

Компактные полосно-пропускающие волноводные фильтры с индуктивными связями с E -плоскостной симметрией и без E -плоскостной симметрии

А. А. Соркин

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

✉ alexandr.sorkin.781@mail.ru

Аннотация

Введение. В современных спутниковых системах связи к частотным и массогабаритным характеристикам входных фильтров предъявляются все более жесткие требования. Исходя из этого, рассмотрены конструкции полосовых фильтров с индуктивными связями на гофрированных волноводах. Несмотря на то что подобные фильтры были описаны ранее, в данной статье рассмотрены возможные реализации таких фильтров на волноводе зауженного сечения, на структурах с симметрией и без симметрии по электрическому полю.

Цель работы. Исследование фильтров с индуктивными связями с симметрией и без симметрии по электрическому полю, а также оценка полосы заграждения по уровню и ширине полосы.

Материалы и методы. Численные исследования проведены методом конечных элементов и методом конечных разностей во временной области.

Результаты. Проведено моделирование фильтров с индуктивными связями с симметрией и без симметрии по электрическому полю. Установлено, что фильтры без симметрии по электрическому полю имеют лучшие массогабаритные характеристики, но более узкую полосу заграждения. С помощью моделирования также установлено, что в фильтрах со шлейфами одинакового сечения уровень заграждения больше почти на 20 дБ по сравнению с фильтрами, в которых шлейфы имеют разное сечение. Частотные характеристики фильтров с индуктивными связями, полученные путем электродинамического моделирования, совпадают с характеристиками, полученными экспериментально. Проведено моделирование десятизвенного сверхкомпактного фильтра с индуктивными связями без симметрии по электрическому полю, потери в полосе пропускания не более 0.7 дБ, уровень заграждения в полосе частот от 7.9 до 8.4 ГГц не менее 80 дБ, длина фильтра 30 мм.

Заключение. Применение фильтров с индуктивными связями позволяет существенно улучшить массогабаритные характеристики без ухудшения потерь в полосе пропускания и сохранения высокого уровня ослабления в полосе заграждения.

Ключевые слова: фильтр с индуктивными связями, полюс затухания, шлейф, симметричная емкостная диафрагма, несимметричная емкостная диафрагма

Для цитирования: Соркин А. А. Компактные полосно-пропускающие волноводные фильтры с индуктивными связями с E -плоскостной симметрией и без E -плоскостной симметрии // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 5. С. 32–41. doi: 10.32603/1993-8985-2021-25-5-32-41

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке КГАУ "Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности", заявка № 2022030108251.

Статья поступила в редакцию 20.07.2022; принята к публикации после рецензирования 20.10.2022; опубликована онлайн 29.11.2022

Compact Bandpass Waveguide Filters with Inductive Couplings with E -plane Symmetry and without E -plane Symmetry

Alexandr A. Sorkin

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

✉alexandr.sorkin.781@mail.ru

Abstract

Introduction. Modern satellite communication systems continue to impose stricter requirements on the frequency response, weight, and size of filters. In this paper, several designs of bandpass filters with inductive couplings on corrugated waveguides are considered. Although such filters have been described previously, this paper considers their possible implementations based on narrow cross-section waveguides, as well as on structures with and without electric field symmetry.

Aim. To study filters with inductive couplings with and without electric field symmetry, as well as to assess the filter stopband width and attenuation.

Materials and methods. Numerical studies were carried out by the finite element method (FEM) and the method of final difference in the time domain (FDTD).

Results. Modeling of filters with inductive couplings with and without electric field symmetry was carried out. Filters without electric field symmetry were found to exhibit higher characteristics in terms of weight and size, at the same time as having a narrower stopband. The conducted modeling also showed that filters with stubs of the same cross section allow stopband attenuation to be improved by almost 20 dB compared to filters with stubs of varied cross section. The frequency responses of filters with inductive couplings obtained by electrodynamic modeling were established to agree well with those obtained experimentally. A ten-order ultra-compact filter with inductive couplings without electric field symmetry was considered, with the bandwidth loss of not more than 0.7 dB, the attenuation of at least 80 dB in the frequency range from 7.9 to 8.4 GHz, and the filter length of 30 mm.

Conclusion. The use of filters with inductive couplings allows their mass and dimension characteristics to be significantly improved without increasing losses in the bandwidth at the same time as maintaining a high level of attenuation in the stopband.

Keywords: inductive coupling filter, attenuation pole, stub, symmetrical capacitive iris, asymmetrical capacitive iris

For citation: Sorkin A. A. Compact Bandpass Waveguide Filters with Inductive Couplings with E -plane Symmetry and without E -plane Symmetry. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 5, pp. 32–41. doi: 10.32603/1993-8985-2021-25-5-32-41

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Acknowledgment. The reported study was funded by Krasnoyarsk regional science foundation, project no. 2022030108251.

Submitted 20.07.2022; accepted 20.10.2022; published online 29.11.2022

Введение. В современных спутниковых системах связи требуются входные фильтры с малыми потерями и малыми габаритными размерами. В X -диапазоне частоты приема и передачи находятся очень близко (частоты приема 7.25...7.75 ГГц либо укороченная полоса пропускания 7.25...7.55 ГГц частоты передачи: 7.9...8.4 ГГц). Для данного диапазона требуется фильтр с высокой селективностью и при этом компактный. Для получения высокой селектив-

ности приемного фильтра требуется формирование полюсов затухания на частотах передачи. Одним из способов формирования несимметричной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) является применение синглетов, которые обеспечивают дополнительную связь между входом и выходом [1]. Синглеты работают на моде H_{201} или H_{301} . Можно в фильтрах на полуволновых резонаторах обеспечивать связи между несоседними резонаторами [2]. Однако

такие фильтры имеют в составе полуволновые резонаторы на моде H_{201} или H_{301} , что увеличивает габаритные размеры фильтра. Формировать полюса затухания можно и на двух- или одномодовых ТМ-резонаторах [3–5]. Фильтры на двухмодовых резонаторах обычно имеют более сложную настройку, требуют минимальных допусков и реализуют полосы пропускания до 10 %, хотя при этом обладают хорошими массогабаритными характеристиками. В волноводной технике широко известны фильтры на гофрированных волноводах [6–9]. На таких структурах в основном делают фильтры нижних частот (ФНЧ) с низкими потерями и широкими полосами заграждения [10,11], известны ФНЧ на гофрированных волноводах без входных трансформаторов [12].

Задачу создания фильтра с малыми потерями в X -диапазоне предлагается решить с помощью фильтра на гофрированном волноводе, реализующего схему с индуктивными связями [13]. Возможность реализации такого фильтра описана в [9]. Резонаторы реализуются емкостными диафрагмами, что существенно сокращает габаритные размеры; индуктивные связи реализуются шлейфами, длина которых для формирования полюсов выше полосы пропускания менее четверти длины волны в волноводе. Фильтры выполняются на волноводе зауженного сечения, которое формирует низкочастотный скат АЧХ. Описанные ранее в литературе фильтры имели ширину, равную ширине широкой стенки подводящих волноводов, что приводило к необходимости подстройки индуктивности у каждой диафрагмы. Уменьшение ширины волновода позволяет реализовать внут-

ренние диафрагмы фильтра в виде емкостных (кроме входной и выходной) и таким образом избавиться от подстройки индуктивностей.

Методы исследования. Численные исследования проведены методом конечных элементов (Finite element method – FEM) и методом конечных разностей во временной области (Final difference in the time domain – FDTD).

Проектирование фильтра с индуктивными связями с E -плоскостной симметрией. Расчет фильтров с индуктивными связями по схемам-прототипам приведен в [14]. Эквивалентная схема фильтра приведена на рис. 1.

Суть расчета заключается в том, что по заданным нижней f_{-p} и верхней f_{+p} частотам полосы пропускания, величине пульсаций a_p и требованиям к полосе заграждения определяется число звеньев фильтра n и параметры элементов ФНЧ-прототипа g_i . Резонансные частоты контуров f_k (f_k – резонансная частота k -го контура, $k = 1 \dots n$, n – порядок фильтра) отличны от средней частоты полосы пропускания

$$f_0 = \sqrt{f_{-p} f_{+p}}.$$

В данном типе фильтров параллельные резонансные контуры реализуются в виде емкостных диафрагм, каждая из которых в сочетании со шлейфами и входными индуктивностями формирует резонанс в полосе пропускания. На рис. 2, а представлена рассчитанная зависимость нагруженной добротности симметричного и несимметричного емкостных окон диафрагм от их высоты, диафрагма нагружена волноводом сечением 22×6 мм, толщина диафрагмы 3 мм. На рис. 2, б пред-

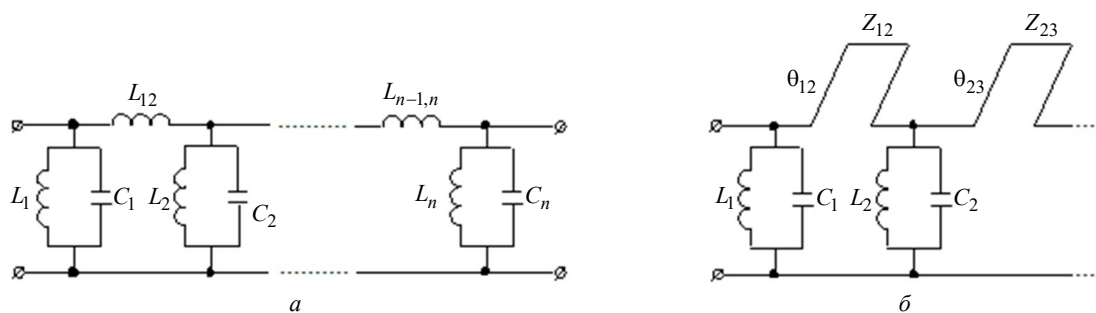


Рис. 1. Схема фильтра с индуктивными связями: а – на сосредоточенных элементах; б – с заменой последовательных индуктивностей последовательными шлейфами

Fig. 1. Filter with inductive couplings: а – circuit on lumped elements; б – circuit with the replacement of series inductances with series stubs

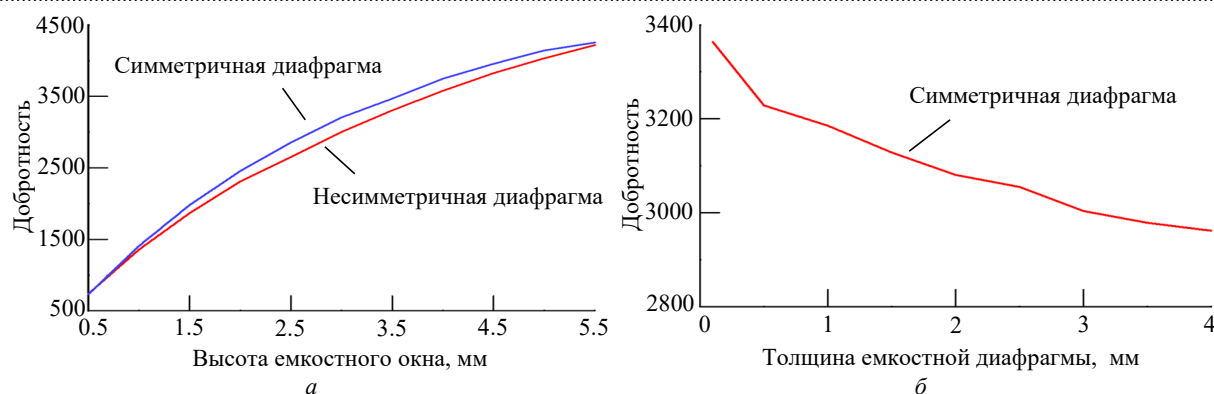


Рис. 2. Зависимость нагруженной добротности от геометрических размеров: a – высоты емкостных окон симметричных и несимметричных диафрагм; b – толщину симметричной диафрагмы

Fig. 2. Dependence of the loaded quality factor on the geometric dimensions: a – capacitive symmetrical and asymmetrical iris windows; b – the capacitive iris thickness

ставлена рассчитанная зависимость нагруженной добротности от толщины симметричной емкостной диафрагмы.

Анализ резонансных диафрагм приведен в [15]. Резонансная длина волны диафрагмы

$$\lambda_{\text{res}} = \sqrt{\frac{D_2^2 D_4}{(D_1 - D_2^2 D_3 + D_2^2 D_4) / (4a_1^2)}},$$

$$\text{где } D_1 = \frac{\text{ctg}^2(\pi a_1 / (2a))}{a}; D_2 = \frac{\pi(a^2 - a_1^2)}{4aa_1 \cos(\pi a_1 / (2a))}; D_3 = \frac{b^2/3 + b_1^2/2 - 8bb_1/\pi^2}{aa_1^2}; D_4 = 4b \ln[\text{cosec}(\pi b_1 / (2b))];$$

a и b – размеры волноводов; a_1 и b_1 – размеры окна диафрагмы.

Нагруженная добротность диафрагмы

$$Q = \frac{\lambda_{\text{res}}}{4 \left[1 - (\lambda_{\text{res}} / (2a))^{3/2} \right]} \times \left[D_1 - D_2^2 D_3 + D_2^2 D_4 \left(\frac{1}{\lambda_{\text{res}}^2} - \frac{1}{2a^2} + \frac{1}{4a_1^2} \right) \right].$$

Последовательные индуктивности эквивалентной схемы выполняются в виде последовательных шлейфов (рис. 1, a , b), которые для симметрии конструкции располагаются на обеих широких стенках волновода (рис. 3, a). По рассчитанным индуктивностям связи $L_{k,k+1}$ определяются размеры шлейфов:

$$\frac{\omega_0 L_{k,k+1}}{Z_0} = 2 \frac{Z_{k,k+1}}{Z_0} \text{tg } \theta = 2 \frac{b_{k,k+1} a_0 \sqrt{1 - (\lambda_0 / (2a))^2}}{b_0 a_{k,k+1} \sqrt{1 - (\lambda_0 / (2a_{k,k+1}))^2}} \text{tg } \theta, \quad (1)$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$ – циклическая частота полюса затухания (f_0 – частота полюса затухания); Z_0 – волновое сопротивление подводящих волноводов; $Z_{k,k+1}$ и θ – волновое сопротивление и электрическая длина шлейфа; a_0, b_0 – размеры подводящих волноводов; $a_{k,k+1}, b_{k,k+1}$ – размеры шлейфов; $k = 1 \dots n-1$ – порядковый номер резонатора; n – порядок фильтра; λ_0 – длина волны на частоте полюса затухания. Из (1) получается, что частоты полюсов можно регулировать для получения требуемой крутизны высокочастотного ската. Значения емкостей и индуктивностей рассчитываются исходя из схемы-прототипа.

Стоит отметить, что для формирования низкочастотного ската вся структура фильтра выполняется на волноводе зауженного сечения, т. е. ширина фильтра меньше ширины входного и выходного волноводов. Ширина выбирается таким образом, чтобы частота отсечки была ниже полосы пропускания, но выше частоты отсечки входного и выходного волноводов. Дальнейший расчет и последующая оптимизация фильтров осуществляются с помощью электродинамических программ. Оптимизация

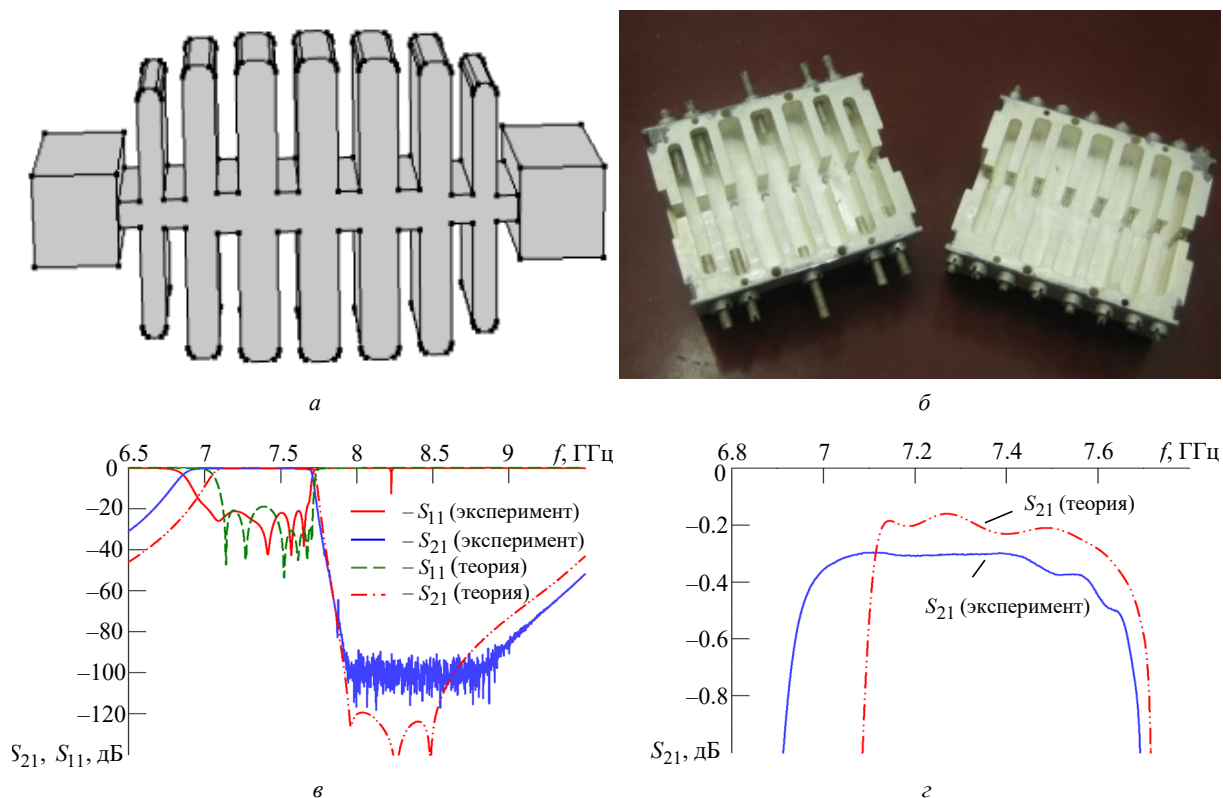


Рис. 3. Восьмизвенный фильтр с индуктивными связями с E -плоскостной симметрией: a – структура фильтра; b – изготовленный фильтр; $в$ – частотные характеристики фильтра; $г$ – потери в полосе пропускания

Fig. 3. Eight-order filter with inductive couplings with E -plane symmetry: a – filter structure; b – manufactured filter; $в$ – filter frequency response; $г$ – bandpass loss

выполняется с целью получения точных геометрических размеров конструкции в частотной области с помощью встроенных автоматических средств электродинамических систем автоматизированного проектирования.

Реализация фильтра с индуктивными связями с E -плоскостной симметрией. На рис. 3, a представлена модель 8-звенного фильтра с индуктивными связями, имеющего E -плоскостную симметрию (двухстороннее расположение шлейфов по широкой стенке). Между шлейфами располагаются емкостные диафрагмы. Порядок фильтра определяется числом диафрагм. Все шлейфы фильтра настроены на частоты выше полосы пропускания. Фильтр на входе (выходе) имеет волновод сечением 28.5×12.6 мм, гофрированная структура выполнена на волноводе шириной 22 мм. Длина фильтра составляет 60 мм.

Для экспериментального подтверждения полученных расчетных результатов изготовлен образец фильтра (рис. 3, b). Характеристики измерены с помощью анализатора цепей Keysight PNA-X Network Analyzer N5245B.

Настройка фильтра выполняется в частотной области с помощью настроечных винтов, установленных в шлейфах фильтра и диафрагмах.

Полоса пропускания 7.25...7.55 ГГц. Коэффициент стоячей волны (КСВ) фильтра не более 1.2, потери составляют 0.25 дБ, подавление на частотах 7.9...8.4 ГГц не менее 70 дБ. Известные фильтры, имеющие аналогичные параметры, длиннее более чем в 2 раза.

На рис. 3, $в$ видно, что экспериментальная характеристика коэффициента передачи, в отличие от теоретической, имеет резонанс на частоте около 7.9 ГГц. Этот резонанс получается из-за смещения половинок фильтра друг относительно друга при сборке. Чтобы устранить этот резонанс, нужно обе детали фильтра изготавливать от общей базы. На рис. 3, $г$ показаны потери в полосе пропускания.

Реализация фильтра с индуктивными связями без E -плоскостной симметрии. Еще одной разновидностью данных фильтров являются фильтры без E -плоскостной симметрии (с односторонним расположением шлейфов). Од-

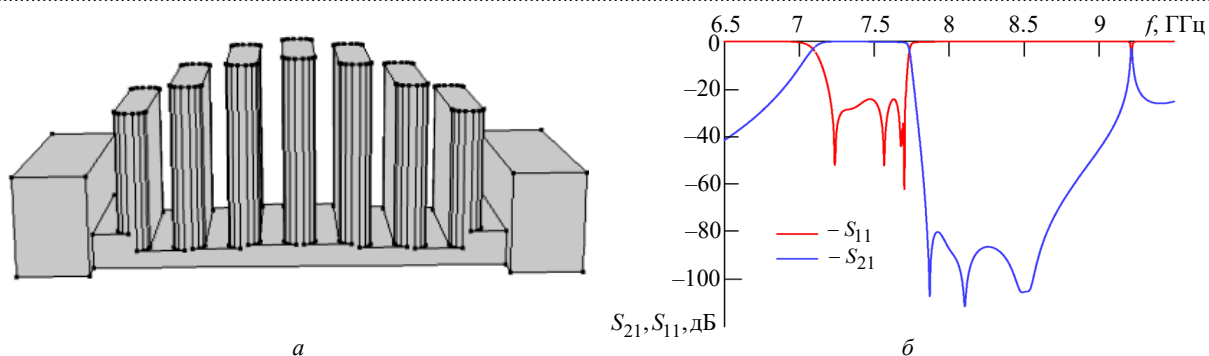


Рис. 4. Восьмизвенный фильтр с индуктивными связями без E -плоскостной симметрии: a – структура фильтра; b – расчетные частотные характеристики фильтра

Fig. 4. Eight-order filter with inductive couplings without E -plane symmetry: a – filter structure; b – calculated filter frequency response

ним из преимуществ этих фильтров является меньшее количество регулировочных винтов, что делает настройку менее затратной и более быстрой. Как было показано, фильтры с E -плоскостной симметрией изготовлены из двух половин и соединяются по широкой стенке, при неточной стыковке на скате АЧХ выше полосы пропускания появляется резонанс. Этого недостатка лишен фильтр без E -плоскостной симметрии, у которого детали соединяются по узкой стенке, причем одна деталь является гладкой, а

другая содержит шлейфы, поэтому стыковка не влияет на электрические параметры. На рис. 4 показан 8-звенный фильтр без E -плоскостной симметрии и его частотные характеристики. Фильтр на входе (выходе) имеет волновод сечением 28.5×12.6 мм, гофрированная структура выполнена на волноводе шириной 21.3 мм. Длина фильтра составляет 60 мм. Полоса пропускания 7.25...7.55 ГГц. КСВ фильтра менее 1.2, потери составляют 0.25 дБ, подавление на частотах 7.9...8.4 ГГц не менее 80 дБ.

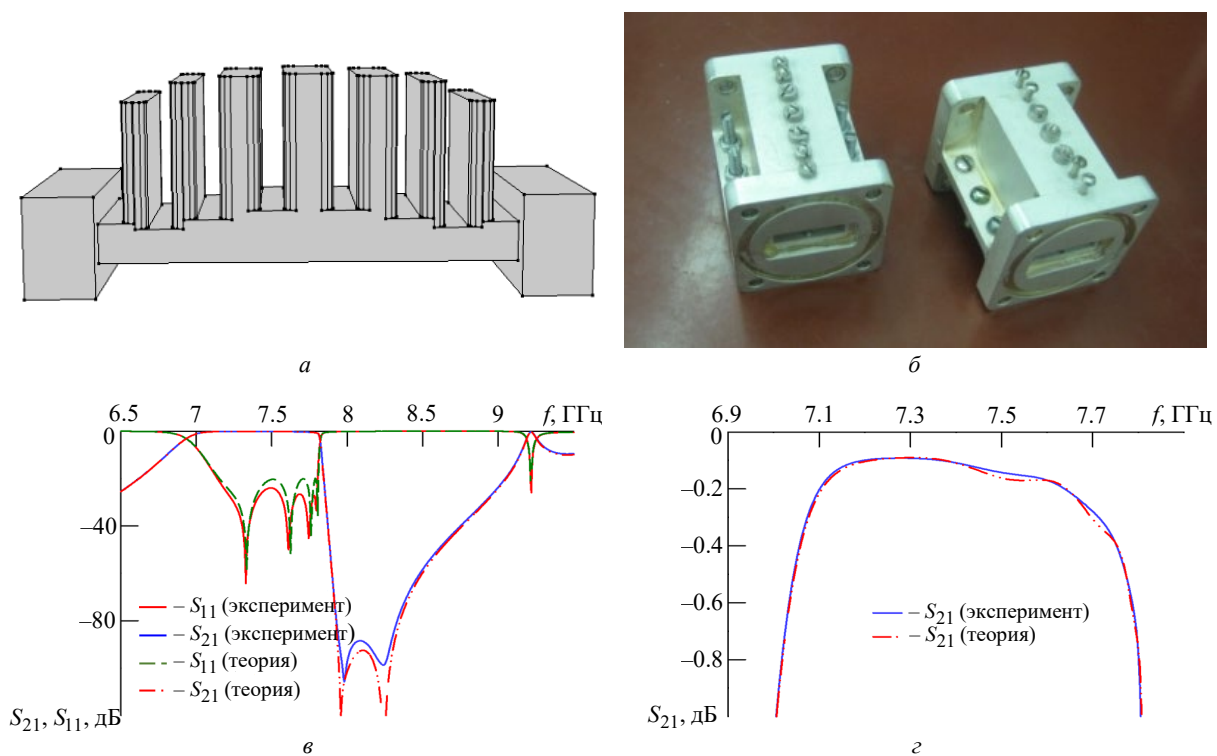


Рис. 5. Восьмизвенный фильтр с индуктивными связями без E -плоскостной симметрии: a – структура фильтра; b – изготовленные фильтры; c – частотные характеристики; d – потери в полосе пропускания

Fig. 5. Eight-order filter with inductive couplings without E -plane symmetry: a – filter structure; b – manufactured filters; c – frequency response; d – bandpass loss

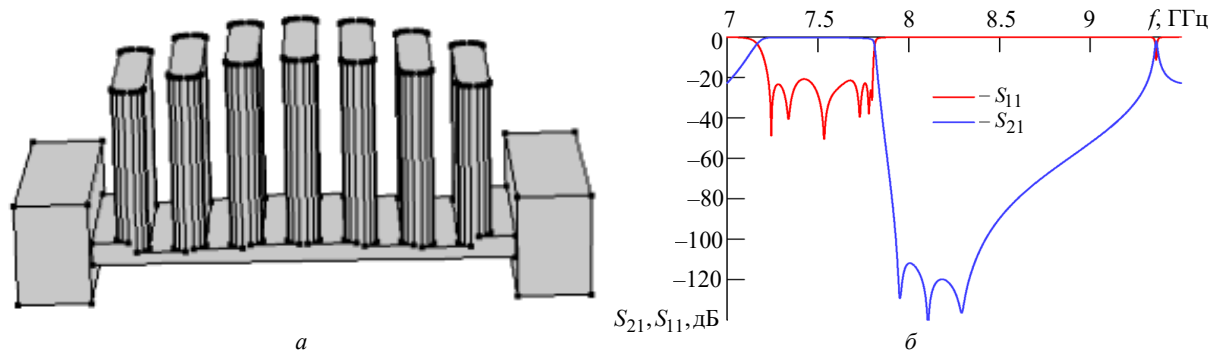


Рис. 6. Восьмизвенный фильтр с индуктивными связями без E -плоскостной симметрии со шлейфами одинакового волноводного сечения: a – структура фильтра; b – расчетные частотные характеристики фильтра

Fig. 6. Eight-order filter with inductive couplings without E -plane symmetry with stubs of the same waveguide cross-section: a – filter structure; b – filter calculated frequency response

На рис. 5, a , b представлен аналогичный фильтр, но с более широкой полосой пропускания, и его частотные характеристики (рис. 5, b); на рис. 5, c показаны потери в полосе пропускания. Фильтр на входе (выходе) имеет волновод сечением 28.5×12.6 мм, гофрированная структура выполнена на волноводе шириной 22 мм. Длина фильтра составляет менее 60 мм. Полоса пропускания 7.25...7.75 ГГц. КСВ фильтра менее 1.2, потери составляют 0.4 дБ, подавление на частотах 7.9...8.4 ГГц не менее 60 дБ.

Для дальнейшего улучшения селективных свойств рассмотрим фильтр без E -плоскостной симметрии, у которого все шлейфы выполнены на одинаковом волноводном сечении. На рис. 6 приведен такой восьмизвенный фильтр и его частотные характеристики.

Как видно из рис. 5 и 6, фильтр со шлейфами одного сечения имеет 90 дБ в полосе заграждения, что на 30 дБ лучше, чем у фильтра со шлейфами различного волноводного сечения.

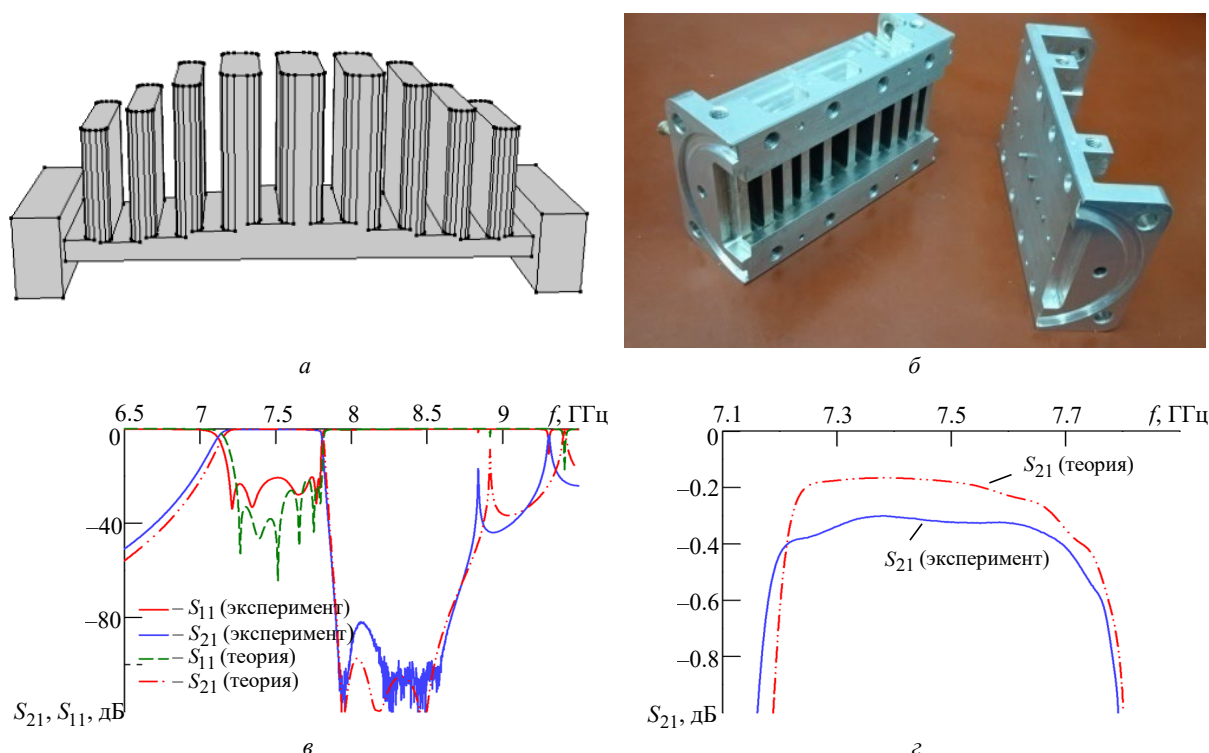


Рис. 7. Десятизвенный фильтр с индуктивными связями без E -плоскостной симметрии со шлейфами различного волноводного сечения: a – структура фильтра; b – изготовленный фильтр; c – частотные характеристики фильтра; d – потери в полосе пропускания

Fig. 7. Ten-order filter with inductive couplings without E -plane symmetry with stubs of various waveguide cross-section: a – filter structure; b – manufactured filters; c – frequency response; d – bandpass loss

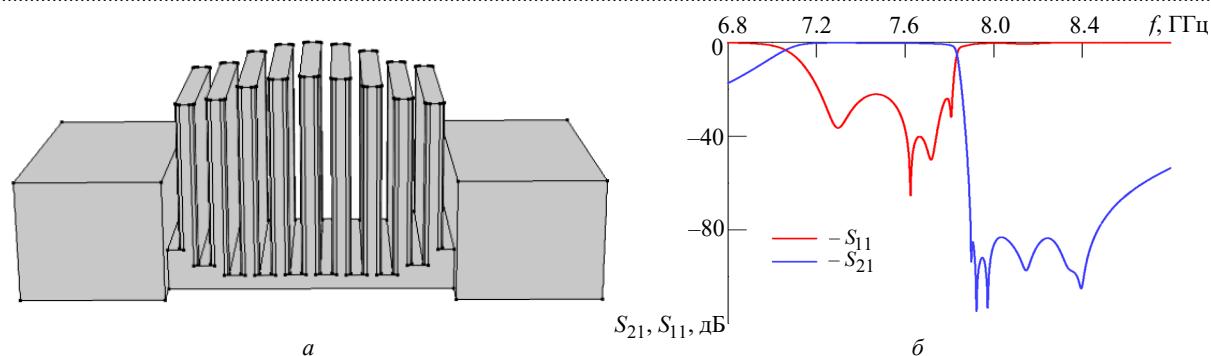


Рис. 8. Сверхкомпактный десятизвенный фильтр с индуктивными связями без E -плоскостной симметрии со шлейфами одинакового волноводного сечения: a – структура фильтра; b – расчетные частотные характеристики фильтра

Fig. 8. Ultra-compact ten-order filter with inductive couplings without E -plane symmetry with stubs of the same waveguide cross-section: a – filter structure; b – calculated filter frequency response

Для дальнейшего увеличения уровня загашения был рассчитан и изготовлен десятизвенный фильтр с индуктивными связями без E -плоскостной симметрии (рис. 7, a , b). Его частотные характеристики показаны на рис. 7, $в$; на рис. 7, $г$ – потери в полосе пропускания.

Данный фильтр на входе (выходе) имеет волновод сечением 28.5×12.6 мм, гофрированная структура выполнена на волноводе шириной 21.3 мм. Длина фильтра составляет 72.2 мм. Полоса пропускания 7.25...7.75 ГГц. КСВ фильтра в полосе пропускания не более 1.2, потери составляют 0.6 дБ, подавление на частотах 7.9...8.4 не менее 80 дБ.

Следует отметить, что возможна реализация сверхкомпактных фильтрующих устройств на гофрированных волноводах. Идея компактного фильтра основана на том, что с уменьшением толщины диафрагм добротность растет, и при уменьшении высоты емкостного окна тонкой диафрагмы потери в полосе пропускания значительно не увеличиваются. Уменьшение высоты поперечного сечения шлейфов также не увеличивает потери в полосе пропускания. Примером является десятизвенный фильтр с индуктивными связями без E -плоскостной симметрии со шлейфами одинакового волноводного сечения. Такой фильтр и его частотные характеристики показаны на рис. 8.

Данный фильтр на входе (выходе) имеет волновод сечением 28.5×12.6 мм, гофрированная структура выполнена на волноводе шириной 21.3 мм. Длина фильтра составляет 30 мм. Полоса пропускания 7.25...7.75 ГГц. КСВ фильтра в полосе пропускания не более 1.2, потери составляют 0.6 дБ, подавление на частотах 7.9...8.4 ГГц не менее 80 дБ.

Закключение. В статье приведены результаты моделирования волноводных фильтров с индуктивными связями, теоретические и экспериментальные частотные характеристики, которые достаточно хорошо совпадают. Также предложена конструкция волноводных фильтров с E -плоскостной симметрией и без нее. Продемонстрирована возможность реализации сверхкомпактного волноводного фильтра с индуктивными связями без E -плоскостной симметрии. К недостаткам данного типа фильтров можно отнести близко расположенную паразитную полосу пропускания и низкочастотный скат с недостаточно высокой крутизной. В настоящее время ведется поиск способов устранения этих недостатков. Стоит также отметить, что рассмотренные фильтры обладают продольной симметрией относительно центра фильтра, имеют в центре шлейф и являются четнозвенными, следовательно, нечетнозвенные будут иметь в центре диафрагму.

Список литературы

1. Design of waveguide filters with cascaded singlets through a synthesis-based approach / G. Macchiarella, G. G. Gentili, C. Tomassoni, S. Bastioli, R. V. Snyder // IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech-

niques. 2020. Vol. 68, iss. 3. P. 2308–2319. doi: 10.1109/TMTT.2020.2970414

2. Rectangular waveguide quadruplet filter for satellite applications / J. Ossorio, S. Cogollos, V. Boria,

M. Guglielmi // IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. (IMS). Boston, USA, 02–07 June 2019. IEEE, 2019. P. 1359–1362. doi: 10.1109/MWSYM.2019.8701045

3. Very-compact waveguide bandpass filter based on dual-mode TM cavities for satellite applications in Ku-band / L. Pelliccia, C. Tomassoni, F. Cacciamani, P. Vallerotonda, R. Sorrentino, J. Galdeano, C. Ernst // 48th European Microwave Conf. (EuMC). Madrid, Spain, 23–27 Sept. 2018. IEEE, 2018. P. 93–96. doi: 10.23919/EuMC.2018.8541740

4. Bin Tang, Ying Yang, Xiaoxia Zheng. The design of linear tm mode filters with nonresonating mode // Intern. Conf. on Computer, Control and Robotics (ICCCR). Shanghai, China, 08–10 Jan. 2021. IEEE, 2021. P. 1–4. doi: 10.1109/ICCCR49711.2021.9349394

5. Bastioli S., Snyder R. V., Tomassoni C. Overmoded transverse magnetic cavity filters for narrowband millimeter-wave applications // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2019. Vol. 29, iss. 5. P. 321–323. doi: 10.1109/LMWC.2019.2905954

6. High-performance compact di-plexers for Ku/K-band satellite applications / F. Teberio, I. Arregui, P. Soto, M. A. G. Laso, V. E. Boria, M. Guglielmi // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2017. Vol. 65, iss. 10. P. 3866–3876. doi: 10.1109/TMTT.2017.2691773

7. Compact broadband waveguide diplexer for satellite applications/ F. Teberio, I. Arregui, M. Guglielmi, A. Gomez-Torrent, P. Soto, M. A. G. Laso, V. E. Boria // IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. (IMS). San Francisco, USA, 22–27 May 2016. IEEE, 2016. P. 1–4. doi: 10.1109/MWSYM.2016.7540231

8. Design of wide stopband for waveguide low-pass filter based on circuit and field combined analysis / Y. Mingyu, W. Haiyang, Y. Tao, H. Biao, L. Hao, Z. Yihong, L. Tianming // IEEE Microwave and Wire-

less Components Letters. 2021. Vol. 31, iss. 11. P. 1199–1202. doi: 10.1109/LMWC.2021.3087703

9. Integration of an H-plane bend, a twist, and a filter in Ku/K-band through additive manufacturing / O. A. Peverini, M. Lumia, G. Addamo, F. Paonessa, G. Virone, R. Tascone, F. Calignano, G. Cattano, D. Manfredi // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2018. Vol. 66, iss. 5. P. 2210–2219. doi: 10.1109/TMTT.2018.2809505

10. Synthesis approach for compact Ku-band wave-guide lowpass filters with wide rejection bandwidth / M. Cetin, G. Boyacioglu, B. Alicioglu, N. Yildirim // 18th Mediterranean Microwave Symp. (MMS). Istanbul, Turkey, 31 Oct. – 02 Nov. 2018. IEEE, 2018. P. 221–224. doi: 10.1109/MMS.2018.8611878

11. High-power filter design in waveguide technology / I. Arregui, F. Teberio, I. Arnedo, J. M. Percas, P. Martín-Iglesias, T. Lopetegi, M. A. G. Laso // IEEE Microwave Magazine. 2020. Vol. 21, iss. 6. P. 46–57. doi: 10.1109/MMM.2020.2979154

12. Chirping techniques to maximize the power-handling capability of harmonic waveguide low-pass filters / F. Teberio, I. Arregui, A. Gomez-Torrent, I. Arnedo, M. Chudzik, M. Zedler, F. Görtz, R. Jost, T. Lopetegi, M. A. G. Laso // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2016. Vol. 64, iss. 9. P. 2814–2823. doi: 10.1109/TMTT.2016.2586479

13. Соркин А. А., Соркин А. Р. Волноводный фильтр с индуктивными связями. Современные проблемы радиоэлектроники // Материалы Первой межрегион. науч. конф. Ростов-на-Дону, 2006. С. 241–243.

14. Алексеев Л. В., Знаменский А. Б., Лоткова Е. Д. Электрические фильтры метрового и дециметрового диапазонов. М.: Связь, 1976. 280 с.

15. Соркин А. Р. Малогабаритные волноводные фильтры: расчет и проектирование. ИПЦ КГТУ. Красноярск, 2002. 210 с.

Информация об авторе

Соркин Александр Анатольевич – магистр по направлению "Радиотехника" (2018), аспирант Сибирского федерального университета. Автор 6 научных работ. Сфера научных интересов – пассивные устройства и фильтры СВЧ.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: alexandr.sorkin.781@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7088-8373>

References

1. Macchiarella G., Gentili G. G., Tomassoni C., Bastioli S., Snyder R. V. Design of Waveguide Filters with Cascaded Singlets Through a Synthesis-Based Approach. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2020, vol. 68, iss. 3, pp. 2308–2319. doi: 10.1109/TMTT.2020.2970414

2. Ossorio J., Cogollos S., Boria V., Guglielmi M. Rectangular Waveguide Quadruplet Filter for Satellite Applications. IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. (IMS). Boston, USA, 02–07 June 2019. IEEE, 2019, pp. 1359–1362. doi: 10.1109/MWSYM.2019.8701045

3. Pelliccia L., Tomassoni C., Cacciamani F., Vallerotonda P., Sorrentino R., Galdeano J., Ernst C. Very-Compact Waveguide Bandpass Filter Based on Dual-Mode TM Cavities for Satellite Applications in Ku-band. 48th European Microwave Conf. (EuMC). Madrid, Spain, 23–27 September 2018. IEEE, 2018, pp. 93–96. doi: 10.23919/EuMC.2018.8541740

4. Bin Tang, Ying Yang, Xiaoxia Zheng. The Design of Linear Tm Mode Filters with Nonresonating Mode. Intern. Conf. on Computer, Control and Robotics

(ICCCR). Shanghai, China, 08–10 January 2021. IEEE, 2021, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICCCR49711.2021.9349394

5. Bastioli S., Snyder R. V., Tomassoni C. Over-Moded Transverse Magnetic Cavity Filters for Narrow-band Millimeter-Wave Applications. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2019, vol. 29, iss. 5, pp. 321–323. doi: 10.1109/LMWC.2019.2905954

6. Teberio F., Arregui I., Soto P., Laso M. A. G., Boria V. E., Guglielmi M. High-Performance Compact Di-Plexers for Ku/K-Band Satellite Applications. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2017, vol. 65, iss. 10, pp. 3866–3876. doi: 10.1109/TMTT.2017.2691773

7. Teberio F., Arregui I., Guglielmi M., Gomez-Torrent A., Soto P., Laso M. A. G., Boria V. E. Compact Broadband Waveguide Diplexer for Satellite Applications. IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. (IMS). San Francisco, USA, 22–27 May 2016. IEEE, 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/MWSYM.2016.7540231

8. Mingyu Y., Haiyang W., Tao Y., Biao H., Hao L., Yihong Z., Tianming L. Design of Wide Stopband for Waveguide Low-Pass Filter Based on Circuit and Field Combined Analysis. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2021, vol. 31, iss. 11, pp. 1199–1202. doi: 10.1109/LMWC.2021.3087703

9. Peverini O. A., Lumia M., Addamo G., Paonessa F., Virone G., Tascone R., Calignano F., Cattano G., Manfredi D. Integration of an H-Plane Bend, a Twist, and A Filter in Ku/K-Band Through Additive Manufacturing. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2018, vol. 66, iss. 5, pp. 2210–2219. doi: 10.1109/TMTT.2018.2809505

10. Cetin M., Boyacioglu G., Alicioglu B., Yildirim N. Synthesis Approach for Compact Ku-Band Waveguide Lowpass Filters with Wide Rejection Bandwidth. 18th Mediterranean Microwave Symp. (MMS). Istanbul, Turkey, 31 October – 02 November 2018. IEEE, 2018, pp. 221–224. doi: 10.1109/MMS.2018.8611878

11. Arregui I., Teberio F., Arnedo I., Percas J. M., Martín-Iglesias P., Lopetegui T., Laso M. A. G. High-Power Filter Design in Waveguide Technology. IEEE Microwave Magazine. 2020, vol. 21, iss. 6, pp. 46–57. doi: 10.1109/MMM.2020.2979154

12. Teberio F., Arregui I., Gomez-Torrent A., Arnedo I., Chudzik M., Zedler M., Görtz F., Jost R., Lopetegui T., Laso M. A. G. Chirping Techniques to Maximize the Power-Handling Capability of Harmonic Waveguide Low-Pass Filters. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2016, vol. 64, iss. 9, pp. 2814–2823. doi: 10.1109/TMTT.2016.2586479

13. Sorkin A. A., Sorkin A. R. *Volnovodnyi fil'tr s induktivnymi svyazymi* [Waveguide Filter with Inductive Couplings]. Proc. of the Conf. Modern problems of radio electronics. Rostov-na-Donu, 2006, pp. 241–243. (In Russ.)

14. Alekseev L. V., Znamenskii A. B., Lotkova E. D. *Elektricheskie fil'try metrovogo i detsimetrovogo diapazonov* [Electric Filters for Meter and Decimeter Ranges]. Moscow, Svyaz', 1976, 280 p. (In Russ.)

15. Sorkin A. R. *Malogabaritnye volnovodnye fil'try: raschet i proektirovanie* [Small-Sized Waveguide Filters: Calculation and Design]. Krasnoyarsk, IPTs KGTU, 2002, 210 p. (In Russ.)

Information about the author

Alexander A. Sorkin, Master in "Radio Engineering" (2018), Graduate student of the Siberian Federal University. The author of 6 scientific publications. Area of expertise: passive devices and microwave filters.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: alexandr.sorkin.781@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7088-8373>