

УДК 621.372

С.А. Ходенков, Н.А. Шепета, О.В. Дианова

Полосно-пропускающий СВЧ-фильтр

Исследованы конструкции сверхширокополосного фильтра на микрополосковом многомодовом резонаторе со шлейфами. Трехмерные модели полосно-пропускающего сверхвысокочастотного фильтра синтезированы при помощи численного электродинамического анализа. В расчетах в качестве подложки использовалась монолитная пластина поликора с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 9,8$. Показано, что увеличение числа сворачиваний полоскового проводника многомодового резонатора фильтра сопровождается улучшением его селективных свойств.

Ключевые слова: СВЧ-фильтр, многомодовый резонатор, численный электродинамический анализ, полоса пропускания, параметрический синтез.

Как известно, в Российской Федерации информационно-телекоммуникационные системы относятся к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники. Их основная задача – стабильная высокоскоростная передача данных и своевременный качественный доступ потребителей к необходимой им информации. Поэтому в настоящее время актуальны и востребованы исследования, направленные на разработку устройств, способствующих расширению каналов передачи данных.

Таким образом, модернизация уже известных и разработок новых конструкций сверхширокополосных фильтров сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона, используемых в узлах связи систем тропосферной и космической связи, – актуальная и важная задача, поставленная перед разработчиками современной радиоаппаратуры.

При этом стоит отметить, что среди полосно-пропускающих СВЧ-фильтров хорошо себя зарекомендовали фильтры в микрополосковом исполнении. Общеизвестно, что они имеют высокую селективность [1–3], миниатюрны [4, 5], технологичны в изготовлении и обладают сравнительно невысокой себестоимостью производства при изготовлении крупных партий.

Однако традиционные подходы в разработке таких фильтров, например, с использованием только одномодовых микрополосковых резонаторов [6], по сути, практически исчерпали свои возможности. Кроме того, относительная ширина полосы пропускания $\Delta f/f_0$ таких СВЧ-конструкций практически не превышает 40%.

Исследования микрополосковых структур на многомодовом резонаторе, построенных по аналогии с одномерными фотонными кристаллами, показали возможности реализации фильтров на их основе с достаточно широкими полосами пропускания [7]. Однако применение такого подхода в разработке сверхширокополосных фильтров не позволяет им реализовать высокие частотно-селективные свойства. Существенное расширение полосы пропускания фильтров сопровождается неприемлемым сужением их высокочастотной полосы заграждения.

При этом использование в конструкциях многомодовых микрополосковых резонаторов – в целом

перспективный подход, позволяющий конструировать сверхширокополосные СВЧ-фильтры [8]. Это способствует не только уменьшению размеров частотно-селективных устройств, но и существенному расширению их полос пропускания за счет «расталкивания» нижайших мод колебаний.

Рассмотрим конструкцию сверхвысокочастотного полосового фильтра (рис. 1). Полосковый проводник многомодового резонатора микрополосковой конструкции свернут в виде меандровой линии, при этом предложенный резонатор отличается от аналогичных многомодовых резонаторов, например исследованных в работе [9], наличием двух шлейфов. Его полосковый проводник состоит из пяти последовательно соединенных друг с другом отрезков 1-2-3-2-1, причем с широкими отрезками 2 ортогонально состыкованы шлейфы – протяженные полосковые отрезки 4, заземленные с противоположного конца на основание конструкции.

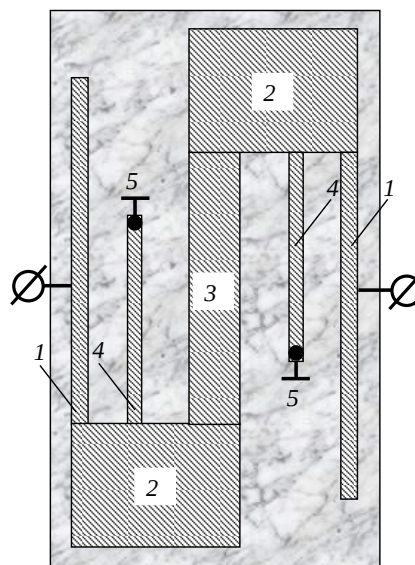


Рис. 1. Топология полосковых проводников сверхширокополосного микрополоскового фильтра четвертого порядка

Материал диэлектрической подложки конструкции – монолитная пластина поликора толщиной $h = 1,00$ мм. Заземление 5 отрезков 4 полоскового проводника на основание конструкции реализовано

вано в виде отверстий в подложке высотой $h = 1,00$ мм с одинаковым диаметром $d = 0,45$ мм и заполнено проводящим материалом – медью.

Важно отметить, что использование в предложенном многомодовом резонаторе пары шлейфов позволяет существенно расширить полосу пропускания фильтра, реализованного на его основе. Так, увеличивая длину шлейфов, можно достаточно просто реализовать фильтр с более широкой полосой пропускания, чем у сверхширокополосных фильтров, исследованных в работе [9].

При этом исследование двух рассмотренных в настоящей работе конструкций полосно-пропускающего СВЧ-фильтра были проведены при помощи численного электродинамического анализа трехмерных моделей. Для определенности частоты полосы пропускания были зафиксированы от 1,0 до 3,0 ГГц. Таким образом, относительная ширина полосы пропускания $\Delta f/f_0$ конструкций 100%.

Видно (рис. 2), что полосу пропускания исследованного фильтра-резонатора формируют четыре резонанса. Также на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) конструкции наблюдается пара полюсов затухания, расположенных на частотах высокочастотной полосы заграждения, они способствуют росту крутизны высокочастотного склона полосы пропускания, а также увеличению подавления мощности в полосе заграждения.

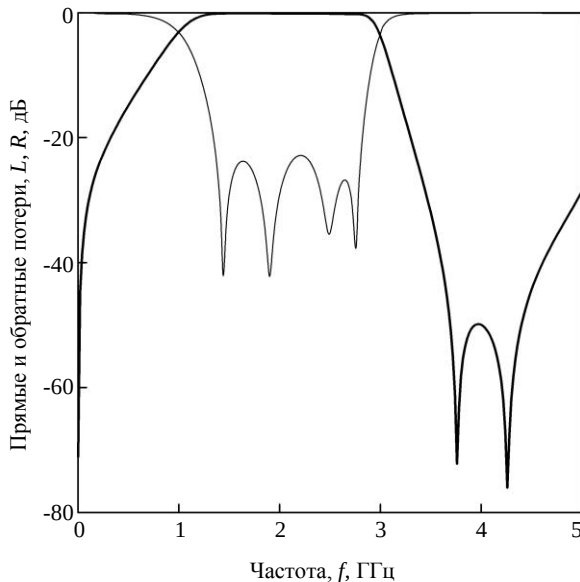


Рис. 2. АЧХ сверхширокополосного микрополоскового фильтра четвертого порядка

Существует несколько вариантов улучшения частотно-селективных свойств такого фильтра, один из них – увеличение числа сворачиваний полоскового проводника многомодового резонатора, как это показано на рис. 3.

В такой конструкции свернутый полосковый проводник многомодового резонатора с тремя шлейфами образован состыкованными отрезками 1-2-3-4-3-2-1, а также заземленными с одного конца на основание конструкции отрезками 5 и 6.

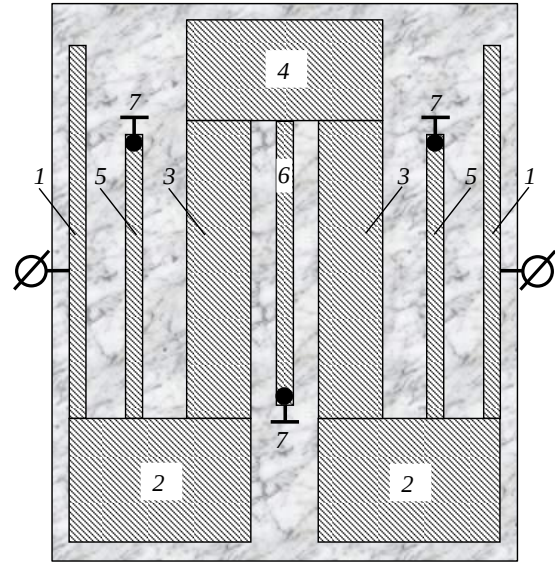


Рис. 3. Топология полосковых проводников сверхширокополосного микрополоскового фильтра пятого порядка

Такое конструктивное решение позволяет увеличить число резонансов, формирующих полосу пропускания микрополоскового фильтра, до пяти, что сопровождается ростом крутизны ее склонов (рис. 4) при незначительном росте минимальных потерь на прохождение мощности $L_{\min}$ на ее частотах от 0,13 до 0,16 дБ.

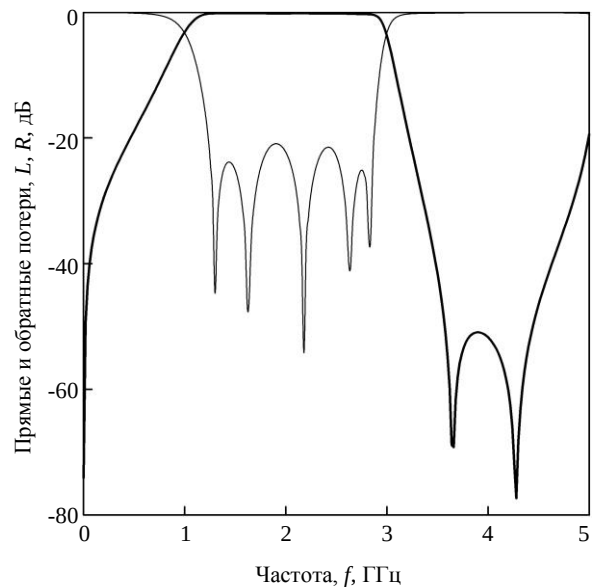


Рис. 4. АЧХ сверхширокополосного микрополоскового фильтра пятого порядка

Геометрические размеры отрезков полосковых проводников многомодовых резонаторов двух рассмотренных конструкций приведены в таблице.

Расстояние между отрезками 1 и 4 полоскового проводника в первой СВЧ-конструкции – 1,30 мм, между отрезками 1 и 5 во второй СВЧ-конструкции – 1,20 мм.

Габариты конструкций с учетом отступов на расстояние $h = 1$ мм от полоскового проводника четырех- и пятимодового резонатора до края диэлек-

трической подложки составили $18,90 \times 11,30$ и $17,70 \times 14,90$ мм², соответственно.

Геометрические размеры отрезков полосковых проводников резонаторов СВЧ-конструкций

№ п/п	Топология полоскового проводника	Позиция отрезка полоскового проводника на рисунке	Размеры отрезков полосковых проводников	
			Длина отрезка	Ширина отрезка
1	Рис. 1	1	11,25	0,55
2		2	5,50	4,10
3		3	8,80	1,70
4		4	6,70	0,40
5	Рис. 3	1	11,25	0,55
6		2	5,45	3,75
7		3	9,00	1,90
8		4	5,80	2,95
9		5	8,50	0,40
10		6	8,55	0,40

Очевидно, что увеличение числа сворачиваний полоскового проводника резонатора со шлейфами сопровождается пропорциональным увеличением числа резонансов, формирующих полосу пропускания сверхширокополосного фильтра.

Важно отметить, что варьирование протяженности полоскового проводника шлейфов позволяет монотонно расширять или сужать полосу пропускания фильтра в достаточно широких пределах.

Таким образом, предложен новый фильтр с широкой полосой пропускания, реализованный с использованием всего одного многомодового микрополоскового резонатора со шлейфами. Полосковый проводник резонатора конструкции выполнен в виде меандровой линии, а ее высокие селективные свойства обусловлены малыми потерями мощности на частотах полосы пропускания и сравнительно высокой прямоугольностью амплитудно-частотной характеристики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № FEFE-2020-0013).

Литература

1. A Microstrip Bandpass Filter With Ultra-Wide Stopband / C.-W. Tang, Y.-K. Hsu // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2008. – Vol. 56, No. 6. – P. 1468–1472.
2. High-Selectivity Single- and Dual-Resonator Microstrip Filters / G.M. Aristarkhov, N.V. Zvezdinov // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2017. – Vol. 62, No. 8. – P. 916–920.

3. Microstrip U-Shaped Resonators / A.V. Zakharov, I.Ye. Ilchenko, L.S. Pinchuk // Radioelectronics and Communications Systems. – 2012. – Vol. 55, No. 8. – P. 368–374.

4. Compact Filter Configurations Using Concentric Microstrip Open-Loop Resonators / L. Athukorala, D. Budimir // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2012. – Vol. 22, No. 5. – P. 245–247.

5. A Compact and Sharp Rejection Ultra-Wideband Bandpass Filter Based on Short and Open Stub-Loaded Multiple Mode Resonators / M. Danaeian, E. Zarezadeh, M.H. Gholizadeh, A.-R. Moznebi, J. Khalilpour // Journal of Electrical Engineering & Technology. – 2019. – Vol. 15, No. 6. – P. 469–476.

6. Microstrip Spurious-Coupling Band-Pass Filters with Quarter-Wavelength and Π -Shaped Resonators / A.V. Zakharov, S.A. Rozenko // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2019. – Vol. 64, No. 4. – P. 430–438.

7. Analysis of Microstrip Analogues of Bandpass Filters on One-Dimensional Photonic Crystals / B.A. Belyaev, A.S. Voloshin, V.F. Shabanov // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2006. – Vol. 51, No. 6. – P. 653–659.

8. Compact Ultra-Wideband Bandpass Filter Using Dual-Line Coupling Structure / K. Son, Y. Fan // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2009. – Vol. 19, No. 1. – P. 30–32.

9. Investigation of Microstrip Structures of Wideband Bandpass Filters / B.A. Belyaev, S.A. Khodenkov, R.G. Galeev, V.F. Shabanov // Doklady Physics. – 2015. – Vol. 60, No. 3. – P. 95–101.

Ходенков Сергей Александрович

Канд. техн. наук, доцент, вед. н.с. научно-исследовательской лаб. Института информатики и телекоммуникаций (НИЛ ИИТК) Сибирского государственного университета науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева (СибГУ им М.Ф. Решетнева) Имени газеты «Красноярский рабочий» пр-т, 31, г. Красноярск, Россия, 660037
Тел.: +7-923-306-87-92
Эл. почта: hsa-sibsau@mail.ru

Шепета Наталья Александровна

Канд. физ.-мат. наук, доцент, с.н.с. НИЛ ИИТК СибГУ им. М.Ф. Решетнева Имени газеты «Красноярский рабочий» пр-т, 31, г. Красноярск, Россия, 660037
Тел.: +7-906-917-66-43
Эл. почта: nashka116@mail.ru

Дианова Оксана Викторовна

Инженер НИЛ ИИТК СибГУ им. М.Ф. Решетнева Имени газеты «Красноярский рабочий» пр-т, 31, г. Красноярск, Россия, 660037
Тел.: +7-933-200-19-02
Эл. почта: ettk@bk.ru