

УДК 621.372.8

## **Синтез компактных волноводных фильтров с эллиптической характеристикой<sup>1</sup>**

Крутиев С. В., Земляков В. В., Клещенков А. Б.  
*Физический факультет, Южный федеральный университет  
ул. Зорге, 5, Ростов-на-Дону, 344090, Российская Федерация  
sergey-kryt@yandex.ru*

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

**Аннотация:** В данной работе решена задача синтеза компактных волноводных фильтров с эллиптической характеристикой. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами измерений АЧХ изготовленных фильтров-прототипов. Подтверждена высокая точность и эффективность предлагаемых методики.

**Ключевые слова:** СВЧ фильтр, прямоугольный волновод, тонкая металлическая диафрагма, резонансные диафрагмы.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Крутиев С. В., Земляков В. В., Клещенков А. Б. Синтез компактных волноводных фильтров с эллиптической характеристикой // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 145—153.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011):** Крутиев, С. В. Синтез компактных волноводных фильтров с эллиптической характеристикой / С. В. Крутиев, В. В. Земляков, А. Б. Клещенков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 2. — С. 145—153.

---

<sup>1</sup> Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

# Synthesis of compact waveguide filters with an elliptic characteristic

S. V. Krutiev, V. V. Zemlyakov, and A. B. Kleshnikov  
*Faculty of Physics, Southern Federal University*  
*5, Zorge street, 344090, Rostov-on-Don, Russia*  
*sergey-kryt@yandex.ru*

Received: September 8, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

**Abstract:** *In this paper, the problem of the synthesis of compact waveguide filters with an elliptic characteristic is solved. The results of computer simulation are compared with the results of frequency response measurements of the manufactured prototype filters. The high accuracy and efficiency of the proposed methodology was confirmed.*

**Keywords:** *Microwave filter, rectangular waveguide, thin metal diaphragm, resonant diaphragms.*

**For citation (IEEE):** S. V. Krutiev et al. “Synthesis of compact waveguide filters with an elliptic characteristic,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 145–153, 2019. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.2.13

## 1. Введение

Волноводные СВЧ-фильтры находят широкое применение в современных системах локации, навигации и связи, особенно в сантиметровом и миллиметровом диапазонах, благодаря малым потерям и большой передаваемой мощности [1—2]. Основным недостатком волноводных фильтров являются их значительные габаритные размеры и вес. Для решения данной проблемы можно использовать переход от классических объемных резонаторов к плоско-поперечным резонаторам, реализованным чаще всего с помощью тонких металлических резонансных диафрагм [12—17].

При практической реализации тонкие плоско-поперечные металлические диафрагмы могут изготавливаться либо непосредственной фрезеровкой металлических пластин конечной толщины, составляющей обычно 1—2 мм для обеспечения необходимой прочности, либо путем нанесения металлизации на поверхность тонких диэлектрических пластин с малой диэлектрической проницаемостью [3—4]. Металлизация диэлектрика позволяет не только добиться более высокой точности изготовления сложной

апертуры, но и дополнительного уменьшения размеров проектируемых частотно-селективных устройств. Более того, благодаря замене стандартных волноводных инверторов в виде четвертьволновых связей более короткими участками сложной конфигурации можно построить цельную слоистую металлодиэлектрическую конструкцию фильтра, которая будет легко интегрироваться в волноводную линию и заменяться при необходимости.

Резонансные диафрагмы со сложной апертурой должны описываться более сложными эквивалентными схемами, чем стандартные прямоугольные окна. Корректное построение эквивалентной схемы сложной диафрагмы позволяет эффективно использовать хорошо известные инструменты схемотехнического синтеза для расчетов характеристик фильтров прототипов, причем не только фильтров Чебышева или Баттерворта, но и эллиптические фильтры с полюсами затухания в амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) [5].

Поэтому, развитие численно-аналитических методов электродинамического анализа сложных волноводных резонансных диафрагм и алгоритмов синтеза компактных полосно-пропускающих и полосно-заграждающих фильтров на их основе является актуальной задачей для развития инфокоммуникационных систем сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн.

## 2. Постановка задачи

В данной работе решена задача синтеза компактных волноводных фильтров с эллиптической характеристикой. Амплитудно-частотная характеристика эллиптического фильтра-прототипа низких частот является функцией круговой частоты  $\omega$  и задается следующим выражением [6-10].

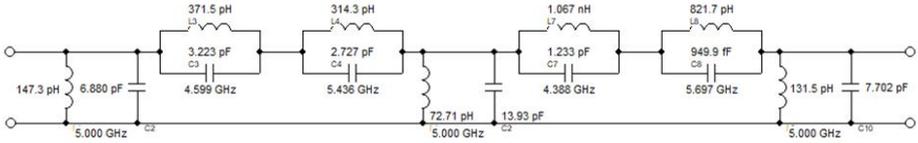
$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 R_n^2(\xi, \omega/\omega_0)}}, \quad (1)$$

где  $R_n$  — рациональная эллиптическая функция  $n$ -го порядка,  $\omega_0$  — частота среза,  $\varepsilon$  — показатель пульсаций,  $\xi$  — показатель селективности.

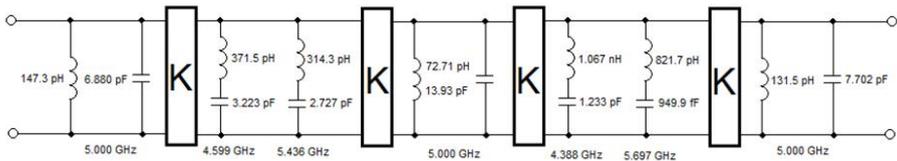
Значение показателя пульсаций  $\varepsilon$  определяет пульсации в полосе пропускания, пульсации же в полосе подавления зависят как от показателя пульсаций, так и от показателя селективности  $\xi$ .

Рассчитаем эквивалентную электрическую схему эллиптического фильтра третьего порядка с полосой пропускания 7.5% и уровнем затухания в полосе пропускания -20 дБ (рис. 1а). Перейдем из ступенчатой схемы к схеме последовательно-параллельных колебательных контуров, включенных параллельно в длинную линию (рис. 1б). При этом в послед-

нем варианте в схему необходимо включить инверторы сопротивлений К, роль которых для волноводного фильтра могут сыграть четвертьволновые отрезки волновода.



(a)



(b)

Рис. 1. Эквивалентная схема эллиптического фильтра.

Fig. 1. Equivalent elliptical filter circuit

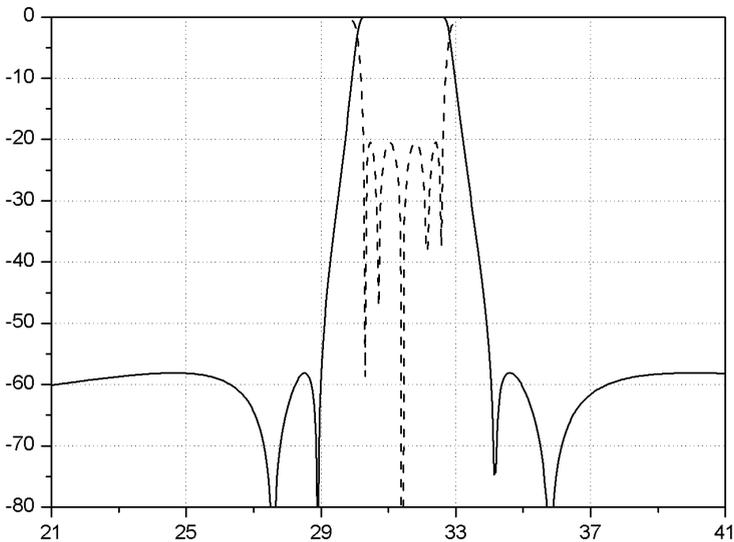


Рис. 2. АЧХ эллиптического фильтра-прототипа.

Fig. 2. The frequency response of the elliptical filter prototype

Амплитудно-частотная характеристика синтезированного фильтра приведена на рис. 2 ( $|S_{21}|$  — сплошная линия,  $|S_{11}|$  — пунктирная линия) до преобразования частот с учетом модовой дисперсии волновода.

### 3. Расчет параметров одиночных диафрагм

Повторяя алгоритм [6, 10], проведем расчет параметров одиночных диафрагм фильтра. На рис. 3—5 приведены зависимости модулей S-параметров от частоты для пропускающих и заграждающих резонаторов в сравнении с результатами измерений (маркеры).

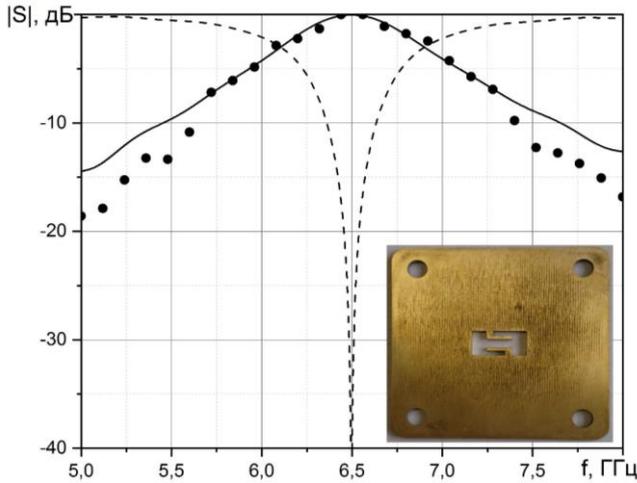


Рис. 3. Зависимость  $|S|$ -параметров от частоты для первой резонансной диафрагмы.

Fig. 3. Frequency dependence of  $|S|$  parameters for the first resonant diaphragm

Геометрические размеры синтезированных диафрагм для полосно-пропускающего фильтра приведены в таблице 1, где  $l$  — расстояние между диафрагмами фильтра после оптимизации.

Таблица 1. Размеры волноводного пятирезонаторного фильтра

Table 1. Dimensions of a waveguide five-cavity filter

Номер диафрагмы	$a'_i, мм$	$b'_i, мм$	$p_i, мм$	$h_i, мм$	$t_i, мм$	$d_i, мм$	$l_1, мм$	$l_2, мм$
$i=1,5$	15.65	8.4	1	1.66	4.95	1.75	12.33	14.63
$i=2,4$	22.78	13.1	1 1	2.2 1.9	6.49 2	2.2 5.19		
$i=3$	13.73	7	1	1.36	3.64	1.75		

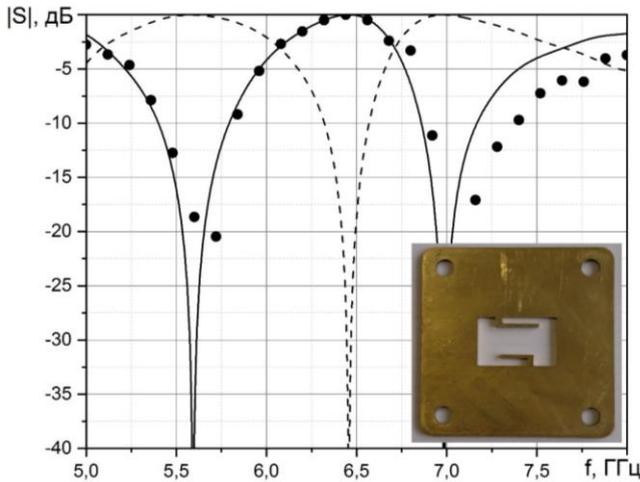


Рис. 4. Зависимость  $|S|$ -параметров от частоты для второй резонансной диафрагмы  
Fig. 4. Frequency dependence of  $|S|$  parameters for the second resonant diaphragm

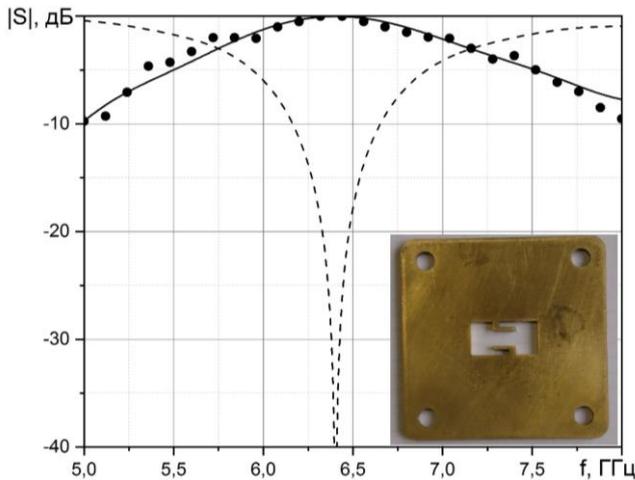


Рис. 5. Зависимость S-параметров от частоты для третьей резонансной диафрагмы.  
Fig. 5. Frequency dependence of S-parameters for the third resonant diaphragm

#### 4. Результаты расчетов

Амплитудно-частотная характеристика синтезированного фильтра представлена на рис. 6 совместно с результатами измерений экспериментальных образцов. Как видно из рисунка, полученная АЧХ хорошо согласуется с характеристикой построенной эквивалентной схемы. Продольный

размер фильтра составил всего 64 мм, что соответствует 1.35 рабочей длины волны. Полоса пропускания по уровню  $-3$  дБ составила 6.22—6.82 ГГц или 9.2 %, а коэффициент прямоугольности по уровням  $-3$  и  $-20$  дБ составил 0.8. Уровень затухания в полосе заграждения фильтра заметно увеличился по сравнению с фильтром третьего порядка и составил более 30 дБ. Все элементы синтезированного фильтра приведены на рис. 7 и 8.

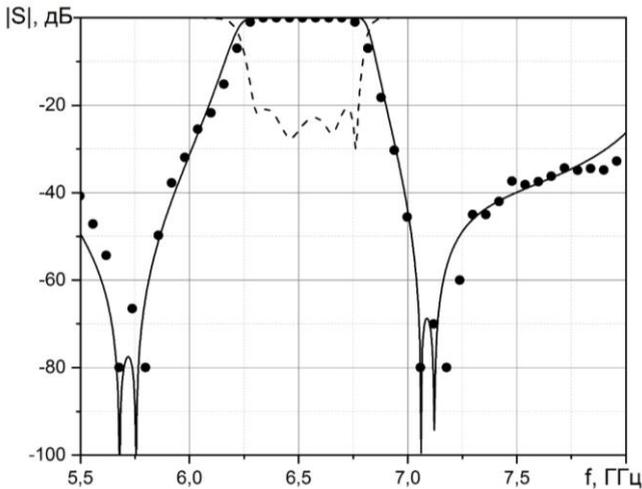


Рис. 6. АЧХ волноводного пятирезонаторного фильтра в сравнении с результатами эксперимента.

Fig. 6. Frequency response of a five-cavity filter waveguide in comparison with experimental results

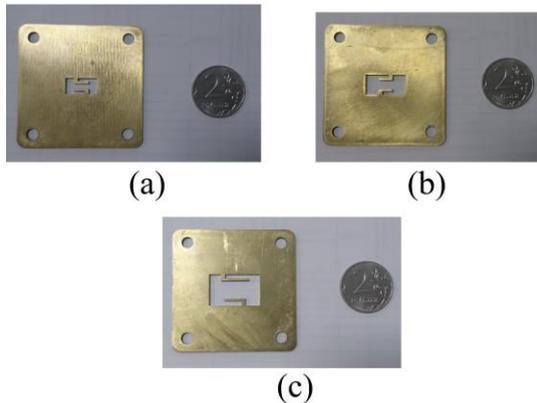


Рис. 7. Резонансные диафрагмы волноводного пятирезонаторного эллиптического фильтра.

Fig. 7. Resonant diaphragms of a waveguide five-cavity elliptical filter



Рис. 8. Элементы волноводного пятирезонаторного эллиптического фильтра на сложных диафрагмах.

Fig. 8. Elements of a waveguide five-cavity elliptical filter on complex diaphragms

## 5. Заключение

Таким образом, удается полностью обеспечить практическую реализацию радиотехнической схемы эллиптического фильтра на базе таких резонаторов. Более того, благодаря размещению пары последовательных колебательных контуров в рамках одной диафрагмы, дополнительно уменьшен продольный размер фильтра, за счет исключения согласующих волноводных участков инверторов сопротивлений. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами измерений АЧХ изготовленных фильтров-прототипов. Подтверждена высокая точность и эффективность предлагаемых методик.

## Список литературы

1. Маттей Д., Янг Л., Джонс К. М. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи: в 2 т. Т. 1—2. М.: Связь, 1972. 495 с.
2. Zhu L., Mansour R. R., M. Yu, Compact Waveguide Dual-Band Filters and Diplexers // IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques. 2017. №. 65(5). С. 1525—1533.
3. Ding J. Q., Shi S. C., Zhou K., Zhao Y., Liu D., Wu W. WR-3 Band Quasi-Elliptical Waveguide Filters Using Higher Order Mode Resonances // IEEE Trans. Terahertz Science and Technology. 2017. № 7(3). С. 302—309.

4. Kirilenko A. A., Rud L. A., Senkevich S. Spectral Approach to the Synthesis of Bandstop Filters // IEEE Trans. Microwave Theory and Technique. 1994. № 42(7). С. 1387—1392.
5. Stefanovski S., Potrebi M., Toši D. A novel design of E-plane bandstop waveguide filter using quarter-wave resonators // Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications, 2015. Т. 9, № 1—2. С. 87—93.
6. Zemlyako V., Krutiev S., Tyaglov M., Shevchenko V. A design of waveguide elliptic filter based on resonant diaphragms with a complex aperture // International Journal of Circuit Theory and Applications. 2019. № 47. С. 55—64.
7. Крутиев С. В., Земляков В. В., Заргано Г. Ф. Волноводный полосно-пропускающий фильтр на сложных резонансных диафрагмах // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60, № 12. С. 1231.
8. Zemlyakov V. V., Krutiev S. V., Kleshchenkov A. B. The compact waveguide filters with complex aperture resonant diaphragms // Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 2016, 8–11 August, Shanghai, China. С. 3224—3228.
9. Заргано Г. Ф., Земляков В. В., Крутиев С. В., Клещенков А. Б. Волноводный квазиэллиптический фильтр на сложных резонансных диафрагмах // Физические основы приборостроения. 2019. Т. 8, № 1. С. 47—54.
10. Земляков В. В., Заргано Г. Ф., Крутиев С. В., Тяглов М. Ю. Электродинамический анализ и синтез эллиптического фильтра на сложных резонансных диафрагмах в прямоугольном волноводе // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 12. С. 1130—1139.

### Информация об авторах

**Крутиев Сергей Владимирович**, преподаватель физического факультета Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-9389-8344.

**Земляков Вячеслав Викторович**, профессор физического факультета Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-3932-6759.

**Клещенков Анатолий Борисович**, доцент физического факультета Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-4238-9504.

### Information about the authors

**Sergey V. Krutiev**, lecturer of physics faculty at Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia. ORCID 0000-0002-9389-8344

**Vyacheslav V. Zemlyakov**, professor of physics faculty at Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia. ORCID 0000-0002-3932-6759.

**Anatoly B. Kleschenkov**, associate professor of physics faculty at Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia. ORCID 0000-0003-4238-9504.