра $K \approx 6.7$, а у предложенного фильтра $K \approx 14.3$, т.е. более чем в 2 раза выше.

Для экспериментальной проверки работоспособности исследуемой полосковой конструкции фильтра нижних частот (рис. 1, а) на основе численного электродинамического анализа с помощью программы CST Microwave Studio был проведен параметрический синтез 3D-модели ФНЧ путем подбора размеров топологии полосковых проводников. Подложка полосковой структуры толщиной 0.5 mm выполнена из поликора, традиционно используемого в СВЧ-технике, имеющего относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 9.8$. Расстояние от поверхностей подложки до границ металлического корпуса $h_a = 5 \text{ mm}$. Отметим, что единственное ограничение при синтезе исследуемой конструкции накладывалось на длину полосковой структуры, которая не должна превышать максимальный размер стандартных поликоровых подложек — 60 mm . Частота среза синтезированного фильтра по уровню -1 dB получилась $f_c = 1.75 \text{ GHz}$, при этом длина подложки конструкции была дополнительно уменьшена за счет изгибов наружных отрезков проводников полосковой структуры, к которым подключаются вход и выход. Топология полосковых проводников синтезированного фильтра с размерами ее элементов, измеренными в миллиметрах, показана на рис. 3, а. Ширина внутренних самых узких проводников полосковой структуры равна 0.1 mm (этот размер на рис. 3, а не показан).

На рис. 3, b представлены частотные зависимости прямых потерь S_{21} и потерь на отражение S_{11} изготов-

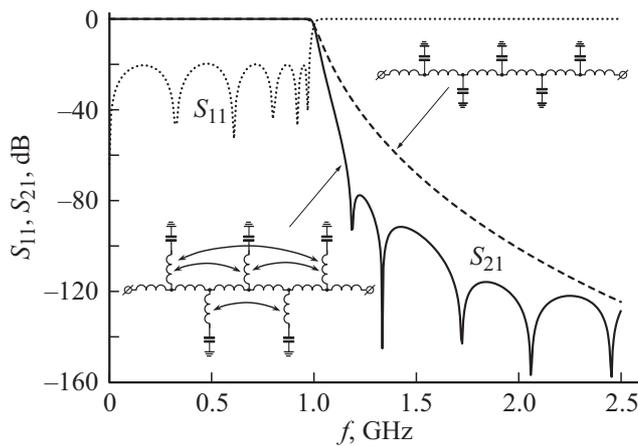


Рис. 2. АЧХ фильтров нижних частот пятого порядка, настроенных с использованием эквивалентных схем предложенной (сплошная линия) и классической (штриховая линия) конструкций. Пунктир — частотная зависимость потерь на отражение.

ленного методом фотолитографии экспериментального образца фильтра, измеренные на векторном анализаторе цепей R&S ZVA 40, динамический диапазон которого превышает 150 dB. Здесь же сплошной линией показана рассчитанная характеристика $S_{21}(f)$, которая, как видно, хорошо совпадает с измеренной АЧХ. Изготовленный фильтр имеет частоту среза полосы пропускания $f_c = 1.75$ GHz при уровне потерь на отражение не более -20 dB в этой полосе и протяженную полосу заграждения, которая по уровню -100 dB простирается до частоты, в 4.4 раза превышающей частоту среза полосы пропускания. Вносимое затухание в центре полосы пропускания изготовленного фильтра составило всего лишь 0.15 dB.

Важно отметить, что протяженность полосы заграждения разработанного фильтра можно существенно увеличить, если использовать подложки с меньшей толщиной или подложки с большей относительной диэлектрической проницаемостью. При этом, очевидно, уменьшается длина резонаторов, а соответственно уменьшаются и габариты всего фильтра. В меньшей степени протяженность высокочастотной полосы заграждения растет с увеличением расстояния от поверхностей подвешенной подложки до экранов.

Таким образом, исследована новая миниатюрная конструкция ФНЧ на подвешенной подложке с двусторонним рисунком полосковых проводников, обладающая высокими частотно-селективными свойствами. Крутизна склона АЧХ фильтра и глубина его полосы заграждения определяются нулями коэффициента передачи, число которых равно порядку фильтра. Миниатюрность фильтра связана с тем, что элементы его резонаторов, участвующих в образовании полосы пропускания, для нижайшей первой моды колебаний представляют собой квазисосредоточенные емкости и индуктивности.

При этом широкая полоса заграждения разработанного ФНЧ обусловлена высокими частотами резонансов паразитных высших мод колебаний полосковой конструкции. Эффективность представленной разработки доказана высокими характеристиками изготовленного экспериментального образца фильтра пятого порядка, синтез которого проведен на основе численного электродинамического анализа его 3D-модели. Важно отметить хорошее согласие рассчитанных характеристик ФНЧ с результатами измерений экспериментального образца фильтра.

Габариты изготовленного фильтра на подложке из поликора толщиной 0.5 mm с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 9.8$ составляют $\sim 52 \times 11 \times 9$ mm. При этом ФНЧ имеет частоту среза полосы пропускания по уровню -1 dB $f_c = 1.75$ GHz, а протяженность полосы заграждения по уровню -100 dB наблюдается до частоты $4.4f_c$. Разработанный фильтр нижних частот благодаря миниатюрности и высоким характеристикам является весьма перспективным при конструировании сверхширокополосных полосно-пропускающих фильтров, создаваемых традиционным способом [5] — каскадным соединением ФНЧ с фильтром верхних частот. При этом, очевидно, у такого полосно-пропускающего фильтра будет не только высокая крутизна склонов АЧХ, но и сильное подавление помех в полосах заграждения.

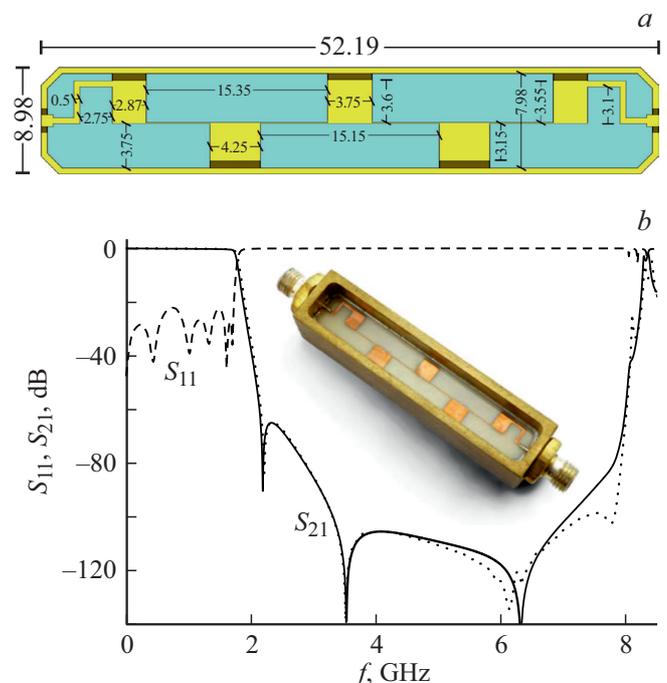


Рис. 3. *a* — топология и размеры (в mm) проводников экспериментального образца ФНЧ; *b* — измеренные частотные зависимости прямых потерь (пунктир) и потерь на отражение (штриховые линии). Сплошная линия — расчет. На вставке представлена фотография экспериментального образца.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 02.G25.31.0330.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Hunter I.C.* Theory and design of microwave filters. IET Electromagnetic Waves Ser. V. 48. Cambridge: University Press, 2006. 353 p.
- [2] *Morgan M.A.* Reflectionless filters. Artech House Microwave Library. Boston–London: Artech House, 2017. 258 p.
- [3] *Kolmakov Ya.A., Vendik I.B.* // Proc. of the 35th Eur. Microwave Conf. Paris, France, 2005. V. 1. Paper N 1608783. P. 21–24.
- [4] *Беляев Б.А., Ходенков С.А., Лексиков А.А., Шабанов В.Ф.* // ДАН. 2017. Т. 474. № 6. С. 682–686.
- [5] *Hsu C.-L., Hsu F.-C., Kuo J.-T.* // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest. 2005. Paper N 1516698. P. 679–682.
- [6] *Piatnitsa V., Kholodnyak D., Tick T., Simin A., Turalchuk P., Zameshaeva E., Janiti J., Jantunen H., Vendik I.* // Proc. of the 37th European Microwave Conf. Munich, Germany, 2007. Paper N 4405248. P. 544–547.
- [7] *Hong J.-S.* Microstrip filters for RF/microwave applications. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 2011. 656 p.
- [8] *Беляев Б.А., Ходенков С.А., Шабанов В.Ф.* // ДАН. 2019. Т. 485. № 1. С. 27–32.