

## Раздел II. Моделирование процессов, устройств и систем

УДК 621.372

DOI 10.18522/2311-3103-2020-5-68-74

А.Н. Зикий, П.Н. Зламан

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ФИЛЬТРОВ САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

*Полосовые фильтры являются неотъемлемой составной частью любой радиоприемной аппаратуры. Именно они определяют избирательность приемника по всем каналам приема. Целью настоящей работы является моделирование двух микрополосковых фильтров сантиметрового диапазона волн. Объектом исследования в данной работе являются два микрополосковых фильтра на частоты 5,75 и 4,6 ГГц. Такие фильтры можно использовать в конвертере сантиметрового диапазона волн в качестве сигнального и гетеродинного фильтров. Проведено моделирование двух фильтров в среде Microwave Office. Представлены результаты в виде моделей двух фильтров и четырех амплитудно-частотных характеристик. Даны геометрические размеры фильтров, достаточные для их изготовления на материале RT5870 фирмы Роджерс. Фильтры имеют ширину полосы пропускания 200 МГц и потери в полосе пропускания не более 3 дБ. Потери в полосе заграждения для сигнального фильтра составили не менее 45 дБ, и не менее 35 дБ для гетеродинного фильтра, что является очень хорошим результатом для двухзвенного фильтра. Приемлемые электрические параметры, малые габариты и умеренная стоимость изготовления фильтров позволяет их широко использовать в профессиональной и радиолюбительской аппаратуре. Для повышения технологичности изготовления выбран материал с малой диэлектрической проницаемостью. При этом зазоры и допуски на точность их изготовления получаются приемлемыми. Конструкция фильтров позволяет их легко интегрировать с другими узлами конвертера: малошумящим усилителем, смесителем, усилителем промежуточной частоты, усилителем в гетеродинном тракте.*

*Микрополосковый фильтр; амплитудно-частотная характеристика; топология; геометрические размеры; моделирование.*

A.N. Zikiy, P.N. Zlaman

### MODELING OF TWO MICROSTRIP FILTERS OF THE CENTIMETER RANGE

*Band-pass filters are an integral part of any radio equipment. They determine the selectivity of the receiver for all channels of reception. The aim of this work is to modelling two microstrip filters of the centimeter wave range. The object of study in this work are two microstrip filters at a frequency of 5.75 GHz and 4.6 GHz. Such filters can be used in the converter of the centimeter wave range as a signal and heterodyne filters. Two filters were simulated in the Microwave Office environment. The results are presented in the form of models of two filters and four amplitude-frequency characteristics. Given are the geometric dimensions of the filters, sufficient for their manufacture on material RT5870 of Rogers company. Filters have a bandwidth of 200 MHz and a loss in bandwidth of not more than 3 dB. Losses in the stop band for the signal filter were at least 45 dB, and at least 35 dB for the heterodyne filter, which is a very good result for a two-pole filter. Acceptable electrical parameters, small dimensions and moderate cost of manufacturing filters allows them to be widely used in professional and amateur radio equipment. To improve the manufacturability of manufacturing, a material with a low dielectric constant was selected. At the same time, gaps and tolerances on the*

accuracy of their manufacture are acceptable. The design of the filters allows them to be easily integrated with other components of the converter: a low-noise amplifier, a mixer, an intermediate frequency amplifier, an amplifier in the local oscillator path.

Microstrip filter; amplitude-frequency characteristic; topology; geometric dimensions; modeling.

**Введение.** При проектировании конвертора сантиметрового диапазона понадобились два фильтра – сигнальный и гетеродинный. Поскольку требования к фильтрам невысокие (табл. 1), было принято решение выполнить их на общей подложке с мал шумящим усилителем, смесителем и усилителем промежуточной частоты. Микрополосковые фильтры могут быть выполнены с разной электродинамической структурой:

- ◆ на полуволновых резонаторах с четвертьволновыми связями [1];
- ◆ на встречных стержнях с четвертьволновыми резонаторами [1];
- ◆ гребенчатые фильтры с длиной резонаторов  $\lambda/8$  и  $\lambda/16$  [1];
- ◆ шлейфовые фильтры на однородных резонаторах [1];
- ◆ шлейфовые фильтры на неоднородных резонаторах.

Были выбраны фильтры с двумя полуволновыми резонаторами и четвертьволновыми связями [1, 2] на несимметричной микрополосковой линии передачи. Выбранный тип фильтра удобен как в изготовлении, так и в настройке.

К фильтрам предъявляются следующие требования, изложенные в табл. 1.

Таблица 1

**Требования к фильтрам**

Наименование параметра, размерность	Фильтр 1	Фильтр 2
Диапазон рабочих частот, ГГц	5,65-5,85	4,5-4,7
Потери в полосе пропускания, не более, дБ	3	3
Потери в полосе заграждения зеркальной частоты 3,35-3,55 ГГц не менее, дБ	30	30
Потери в полосе заграждения от 7,3 до 11 ГГц не менее, дБ	30	-
Потери в полосе заграждения от 6 до 9 ГГц не менее, дБ	-	30
Входное и выходное сопротивление, Ом	50	50
Число резонаторов	2	2

**Конструкция сигнального фильтра.** Топология исследуемого сигнального фильтра показана на рис. 1.



Рис. 1. Топология фильтра 1

Для изготовления конвертора и входящих в него фильтров выбран материал RT5870 фирмы Роджерс [3–6]. Этот материал имеет малые диэлектрические потери, высокую стабильность относительной диэлектрической проницаемости и может работать на исследуемых частотах.

Расчет сигнального фильтра проводился по методике из книги [1]. Результаты расчета приведены в табл. 2. Эти данные будем считать первым приближением, а второе приближение предполагается получить на модели.

Таблица 2

### Геометрические размеры сигнального фильтра

Позиционное обозначение	Ширина, мм	Длина, мм	Наименование
w1	1	8.84	подводящий проводник
w2	2.5	8.84	резонатор
w3	2.5	8.84	резонатор
w4	2.5	8.84	резонатор
w5	2.5	8.84	резонатор
w6	1	8.84	подводящий проводник
s1	0.3	8.84	зазор
s2	1.3	8.84	зазор
s3	0.3	8.84	зазор

**Конструкция гетеродинного фильтра.** Конструкция гетеродинного фильтра такая же, как и сигнального. Результаты расчета гетеродинного фильтра приведены в табл. 3.

Таблица 3

### Геометрические размеры гетеродинного фильтра

Позиционное обозначение	Ширина, мм	Длина, мм	Наименование
w1	1	11,2	подводящий проводник
w2	2.5	11,2	резонатор
w3	2.5	11,2	резонатор
w4	2.5	11,2	резонатор
w5	2.5	11,2	резонатор
w6	1	11,2	подводящий проводник
s1	0.3	11,2	зазор
s2	1.3	11,2	зазор
s3	0.3	11,2	зазор

**Моделирование.** Моделирование двух фильтров проведено в пакете прикладных программ Microwave Office (MWO) [7, 8]. Модель сигнального фильтра приведена на рис. 2.

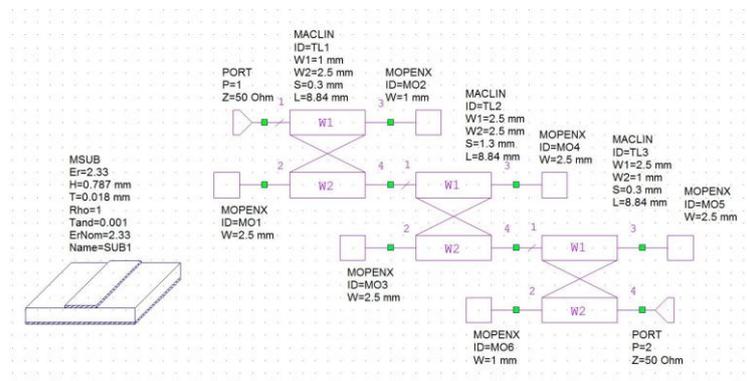


Рис. 2. Модель фильтра 1 из MWO

Для показа ложной полосы пропускания приведена АЧХ сигнального фильтра в полосе от 3 до 12 ГГц (рису 3). Амплитудно-частотная характеристика этого фильтра из MWO в полосе 5–6,5 ГГц приведена на рис. 4. Анализ гетеродинного фильтра представлен на рис. 5–7.

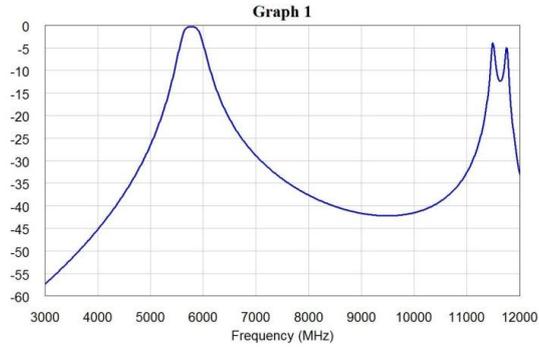


Рис. 3. АЧХ фильтра 1 в полосе 3-12 ГГц

Из рис. 3 видно, что ложная полоса пропускания на частоте  $2f_0$  не подавляется, а заграждение на частотах зеркального канала 3,35–3,55 ГГц больше требуемого.

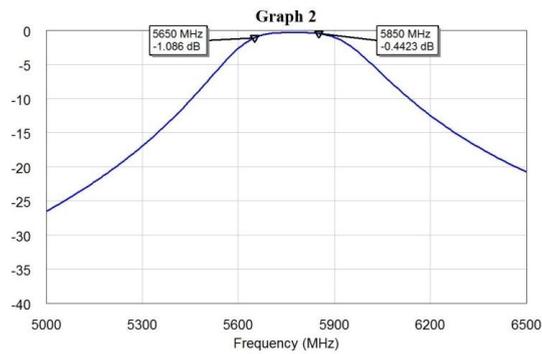


Рис. 4. АЧХ фильтра 1 в полосе 5–6,5 ГГц

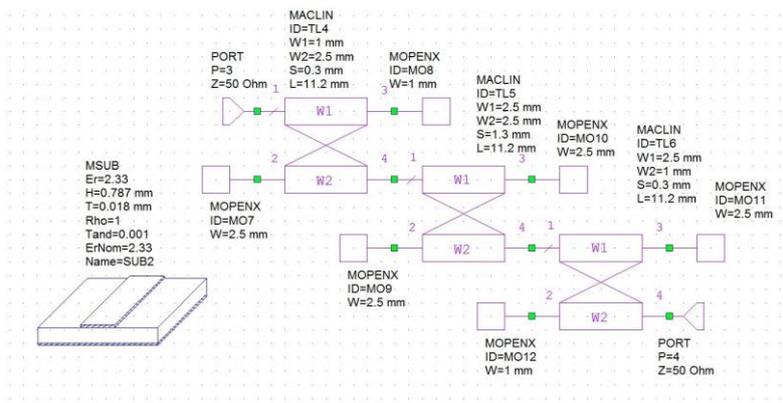


Рис. 5. Модель фильтра 2 из MWO

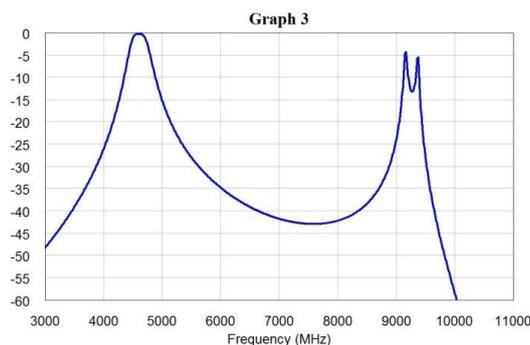


Рис. 6. АЧХ фильтра 2 в полосе 3–11 ГГц

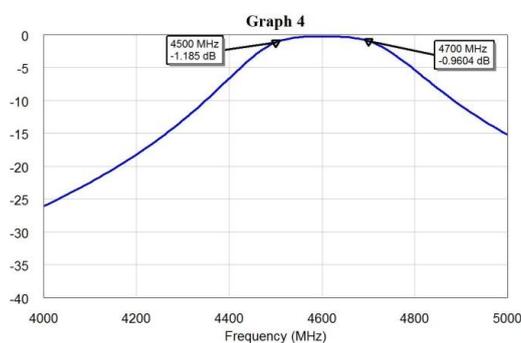


Рис. 7. АЧХ фильтра 2 в полосе 4–5 ГГц

**Выводы.** Ниже в табл. 4 сведены заданные и достигнутые при моделировании параметры фильтров.

Таблица 4

#### Основные параметры фильтров

Наименование параметра, размерность	Фильтр 1		Фильтр 2	
	задано	получено	задано	получено
Диапазон рабочих частот, ГГц	5,65–5,85	5,65–5,85	4,5–4,7	4,5–4,7
Потери в полосе пропускания не более, дБ	3	1,5	3	1,5
Потери в полосе заграждения зеркальной частоты 3,35–3,55 ГГц не менее, дБ	30	>45	30	>35
Потери в полосе заграждения от 7,3 до 11 ГГц не менее, дБ	30	>30	-	-
Потери в полосе заграждения от 6 до 9 ГГц не менее, дБ	–	–	30	>35
Входное и выходное сопротивление, Ом	50	50	50	50
Число резонаторов	2	2	2	2

Из этой таблицы видно, что все требования к фильтрам выполняются.

При выполнении данной работы были использованы сведения из статьи [9], а также предыдущий опыт авторов [10–14]. Выбору технического решения способствовало изучение и использование литературы [15–20], особенно примеров расчета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т.* Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. – М.: Связь, 1971. – Т. 1. – 451 с. Т. 2. – 494 с.
2. *Зелях Э.В., Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Брилон В.С.* Миниатюрные устройства УВЧ и ОВЧ диапазонов на отрезках линий. – М.: Радио и связь, 1989. – 112 с.
3. Design Equations for Broadside and Edgewise Stripline Couplers. Rogers Corporation. Design 3.2.1. – 2 p.
4. Width and Effective Dielectric Constant Equations for Design of Microstrip Transmission Lines. Rogers Corporation. Design 3.1.2. – 2 p.
5. RT/Duroid 5870/5880 High Frequency Laminates Fabrication Guidelines. Rogers Corporation. – 8 p.
6. RT/Duroid 5870/5880 High Frequency Laminates. Data Sheet. Rogers Corporation. – 2 p.
7. *Разевиг В.Д., Потанов Ю.В., Курушин А.А.* Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. – М.: Солон-Пресс, 2003. – 496 с.
8. *Бахвалова С.А., Романюк В.А.* Основы моделирования и проектирования радиотехнических устройств в Microwave Office: учеб. пособие. – М.: Солон-Пресс, 2016. – 152 с.
9. 6 cm FM ATV-Convertor from Alberto IK8UIF дата обращения 8.05.2020. – <http://home.kpn.nl/f2hjnlindeijer/532/6cm%20FMATV%20Converter.htm>.
10. *Андрианов А.В., Быков С.А., Зикий А.Н., Пустовалов А.И.* Микрополосковый фильтр на полуволновых резонаторах // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 2.
11. *Андрианов А.В., Быков С.А., Зикий А.Н., Пустовалов А.И.* Моделирование и экспериментальное исследование трактового фильтра сантиметрового диапазона // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 1.
12. *Андрианов А.В., Зикий А.Н., Зламан П.Н.* Моделирование и экспериментальное исследование микрополоскового фильтра на полуволновых резонаторах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016. – № 3. – С. 32-35.
13. *Андрианов А.В., Зикий А.Н., Пустовалов А.И.* Моделирование и экспериментальное исследование трактового фильтра на встречных стержнях // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4.
14. *Зикий А.Н., Лебедев В.К., Зламан П.Н., Матвиенко Р.Н.* Экспериментальное исследование двух фильтров дециметрового диапазона // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 8. – С. 178-185.
15. *Ханзел Г.* Справочник по расчету фильтров. – М.: Сов. Радио, 1974. – 288 с.
16. *Алексеев Л.В., Знаменский А.Е., Лоткова Е.Д.* Электрические фильтры метрового и дециметрового диапазонов. – М.: Связь, 1976. – 280 с.
17. *Алексеев О.В., Грошев Г.А., Чавка Г.Г.* Многоканальные частотно-разделительные устройства и их применение. – М.: Радио и связь, 1981. – 136 с.
18. *Леонченко В.П., Фельдштейн А.Л., Шепелянский Л.А.* Расчет полосковых фильтров на встречных стержнях. Справочник. – М.: Связь, 1975. – 312 с.
19. *Бова Н.Т., Ефремов Ю.Г., Конин В.В. и др.* Микроэлектронные устройства СВЧ. – Киев: Техника, 1984. – 184 с.
20. Микроэлектронные устройства СВЧ: учеб. пособие / под ред. Г.И. Веселова. – М.: Высшая школа, 1988. – 280 с.

REFERENCES

1. *Mattey D.L., Yang L., Dzhons E.M.T.* Fil'try SVCh, soglasuyushchie tsepi i tsepi svyazi [Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures]. Moscow: Svyaz', 1971, Vol. 1, 451 p. Vol. 2, 494 p.
2. *Zelyakh E.V., Fel'dshteyn A.L., Yavich L.R., Brilon V.S.* Miniatyurnye ustroystva UVCh i OVCh diapazonov na otrezkakh liniy [Miniature devices of UHF and VHF ranges on line segments]. Moscow: Radio i svyaz', 1989, 112 p.
3. Design Equations for Broadside and Edgewise Stripline Couplers. Rogers Corporation. Design 3.2.1, 2 p.
4. Width and Effective Dielectric Constant Equations for Design of Microstrip Transmission Lines. Rogers Corporation. Design 3.1.2, 2 p.
5. RT/Duroid 5870/5880 High Frequency Laminates Fabrication Guidelines. Rogers Corporation, 8 p.

6. RT/Duroid 5870/5880 High Frequency Laminates. Data Sheet. Rogers Corporation, 2 p.
7. Razevig V.D., Potapov Yu.V., Kurushin A.A. Proektirovanie SVCh ustroystv s pomoshch'yu Microwave Office [Design Microwave Devices Using Microwave Office]. Moscow: Solon-Press, 2003, 496 p.
8. Bakhvalova S.A., Romanyuk V.A. Osnovy modelirovaniya i proektirovaniya radiotekhnicheskikh ustroystv v Microwave Office: ucheb. posobie [Fundamentals of modeling and design of radio devices in the Microwave Office: tutorial]. Moscow: Solon-Press, 2016, 152 p.
9. 6 cm FM ATV-Convertor from Alberto IK8UIF дата обращения 8.05.2020. Available at: <http://home.kpn.nl/f2hjnlindeijer/532/6cm%20FMATV%20Converter.htm>.
10. Andrianov A.V., Bykov S.A., Zikiy A.N., Pustovalov A.I. Mikropoloskovyy fil'tr na poluvolnovykh rezonatorakh [Microstrip filter on half-wave resonators], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2017, No. 2.
11. Andrianov A.V., Bykov S.A., Zikiy A.N., Pustovalov A.I. Modelirovanie i eksperimental'noe issledovanie traktovogo fil'tra santimetrovogo diapazona [Modeling and experimental study of a centimeter-range channel filter], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2017, No. 1.
12. Andrianov A.V., Zikiy A.N., Zlaman P.N. Modelirovanie i eksperimental'noe issledovanie mikropoloskovogo fil'tra na poluvolnovykh rezonatorakh [Modeling and experimental study of a microstrip filter on half-wave resonators], *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy* [Electrical and data processing facilities and systems]. 2016. No. 3, pp. 32-35.
13. Andrianov A.V., Zikiy A.N., Pustovalov A.I. Modelirovanie i eksperimental'noe issledovanie traktovogo fil'tra na vstrechnykh sterzhnyakh [Simulation and experimental study of a interdigital path filter], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2016, No. 4.
14. Zikiy A.N., Lebedev V.K., Zlaman P.N., Matvienko R.N. Eksperimental'noe issledovanie dvukh fil'trov detsimetrovogo diapazona [An experimental study of two decimeter range filters], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 8, pp. 178-185.
15. Khanzel G. Spravochnik po raschetu fil'trov [Filter Calculation Reference]. Moscow: Sov. Radio, 1974, 288 p.
16. Alekseev L.V., Znamenskiy A.E., Lotkova E.D. Elektricheskie fil'try metrovogo i detsimetrovogo diapazonov [Electric filters of meter and decimeter ranges]. Moscow: Svyaz', 1976, 280 p.
17. Alekseev O.V., Groshev G.A., Chavka G.G. Mnogokanal'nye chastotno-razdelitel'nye ustroystva i ikh primeneniye [Multichannel frequency separation devices and their application]. Moscow: Radio i svyaz', 1981, 136 p.
18. Leonchenko V.P., Fel'dshteyn A.L., Shepelyanskiy L.A. Raschet poloskovykh fil'trov na vstrechnykh sterzhnyakh. Spravochnik [Calculation of interdigital band-pass filters]. Moscow: Svyaz', 1975, 312 p.
19. Bova N.T., Efremov Yu.G., Konin V.V. i dr. Mikroelektronnye ustroystva SVCh [Microelectronic Microwave Devices]. Kiev: Tekhnika, 1984, 184 p.
20. Mikroelektronnye ustroystva SVCh: ucheb. posobie [Microelectronic Microwave Devices: tutorial, ed. by G.I. Veselova. Moscow: Vysshaya shkola, 1988, 280 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. М.И. Дулин.

**Зикий Анатолий Николаевич** – Южный федеральный университет; e-mail: zikiy50@mail.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; к.т.н.; с.н.с.; доцент.

**Зламан Павел Николаевич** – e-mail: otдел24d@nkbmius.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; Научно-конструкторское бюро моделирующих и управляющих систем; ведущий инженер-конструктор.

**Zikiy Anatoliy Nikolaevich** – Southern Federal University; e-mail: zikiy50@mail.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, 347922, Russia; the department of information security of telecommunication systems; cand. of eng. sc.; senior researcher; associate professor.

**Zlaman Pavel Nikolaevich** – e-mail: otдел24d@nkbmius.ru; 81, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; Research and design Bureau of modeling and control systems; leading design engineer.