

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.1.9>

УДК 621.396

ВОЛНОВОДНЫЕ СВЧ-ФИЛЬТРЫ: ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ, ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЁТА

В. В. Комаров, М. А. Лукьянов

**Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая 77**

Статья поступила в редакцию 11 января 2021 г.

Аннотация. Для фильтрации электромагнитных сигналов в современных микроволновых системах применяются самые разнообразные частотно-селективные устройства, выполненные по разным технологиям. В системах малого и среднего уровня мощности (менее 100 Вт) находят распространение планарные структуры на диэлектрических подложках. В более мощных системах для этих целей используются СВЧ-фильтры на объемных резонаторах и волноводах. Волноводные СВЧ-фильтры представляют собой отдельный класс перспективных функциональных устройств, динамично развивающийся в настоящее время. Разнообразие конструкций таких фильтров, технологий их изготовления и методов расчета весьма велико. В связи с этим в данной работе проведен обзор волноводных СВЧ-фильтров разных частотных диапазонов и предложена их классификация. Определены тенденции и перспективные направления развития данных устройств. Показано, что волноводные фильтры успешно адаптированы для работы на разных частотах, как в микроволновом, так и в терагерцевом диапазонах. Проанализированы структуры этих фильтров, некоторые методы их изготовления и математического моделирования.

Ключевые слова: волноводные фильтры, СВЧ-диапазон, индуктивные и емкостные неоднородности, методы расчета.

Abstract. Various frequency selective devices manufactured by different technologies are used in modern microwave systems to filtering electromagnetic

signals. Planar structures on dielectric substrates find a wide spread in low- and average-level (less than 100 W) power systems. Microwave filters on cavities and waveguides are utilized in high-power systems for these purposes. Waveguide filters are the separate class of perspective functional devices dynamically developing in the present time. Diversity of designs of such filters, techniques of their manufacturing and methods of calculation is quite high. In conjunction with this a review of waveguide microwave filters of different frequency ranges is carried out in the present work. Their classification is proposed. It is shown that waveguide filters are well adapted for operating at different frequencies both in microwave and terahertz ranges. Structures of filters, some methods of their manufacturing and mathematical modeling are analyzed.

Key words: waveguide filters, microwave range, inductive and capacitive irregularities, computation techniques.

Введение

Устройства фильтрации электромагнитных (ЭМ) волн различных частотных диапазонов являются одними из наиболее широко распространенных компонентов современных радиолокационных, коммуникационных и измерительных систем. Рабочие характеристики этих систем во многом определяются электродинамическими параметрами СВЧ-фильтров. Теория данного научного направления СВЧ-техники сформировалась уже давно [1] и продолжает интенсивно развиваться [2-4]. Разнообразие устройств фильтрации весьма велико и определяется выбором их электронно-компонентной базы, условиями эксплуатации и назначением.

Одним из важнейших требований к некоторым фильтрам, применяемым, например, в радиолокации и системах космической связи (СКС) является достаточно высокий уровень их рабочих мощностей, что ограничивает использование планарных структур. Для этих целей хорошо приспособлены резонаторные и волноводные СВЧ-структуры. При этом, те из них, которые выполняются в виде связанных объемных резонаторов, могут иметь как

волноводные [5], так и коаксиальные [6] элементы связи с внешними цепями, а их габаритные размеры определяются размерами именно резонаторов. В тоже время, габариты СВЧ-фильтров, реализованных на отрезках прямоугольных волноводов с металлическими неоднородностями в виде штырей и/или диафрагм, определяются размерами базовых волноводов, что, в ряде случаев, позволяет создавать более компактные по сравнению с резонаторными фильтрами структуры этих устройств.

Цель данного обзора - провести анализ известных из литературы структур волноводных СВЧ-фильтров и установить тенденции их дальнейшего развития.

1. Классификация структур волноводных СВЧ-фильтров

В теории фильтров [1] принято различать фильтры нижних частот (ФНЧ), фильтры верхних частот (ФВЧ), полосно-пропускающие фильтры (ППФ) и полосно-заграждающие фильтры (ПЗФ). Другая классификация касается вида амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) этих устройств: фильтры с максимально плоской АЧХ (Баттерворта), фильтры с осциллирующей АЧХ в полосе пропускания (Чебышева) и, так называемые, эллиптические фильтры [2], для которых характерны осцилляции АЧХ как в полосе пропускания, так и вне ее. Указанные фильтры имеют симметричную АЧХ. Возможно создание устройств фильтрации и с более сложной несимметричной АЧХ, для реализации которых уже нельзя использовать фильтры прототипы, как для фильтров Баттерворта и Чебышева. Кроме того, по величине такого параметра как относительная полоса пропускания ППФ и ПЗФ принято делить на две группы: широкополосные (более 10%) и узкополосные (менее 10%) [2].

Волноводные СВЧ-фильтры могут относиться к любой из указанных групп, но иметь разную конфигурацию. В данной работе предлагается другая классификация данных устройств в зависимости от их внутренней структуры. Рассмотрим следующие группы СВЧ-фильтров.

1.1. Фильтры с металлическими вставками в E-плоскости

Структуры подобного типа представляют собой отрезок ПрВ с металлическими вставками в E-плоскости, выполняющие роль инверторов

сопротивлений. Одна из таких конструкций, описанная в [3] приведена на рис.1. Цепочка связанных резонаторов, образованных регулярными и раздвоенными секциями волновода, формируют необходимую АЧХ чебышевского типа. Металлические вставки толщиной t и шириной w_i расположены на расстоянии L_i друг от друга (рис.1,а).

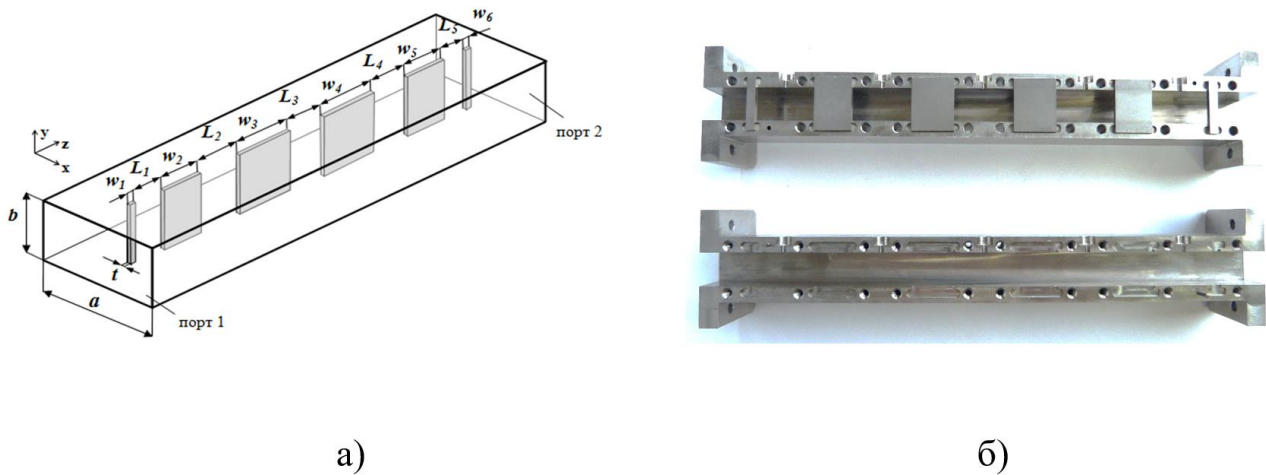


Рис.1. Конфигурация (а) и изображение конструкции (б) Е-плоскостного фильтра.

Такие фильтры широко применяются в современной СВЧ-технике для создания ППФ с полосой 1...15%. В частности, фильтр на рис.1,б был реализован на стандартном волноводе WR112 ($a = 28,49$ мм, $b = 12,62$ мм, где a и b - размеры широкой и узкой стенки ПрВ соответственно) и предназначен для использования в составе выходных мультиплексоров СКС. Его электродинамические характеристики можно найти в [3]. Размеры и параметры сразу нескольких аналогичных ППФ для различных частотных диапазонов приведены в [7].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований трех и пяти резонаторных Е-плоскостных фильтров с центральными частотами 15 ГГц, 33 ГГц, 63 ГГц и 75 ГГц представлены в [8]. В ряде случаев, количество отверстий в металлических вставках может быть несколько, как например, в [9], где были использованы такие вставки с тремя прямоугольными отверстиями, сдвинутыми относительно друг друга вдоль направления распространения ЭМ

волн. Конфигурация металлических вставок таких устройств фильтрации также может быть достаточно сложной. В частности, в [10] были рассмотрены сразу несколько вариантов топологии металлических вставок с емкостными элементами, позволившими реализовать на практике компактные полосовые фильтры X-диапазона.

В других случаях, конструкция фильтра включает не один, а два и более рядов металлических вставок. Одна из таких конфигураций, представляющая собой сдвоенные отрезки ПрВ с общей стенкой и отверстиями связи в Е-плоскости была рассмотрена в [11]. Такой подход к конструированию позволил авторам [11] спроектировать высокоэффективные компактные диплексеры Ka-диапазона. Другая структура, имеющая помимо основной вставки в Е-плоскости еще две, выполняющие функции подстроечных элементов была использована в [12] для разработки фильтра Ku-диапазона с относительной полосой пропускания сигнала 35% и центральной частотой 13,375 ГГц.

Разновидностью Е-плоскостных волноводных СВЧ-фильтров является планарная структура в виде тонкой диэлектрической подложки с элементами металлизации [13].

1.2. Фильтры с металлическим диафрагмами

Основным отличием данных структур от предыдущей группы фильтров является размещение металлических вставок, в виде диафрагм в плоскости, перпендикулярной направлению распространения ЭМ волны в регулярном ПрВ. Одной из наиболее известных структур подобного типа можно считать волноводный фильтр с индуктивными диафрагмами (рис.2), которые играют роль инверторов сопротивлений, а отрезки волновода между ними - резонаторов. Обе топологии на рис.1 и 2 относятся к категории фильтров с последовательно связанными резонаторами (*in-line*), которая считается хорошо изученной [3].

Один из таких фильтров на ПрВ WR137 ($a = 34,85$ мм, $b = 15,79$ мм) с шестью резонаторами и центральной частотой 6,8 ГГц, продемонстрировавший относительно широкую полосу пропускания был экспериментально исследован

в [1]. Несимметричное расположение вставок, например, только вдоль одной из боковых стенок также позволяет добиться приемлемых АЧХ полосовых фильтров. В [14] с помощью метода интегральных уравнений были построены численные модели *in-line* фильтров на базе волновода WR42 ($a = 10,67$ мм, $b = 4,32$ мм) с различным расположением вставок, в том числе, вдоль одной боковой стенки. При этом в диапазоне 23...25 ГГц была получена чебышевская АЧХ с приемлемой для практики крутизной. Несколько конструкций полосовых фильтров S- и C-диапазонов с двумя и тремя индуктивными диафрагмами были исследованы численно и экспериментально в [15].

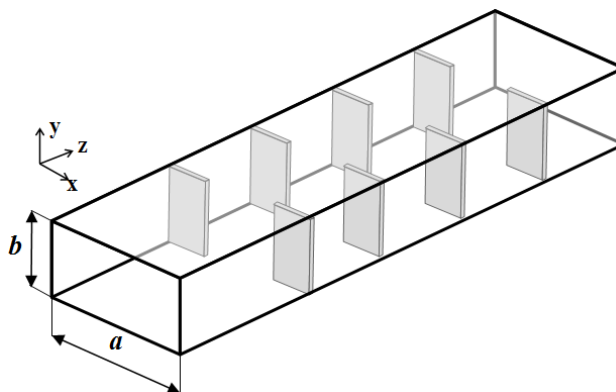


Рис.2. Фильтр с симметричными индуктивными диафрагмами.

В качестве инверторов сопротивлений в конструкциях волноводных фильтров применяются не только индуктивные, но и емкостные диафрагмы. Причем, иногда, они могут размещаться только на нижней стенке волновода. Пример реализации такого подхода приведен в [16] для создания ФНЧ Ku-диапазона с крутизной АЧХ до 78дБ/ГГц и коэффициентом отражения около 39 дБ в полосе заграждения 14...16 ГГц. Однако емкостные диафрагмы обладают более высокими потерями и снижают электрическую прочность по сравнению с индуктивными диафрагмами, что ограничивает их распространение в СВЧ-технике.

К этой же группе топологий принадлежат фильтры с резонансными диафрагмами. В частности, в [17] представлены результаты измерений полосовых фильтров S-диапазона (2...4 ГГц) с резонансными многощелевыми

диафрагмами, каскадно включенными в ПрВ WR284 ($a = 72,136$ мм, $b = 34,04$ мм). Компактный полосовой фильтр на WR112 ($a = 28,5$ мм, $b = 12,62$ мм) с набором металлических диафрагм двух типов: с одним и двумя отверстиями прямоугольной формы и центральной частотой 8,05 ГГц был построен и экспериментально исследован в [18]. В ряде случаев, форма отверстия диафрагм может быть выполнена, например, в виде ступенчатой щели, как это было сделано в [19] для создания полосового фильтра U-диапазона (40...60 ГГц).

1.3. Волноводно-штыревые СВЧ-фильтры

Волноводные СВЧ-фильтры, выполненные в виде отрезков ПрВ с металлическими штырями индуктивного или емкостного типов также находят широкое распространение в современной микроволновой технике. Чаще всего для этих целей используются цилиндрические штыри, индуктивного типа, соединяющие нижнюю и верхнюю стенки ПрВ, как показано на рис.3.

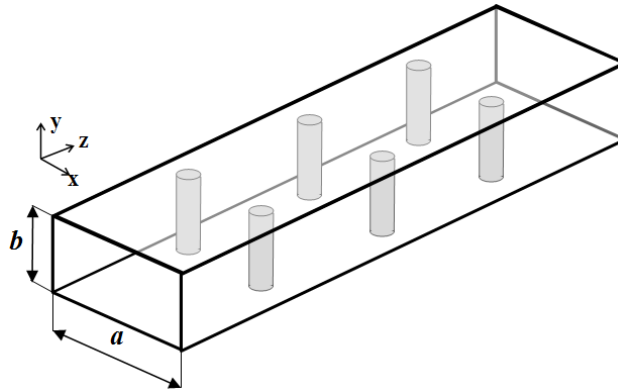


Рис.3. Волноводный фильтр с металлическими штырями.

Штыревые структуры обладают меньшими потерями, чем структуры с диафрагмами, что позволяет проектировать высокодобротные СВЧ-фильтры [20].

Одной из наиболее простых конфигураций полосовых фильтров может считаться структура, состоящая из отрезка ПрВ всего с двумя индуктивными штырями, расположенными один за другим вдоль направления распространения ЭМ волны на некотором удалении от боковой стенки [21]. Такая топология дает возможность создавать одномодовые фильтры с очень

узкой полосой пропускания и приемлемой для практики крутизной спада АЧХ. Увеличение числа стержней до семи, как было показано в [22] на примере фильтра X-диапазона с центральной частотой 9,5 ГГц приводит к расширению полосы пропускания за счет одновременно возбуждаемых нескольких мод и сохранению высокой крутизны АЧХ.

В [23] была реализована классическая структура полосового фильтра X-диапазона с центральной частотой 9 ГГц и чебышевской АЧХ, построенная на нескольких металлических решетках из двух стержней (рис.3). Расстояние между решетками вдоль продольной оси устанавливается по специальной методике [7], а для подстройки АЧХ применяются емкостные винты, что позволяет получить необходимые электродинамические характеристики фильтра.

В ряде случаев, форма самого штыря и его расположение в волноводе могут отличаться от общепринятых, как например в [24], где были предложены волноводные фильтры X- и Ku-диапазонов с тонкими ступенчатыми штырями в E- и H-плоскости. Аналогичная топология фильтра, но для U-диапазона (40...60 ГГц) была рассмотрена в [19]. Исследования, проведенные в [19, 24] показали, что данные структуры могут быть успешно адаптированы для создания компактных узкополосных СВЧ-фильтров различных частотных диапазонов.

1.4. Комбинированные структуры

В некоторых случаях для проектирования волноводных СВЧ-фильтров применяются комбинированные топологии с одновременным использованием металлических диафрагм, ребер и штырей. Обобщенная структура такого фильтра приведена на рис.4. При этом форма индуктивных и емкостных штырей, может быть как цилиндрической, так и прямоугольной.

Два прямоугольных емкостных штыря и индуктивная диафрагма были использованы в конструкции ПЗФ X-диапазона, разработанного в [25]. Первый металлический штырь в данной конструкции вплотную прилегает к боковой стенке, а второй штырь расположен на некотором удалении как от боковой стенки ПрВ, так и от первого штыря вдоль продольной оси. В такой структуре

возбуждаются две высокочастотные моды, формируя необходимую АЧХ заграждающего фильтра. В [26] конструкция полосового фильтра на волноводе WR5 ($a = 1,295$ мм, $b = 0,648$ мм) с индуктивными диафрагмами была дополнена емкостным штырем прямоугольной формы, размещенным на некотором расстоянии от боковой стенки между диафрагмами, что позволило увеличить число степеней свободы (размеров) структуры и найти оптимальное решение в диапазоне частот 160...200 ГГц. Аналогичный подход к конструированию волноводных СВЧ-фильтров был использован в [27], где структура с диафрагмами была дополнена уже четырьмя емкостными прямоугольными штырями и на базе ПрВ WR75 ($a = 19,05$ мм, $b = 9,525$ мм) был разработан ППФ X/Ku-диапазона с центральной частотой 12 ГГц и эллиптической АЧХ. Иногда вместо металлических штырей в конструкциях фильтров могут применяться диэлектрические стержни, как это было сделано, к примеру, в [22, 28].

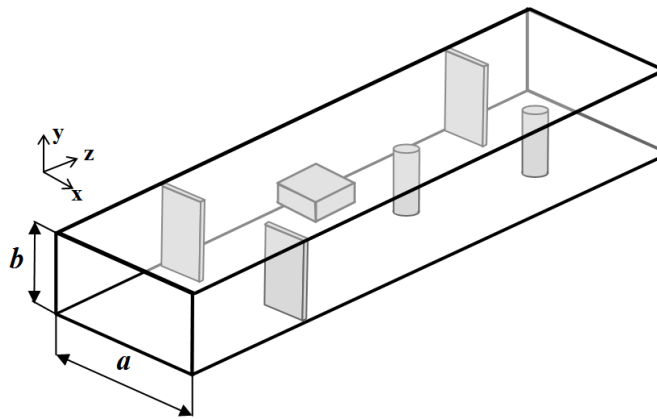


Рис.4. Фильтр с комбинированной топологией.

Разновидностью структур подобного типа можно считать структуры с диафрагмами и металлическими ребрами, расположенными на верхней стенке ПрВ. В частности, с помощью индуктивных диафрагм и металлических ребер сложной формы в [29] был построен полосовой фильтр X-диапазона с потерями порядка 0,35 дБ на центральной частоте 10,25 ГГц. Несколько примеров двухдиапазонных СВЧ-фильтров на ПрВ WR42 ($a = 10,67$ мм, $b = 4,14$ мм) и WR90 ($a = 22,86$ мм, $b = 10,43$ мм) с прямоугольными ребрами приведено в [30].

Как показали измерения [29, 30] такие структуры обладают эллиптической АЧХ.

2. Перспективные направления развития

Одним из важнейших требований к функциональным устройствам бортовой СВЧ-техники, как известно [3,6] является снижение их массогабаритных показателей. Как было показано в [31] этого можно добиться посредством использования волноводов сложных сечений (ВСС) в качестве базовых элементов микроволновых устройств. Так как критическая длина волны основного типа в таких линиях передачи больше, чем в ПрВ, то на фиксированной частоте размеры ВСС оказываются ниже. Примером успешной реализации такого подхода является волноводный фильтр миллиметрового диапазона длин волн на прямоугольном волноводе с Т-ребрами, разработанный и исследованный экспериментально в [32]. Примеры СВЧ-фильтров на ВСС можно найти в [33]. К недостаткам таких структур относятся: более высокое затухание сигнала и низкая электрическая прочность, что ограничивает их распространение.

Другое перспективное направление развития волноводных СВЧ-фильтров, также направленное на снижение их массогабаритных показателей связано с использованием планарных и металлических частотно-селективных поверхностей (ЧСП) различной топологии. Сразу несколько примеров успешной реализации таких структур с ЧСП, размещенными как в Е-, так и в Н-плоскости ПрВ представлено в [34]. Однако эксплуатация таких устройств фильтрации в условиях сильных климатических и механических воздействий, например в бортовой радиоэлектронной аппаратуре пока представляется проблематичной.

Тенденцией развития всей современной радиоэлектроники является освоение все более коротковолновых диапазонов ЭМ спектра, в том числе миллиметрового и субмиллиметрового (терагерцевого). Размеры функциональных устройств в этих диапазонах становятся крайне малы, что потребовало разработки новых технологий создания подобных устройств: 3D

печати, прецизионной металлообработки (*micromachining*), лазерной гравировки и т.д. С использованием этих технологий в настоящее время уже созданы конструкции волноводных фильтров. Например, в [35] были изготовлены два волноводных полосовых фильтра с чебышевской АЧХ и центральными частотами 87,5 ГГц и 100 ГГц. Первый из них с полосой пропускания 11,5% был изготовлен с помощью 3D печати, а второй с полосой 4% - с привлечением лазерной гравировки (*laser micromachining*). Еще один волноводный фильтр терагерцевого диапазона с широкой полосой пропускания 180...300 ГГц был изготовлен по МЕМС-технологии на базе реберной волноводной структуры и экспериментально исследован в [36]. Фильтр с индуктивными диафрагмами (рис.2), центральной частотой 90 ГГц и полосой пропускания 11% был выполнен по технологии 3D печати и исследован в [37].

Для изготовления волноводных элементов СВЧ техники широкое распространение в последние годы получила SIW-технология. SIW (Substrate Integrated Waveguide) или интегрированный в подложку волновод - это волноведущая структура, состоящая из двух плоско-параллельных металлических пластин, соединенных двумя рядами цилиндрических штырей. То есть, функциональные элементы СВЧ-техники на ПрВ, в том числе и фильтры, могут быть реализованы на базе современных планарно-интегральных технологий. Подавляющее большинство таких фильтров имеют коаксиальные и микрополосковые элементы связи с внешними цепями [38]. Тем не менее, ряд разработок волноводных СВЧ-фильтров выполняются полностью на базе ПрВ [33,39]. Данная технология является, пожалуй, наиболее перспективной в плане снижения веса и стоимости производства устройств фильтрации микроволнового диапазона.

3. Методы моделирования

Для анализа некоторых элементов волноводных СВЧ фильтров, например решетчатых диафрагм (наборов цилиндрических индуктивных штырей, расположенных в плоскости поперечного сечения волновода) в ряде случаев могут быть успешно использованы аналитические соотношения, учитывающие

частоту ЭМ волны и размеры металлических решеток, приведенные в [40]. Для нормированной проводимости индуктивной и емкостной диафрагмы в [40,41] также можно найти приближенные формулы. Как было показано в [42] распределение ЭМ поля в пространстве между концом емкостного штыря и стенкой ПрВ описывается полиномами Гегенбауэра, коэффициенты которых определяются в ходе решения интегрального уравнения с помощью аппроксимации Чебышева. Для такой модели в [43] были найдены аналитические соотношения для анализа реактивной проводимости с учетом размеров анализируемой штыревой структуры. В ряде случаев, для расчета штыревых волноводных структур применяется метод эквивалентных схем [44].

Волноводные СВЧ фильтры, как правило, имеют достаточно сложную 3D конфигурацию и для их расчета требуются высокоэффективные численные алгоритмы дискретизации дифференциальных уравнений ЭМ поля [45]. В частности, одним из наиболее часто используемых инструментов численного анализа таких структур является метод конечных элементов (МКЭ), реализованный, к примеру, в пакете программ *Ansys HFSS* [12,21,23] или в пакете *μWave Wizard* [25]. Также часто для расчета устройств фильтрации применяется метод конечного интегрирования (МКИ) и пакет программ на его основе *CST Microwave Studio* [10, 16, 17]. В ряде случаев для этих целей привлекается метод интегральных уравнений [14] и метод частичных областей [33, 39].

Для оптимизации волноводных СВЧ-фильтров эффективно адаптирован подход, базирующийся на теории искусственных нейронных сетей [21, 26], а также оптимизационные модули известных пакетов прикладных программ, например *CST Microwave Studio* [16].

Заключение

Обзор технических решений волноводных СВЧ-фильтров, проведенный в данной работе показал, что наряду с резонаторными устройствами фильтрации наблюдается дальнейшее усовершенствование уже существующих конструкций и ведется активный поиск новых топологий фильтров на ПрВ с высокими

уровнями рабочих мощностей. Из рассмотренных групп фильтров наиболее активное развитие в последние годы получили Е-плоскостные и комбинированные структуры таких устройств. При этом постоянно повышаются требования к электродинамическим характеристикам и степени надежности фильтров, снижению их массогабаритных показателей, при минимальной сложности изделий и стоимости их изготовления. Большое внимание уделяется многодиапазонным фильтрам.

Все более широкое распространение находят новые технологии изготовления (3D печать, прецизионная лазерная и механическая металлообработка и т.д.) устройств фильтрации сложной топологии особенно в миллиметровом диапазоне, где их размеры малы. Помимо традиционных схемотехнических подходов к расчету таких устройств успешно используются высокоэффективные численные алгоритмы полноволнового 3D моделирования с привлечением различных методов оптимизации технических решений и структурного синтеза.

Литература

1. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. *Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи*. Пер с англ. под ред. Л.В. Алексеева и Ф.В. Кушнера. Москва, Связь. 1971. Т.1. 440 с. Т.2. 496 с.
2. Cameron R.J., Kudsia C.M., Mansour R.R. *Microwave filters for communication systems*. NY, Wiley. 2007. 772 p.
3. Мещанов В.П. *СВЧ-фильтры и мультиплексоры для систем космической связи*. Москва, Радиотехника, 2017. 256 с.
4. Гуляев Ю.В. *Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы, структуры, устройства*. Москва, Радиотехника. 2020. 504 с.
5. Cogollos S., Brumos M., Boria V.E. et al. A systematic design procedure of classical dual-mode circular waveguide filters using an equivalent distributed model. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2012. Vol.60. No 4. P. 1006-1017. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2012.2183381>

6. Doumanis E., Goussetis G., Kosmopoulos S. *Filter design for satellite communications*. Boston: Artech House. 2015. 204 p.
7. Шаров Г.А. *Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн*. Москва, Горячая линия-Телеком. 2016. 640 с.
8. Vahldieck R., Bornemann J., Arndt F., Grauerholz D. Optimized waveguide E-plane metal insert filters for millimeter-wave applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1983. Vol.31. No.1. P.65-69. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1983.1131430>
9. Goussetis G., Feresidis A.P., Budimir D., Vardaxoglou J.C. Compact ridge waveguide filter with parallel and series-coupled resonators. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2005. Vol.45. No.1. P.22-23. <https://doi.org/10.1002/mop.20711>
10. Mohottige N., Glubokov O., Jankovich U., Bidimir D. Ultra compact inline E-plane waveguide bandpass filter using cross coupling. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2016. Vol.64. No.8. P.2561-2571. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2578329>
11. Ofli E., Vahldieck R., Amari S. Novel E-plane filter and duplexers with elliptic response for millimeter-wave applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2005. Vol.53. No.3. P.843-851. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.842506>
12. Gowrish B., Mansour R.R. A novel bandwidth reconfigurable waveguide filter for aerospace applications. *IEEE Microwave and Wireless Technologies*. 2020. Vol.30. No. 6. P. 577-580. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2020.2989283>
13. Arndt F., Bornemann J., Grauerholz D., Vahldieck R. Theory and design of low-insertion loss fin-line filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1982. Vol. 30. No 2. P.155-163. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1982.1131041>
14. Matsushima A., Fukuda Y. Numerical analysis of waveguide bandpass filters using singular integral equations and construction of simple design formulas. *Electrical Engineering in Japan*. 2004. Vol.148. No.4. P.17-25.

<https://doi.org/10.1002/eej.10251>

15. Choocadee S., Akatimagool S. The simulation, design and implementation of bandpass filters in rectangular waveguides. *Electrical and Electronic Engineering*. 2012. Vol.2. No.3. P.152-157. <https://doi.org/10.5923/j.eee.20120203.08>
16. Xu Z.-B., Guo J., Qian C., Dou W.-B. A novel quasi-elliptic waveguide transmit reject filter for Ku-band vsat transceivers. *Progress in Electromagnetics Research*. 2011. Vol.117. P.393-407. <https://doi.org/10.2528/PIER11051601>
17. Guo Z.-C., Zhu L., Wong S.-W. Synthesis of transversal bandpass filter on stacked rectangular H-plane waveguide cavities. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2019. Vol.67. No.9. P.3651-3660. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2925341>
18. Cai S.-F., Wang Q.-Y., Wang Z.-Y., Zhai Y.-F. Design of a FSS waveguide filter at 8.05 GHz. *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Art of Miniaturizing RF and Microwave Passive Components*. 2008. Chengdu, China. P.173-175. <https://doi.org/10.1109/IMWS.2008.4782241>
19. Prikolotin S.A., Kirilenko A.A. Waveguide bandstop (bandpass) filters on stepped conductors (slots) sections. *Proceedings of the 41st Microwave European Conference*. 2011. Manchester. UK. P.365-368. <https://doi.org/10.23919/EuMC.2011.6101927>
20. Морозов А.В., Наумов П.Н., Нырцов А.Н. *Устройства сверхвысоких частот и антенны*. Москва, Радиотехника. 2009. 432 с.
21. Fedi G., Manetti S., Pelosi G., Seller S. Design of cylindrical posts in rectangular waveguide by neural network approach. *Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society Symposium*. Vol.2. 2000. Salt-Lake City. USA. P.1054-1057. <https://doi.org/10.1109/APS.2000>
22. Bachiller C., Esteban H., Mata H., Valdes M.A., Boria V.E., Belenguer A., Morro J.V. Hybrid mode matching method for the efficient analysis of metal and dielectric rods in H plane rectangular waveguide devices. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2010. Vol.58. No.12. P.3634-3644. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2010.2083951>

23. Albooyeh M., Lotfi Neyestanak A.A., Mirzapour B. Wideband dual post waveguide band pass filter. *International Journal of Microwave and Optical Technology*. 2007. Vol.2. No.3. P.203-209.
24. Prikolotin S.A., Kirilenko A.A. A novel notch waveguide filter. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2010. Vol.52. No.2. P.416-420. <https://doi.org/10.1002/mop.24892>
25. Rosenberg U., Amari S. A novel band-reject element for pseudoelliptic bandstop filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2007. Vol.55. No.4. P.742-746. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2007.893653>
26. Zhao P., Wu K. Homotopy optimization of microwave and millimeter-wave filters based on neural network model. *Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2020. Vol.68. No.4. P.1390-1400. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2963639>
27. Zhang Y., Meng H., Wu K.-L. Direct synthesis and design of dispersive waveguide bandpass filters. *Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2020. Vol.68. No.5. P.1678-1687. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2020.2969385>
28. Bachiller C., Estaban H., Morro J.V., Boria V. Hybrid mode matching method for the efficient analysis of rods in waveguide structures. *Mathematical and Computer Modeling*. 2013. Vol.57. P.1832-1839. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.11.076>
29. Bastioli S., Marcaccioli L., Sorrentino R. Waveguide pseudoelliptic filters using slant and transverse rectangular ridge resonators. *Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2008. Vol.56. No.12. P.3129-3136. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2008.2007137>
30. Bastioli S., Marcaccioli L., Sorrentino R. Compact dual-mode rectangular waveguide filters using square ridge resonators. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. 2009. Vol.1. No.4. P.241-247. <https://doi.org/10.1017/S1759078709990286>
31. Заргано Г.Ф., Ляпин В.П., Михалевский В.С. и др. Волноводы сложных сечений. М.: Радио и связь, 1986. 124 с.

32. Labay V.A., Bornemann J. CAD of T-septum waveguide evanescent-mode filters. *Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1993. Vol.41. No.4. P.731-733. <https://doi.org/10.1109/22.231675>
33. Земляков В.В., Заргано Г.Ф. *Волноводные селективные устройства*. Ростов-на-Дону, Изд-во ЮФУ. 2019. 310 с.
34. Rajovic S.S., Potrebic M., Tosic D.V. *Advanced filtering waveguide components for microwave systems in Microwave Systems and Applications*. London: Intech Open Publishing. 2017. P. 41-61. <http://dx.doi.org/10.5772/66228>
35. Shang X., Penchev P., Lancaster M.J., et al. W-band waveguide filters fabricated by laser micromachining and 3D printing. *Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2016. Vol.64. No.8. P.2572-2580. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2574839>
36. Ding J., Hu J., Liu D. et al. A 240-GHz wideband ridged waveguide filter based on MEMS process. *Journal of Millimeter and Terahertz Waves*. 2017. V.38. P. 283-291. <https://doi.org/10.1007/s10762-016-0332-3>
37. Salek M., Shang X., Roberts R.C. et al. W-band waveguide bandpass filters fabricated by micro laser sintering. *Transactions on Circuits and Systems*. 2019. Vol.66. No.1. P. 61-65. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2018.2824898>
38. Chen X.-P., Wu K. Substrate integrated waveguide filters: design techniques and structures. *IEEE Microwave Magazine*. 2014. Vol.9. P.121-133. <https://doi.org/10.1109/MMM.2014.2332886>
39. Zemlyakov V.V. The band-pass SIW-filter based on L-ridged rectangular waveguide. *Proceedings of the Electromagnetics Research Symposium*. 2013. Stockholm. Sweden. P. 605-609.
40. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. *Справочник по элементам волноводной техники*. Москва, Советское радио. 1967. 652 с.
41. Будурис Ж., Шеневье П. *Цепи сверхвысоких частот*. Москва, Советское радио. 1979. 288 с.

42. Roelvink J., Williamson A.G. Analysis of a solid variable-length cylindrical post in a rectangular waveguide. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*. 2007. Vol.1. No.2. P.506-512. <https://doi.org/10.1049/iet-map:20060182>
43. Roelvink J., Williamson A.G. T-equivalent circuit parameters of a variable-length cylindrical post in a rectangular waveguide. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2008. Vol.18. No.7. P.425-427. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2008.924904>
44. Williamson A.G. Equivalent circuits for gap- and coax-excited circular posts in rectangular waveguide. *Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2009. Vol.57. No.10. P.2384-2390. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2009.2029621>
45. Григорьева А.Д. *Методы вычислительной электродинамики*. Москва, Физмаилит. 2012. 432 с.

Для цитирования:

Комаров В.В., Лукьянов М.А. Волноводные СВЧ-фильтры: технические решения, тенденции развития и методы расчёта. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.1.7>