

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.4.4>

УДК: 621.372

НЕОТРАЖАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ СВЧ (ОБЗОР)

Н.Д. Малютин, Т.Т. Чинь, Г.А. Малютин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2024 г.

Аннотация. Предметом обзора являются неотражающие фильтры (НФ) СВЧ разных типов, называемые также поглощающими фильтрами. Приведены краткие сведения из истории создания НФ. Рассматриваются направленные фильтры, послужившие прототипом неотражающих фильтров, НФ на сосредоточенных элементах, неотражающие фильтры с нагруженными отрезками линий передачи, неотражающие фильтры на связанных линиях. Все эти типы устройств отличаются от обычных фильтров тем, что они остаются согласованными как в рабочей полосе пропускания (или непропускания), так и вне ее. Часть нежелательного частотного спектра сигнала, попадающего на вход таких фильтров, не отражается обратно к источнику сигнала, а поглощается в самом фильтре. Этот принцип функционирования НФ обеспечивает эффективное согласование с другими устройствами системы, что является ключевой характеристикой при проектировании широкополосной аппаратуры с несколькими выходными и входными каналами, настроенными на разные частоты. Дана оценка современного состояния разработок, перспективы миниатюризации и улучшения характеристик фильтров неотражающего типа.

Ключевые слова: неотражающие фильтры, поглощающие фильтры, направленные фильтры, сосредоточенные RLC элементы, нагруженные отрезки линий передачи, связанные линии.

Финансирование: Исследование финансово поддержано Министерством науки и высшего образования России по проекту № FEWM-2023-0014 от 01.03.2023.

Автор для переписки: Чинь То Тхань, thanhvodoi1995@gmail.com

Введение

Фильтры являются широко применяемыми устройствами в радиотехнических системах, от средств связи до радиоастрономии. Фундаментальные принципы работы и теория фильтров, их оптимизация и проектирование хорошо известны еще с середины прошлого века. Тем не менее, сегодня эта область в радиоэлектронике является активно исследуемой и актуальной в связи с постоянным ростом требований к аппаратуре по электромагнитной совместимости, чистоте спектра формируемых сигналов [1-10].

Особый интерес представляют фильтры неотражающего или поглощающего типа. Часть частотного спектра сигнала, поступающего на вход таких фильтров в полосе заграждения, не отражается обратно к источнику сигнала, а поглощается самим фильтром в противовес традиционным решениям на основе добротных резонаторов. Это позволяет обеспечить хорошее согласование с другими устройствами системы, что является важной характеристикой при проектировании широкополосной аппаратуры, имеющей несколько выходных каналов, настроенных на разные частоты.

Основные цели настоящего обзора состоят в следующем: изложить краткие исторические сведения об истоках создания неотражающих фильтров; рассмотреть состояние работ по направленным фильтрам, как близкого аналога неотражающих фильтров; оценить современное состояние разработок, перспективы миниатюризации и улучшения характеристик неотражающих

фильтров. Далее рассматриваются в основном полосковые неотражающие фильтры.

1. История создания неотражающих фильтров

Идеи и решения проблемы построения неотражающих фильтров (НФ) при сохранении свойства частотной селекции рассмотрены, например, в работах [11-16].

Работа [11] – одна из первых, в которой сообщается о разработке неотражающего разветвляющегося фильтра СВЧ в волноводном исполнении. Структурная схема устройства показана на рис. 1. Схема N -канального разветвленного фильтра включает следующие элементы: гибридные волноводные переходы, четвертьволновые волноводы; отражающие фильтры; нагрузки. Гибридный переход (рис. 2) имеет плечи A и B , которые являются ведомыми, расположенными симметрично относительно входного ведущего плеча C . Плечо D соединено с плечами A и B коаксиальной линией. Эта линия соединена с волноводом D с помощью обычного зонда. Центральный проводник проходит через переход таким образом, что он нормален к электрическим векторам волн в волноводах A , B и C .

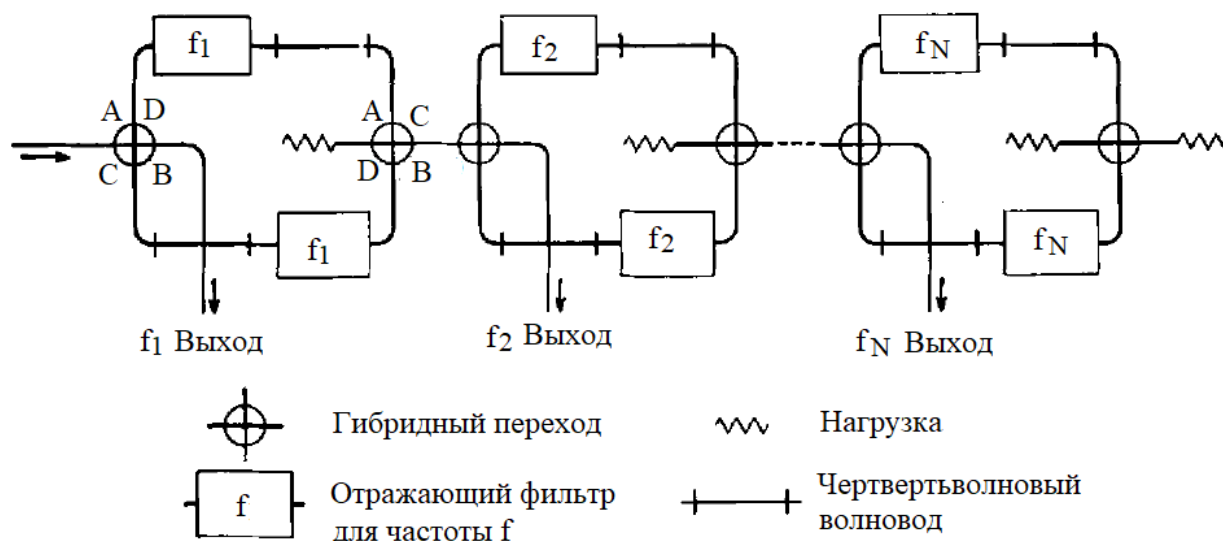


Рис. 1. Структурная схема неотражающего N -канального разветвляющегося фильтра.

Работа фильтра по схеме рис. 1 основывается на том, что многочастотный сигнал поступает на вход гибридного перехода, разделяется на две составные части. С помощью отражающих фильтров часть спектра на определенной частоте отражается и попадает на плечо D. Оставшийся спектр проходит дальше, на следующий каскад. Для того, чтобы отраженный сигнал не попадал обратно на вход, в гибридном переходе установлен зонд P (рис. 2). Конструкция фильтра в сборе показана на рис. 3.

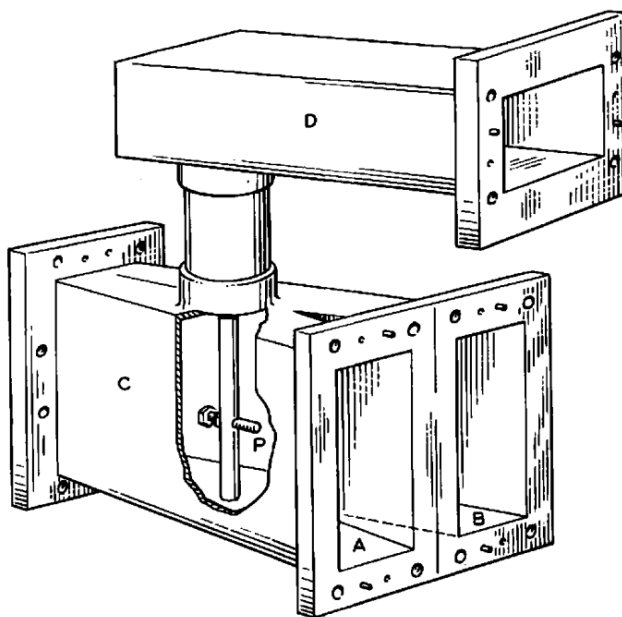


Рис. 2. Гибридный переход.

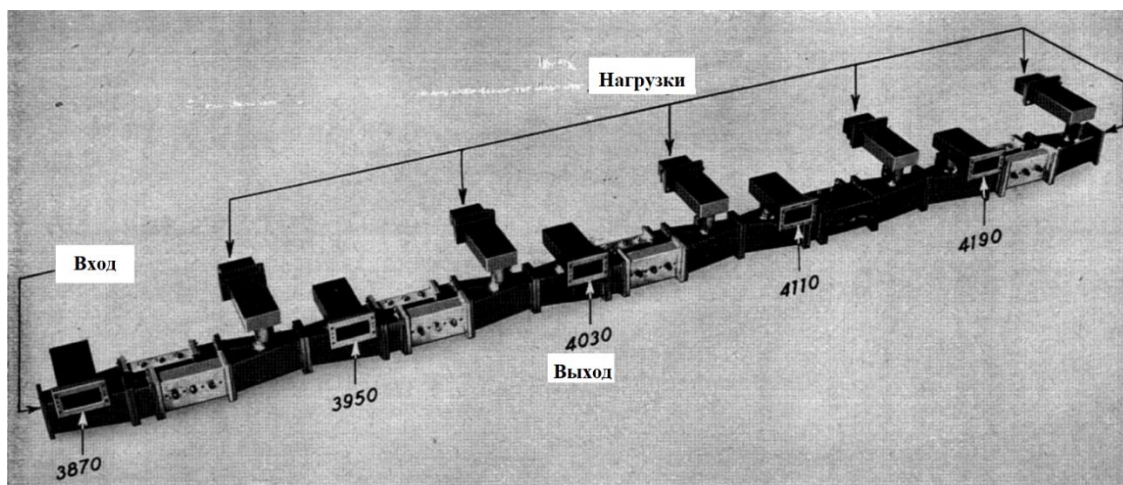


Рис. 3. Конструкция неотражающего N -канального разветвляющегося фильтра.

Как видим, образец фильтра представляет достаточно сложную конструкцию в волноводном исполнении. Тщательная настройка отражающих фильтров, введение нагрузок, поглощающих несбалансированную энергию в плечах D и C, позволили обеспечить фильтрацию входного сигнала с диапазоном частот от 3950 МГц до 4190 МГц с шагом 80 МГц. При этом коэффициент стоячей волны в полосе частот каждого канала не превышал 0,6 дБ, а вносимые потери были около $-1,0$ дБ. Таким образом, авторы разработки [11], применив гибридное устройство мостового типа, отражающие фильтры в каждом плече моста и балластные нагрузки добились предельно возможных низких потерь при хорошем согласовании со стороны входа.

Другое интересное применение технологии неотражающих фильтров показано в работе [12]. В этой статье предложено фильтровать неосновные моды в волноводах без существенных потерь для основной моды колебаний. Сначала производится фильтрация второй гармоники в ответвление в виде ловушки-волновода через связывающую апертуру, а затем энергия нежелательного типа колебаний поглощается в среде с потерями и на оконечной нагрузке этого ответвления. Показано уменьшение мощности «паразитных» типов волн на -50 дБ по отношению к санкционированному типу колебаний в волноводе. Таким образом, принцип получения эффекта неотражающего фильтра состоял в селекции нежелательных мод и направлением их в дополнительный канал с поглощающим материалом и согласованной нагрузкой этого канала.

Стремительное развитие и применение самых разных типов полосковых линий передачи начиная с 60-70-х годов XX века создало уникальные возможности для создания неотражающих фильтров. Эволюция НФ на примере фильтров нижних частот (ФНЧ) продемонстрирована в работе [13]. В этой работе сообщается о разработке ФНЧ на основе копланарной линии передачи с частотой среза 40 ГГц и с потерями $-2,5$ дБ в полосе прозрачности, возвратными потерями не хуже -10 дБ в полосе непрозрачности. Разработка топологии неотражающего фильтра нижних частот выполнена с использованием

прототипа на RLC элементах. Получены зависимости частотных характеристик НФ от количества звеньев. В сравнении с волноводными фильтрами разработка полосковых НФ позволила значительно улучшить параметры широкополосности, технологичности, но стало неизбежным увеличение потерь и ухудшение согласования до приемлемого уровня.

Следует отметить, что далеко не сразу разработка неотражающих фильтров получила высокий уровень интереса, так как традиционные СВЧ фильтры на волноводах, коаксиальных резонаторах, полосковых линиях явно превосходили по избирательности неотражающие фильтры. Однако потребности обеспечения электромагнитной совместимости и построения многоканальных систем стимулировали разработки в этом направлении, особенно в начале 2000-годов [13-16].

2. Направленные фильтры

Основными элементами направленных фильтров служат резонатор бегущей волны и направленные ответвители на связанных линиях или волноводах [17-19]. При этом могут быть спроектированы режекторные [20, 21] или полосовые [25] неотражающие (поглощающие) фильтры.

Схема включения резонатора бегущей волны для построения режекторных фильтров неотражающего типа, взятая из [20], показана на рис. 4.

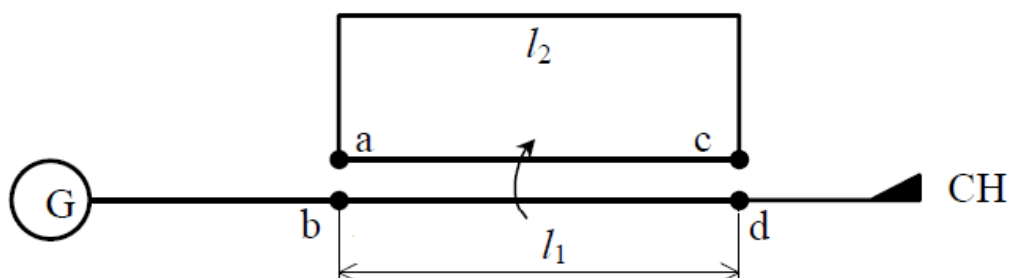


Рис. 4. Режекторный фильтр на основе резонатора бегущей волны:
 G – СВЧ-генератор; СН – согласованная нагрузка;
 $l_1 = \lambda_B/4$ – длина отрезка связанных линий; $l_2 = 3\lambda_B/4$ – длина линии, образующей замкнутое кольцо от точки *a* до точки *c* [20].

Устройство представляет собой отрезок полосковой линии или коаксиального кабеля, замкнутый в кольцо и связанный с питающей линией через направленный ответвитель с распределенной электромагнитной связью. Такая конструкция не позволяет получить хорошее согласование в широкой полосе частот, так как вне узкого диапазона частот резонанса отражение энергии достаточно велико по причине малых потерь в кольце. Решить задачу уменьшения отражения позволяет схема, показанная на рис. 5, в которой резонатор бегущей волны дополнительно связан с линией передачи с длиной l_2 и нагрузками в портах 3 и 4. Схема фильтра, показанная на рис. 5, по существу является классическим направленным фильтром, используемым как четырехполюсник. При оптимально выбранных коэффициентах связи k_1 , k_2 между отрезками связанных линий длиной l_1 и l_2 возможно улучшить согласование на частотах вне полосы запираания.

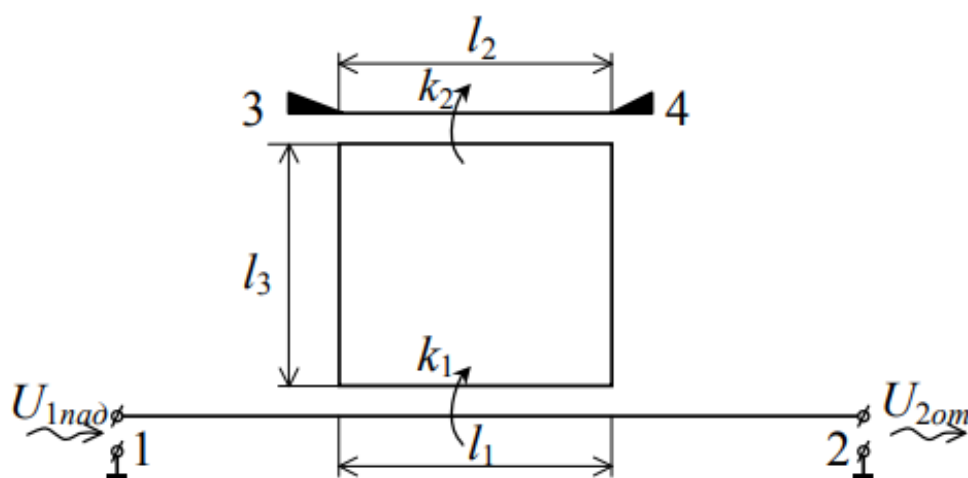


Рис. 5. Схема поглощающего режекторного фильтра на основе резонатора бегущей волны, связанного с нагруженным отрезком линии [20].

В работах [20, 21], утверждается, применение в СВЧ-фильтрах резонаторов бегущей волны и направленных ответвителей позволяет реализовать фильтры, обеспечивающие высокий уровень согласования входа фильтра с источником сигнала как в полосе пропускания, так и в полосе заграждения. Этот эффект обеспечивается за счет передачи сигнала либо в согласованную нагрузку, либо за счет резонансного поглощения мощности в кольцевом

резонаторе. Однако экспериментального подтверждения в публикациях [20, 21] не приведено. Очевидно, что на согласование как в полосе запираания, так и вне ее, будет сказываться неравенство фазовых скоростей в связанных линиях, направленных ответвителей и другие факторы [22, 23], поэтому аналитические соотношения, приводимые в [20], позволяют оценить потенциально достижимые параметры при идеальных условиях работы, направленных ответвителей.

Интересная модификация направленного фильтра в гибридном исполнении предложена и исследована в работе [24]. Схема такого фильтра приведена на рис. 6. Направленный фильтр состоит из двух направленных ответвителей на связанных линиях (рис. 7, а) и двух фильтров нижних частот (ФНЧ) на связанных индуктивностях (рис. 7, б). Применение распределенных и сосредоточенных элементов в конструкции направленного фильтра позволяет уменьшить габариты устройства, что важно в дециметровом диапазоне частот.

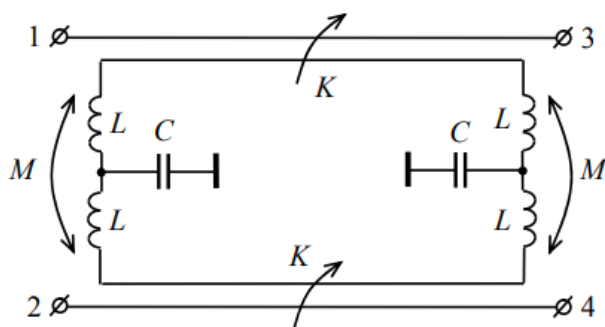


Рис. 6. Схема направленного фильтра в гибридном исполнении [24].

В [24] выполнен расчет коэффициентов матрицы рассеяния идеального направленного неотражающего фильтра, выполненного по показанной на рис. 6 схеме. Получены характеристики однозвенного полосно-пропускающего фильтра при передаче сигнала из порта 1 в порт 2 (коэффициент передачи $S_{12} \approx 1$).

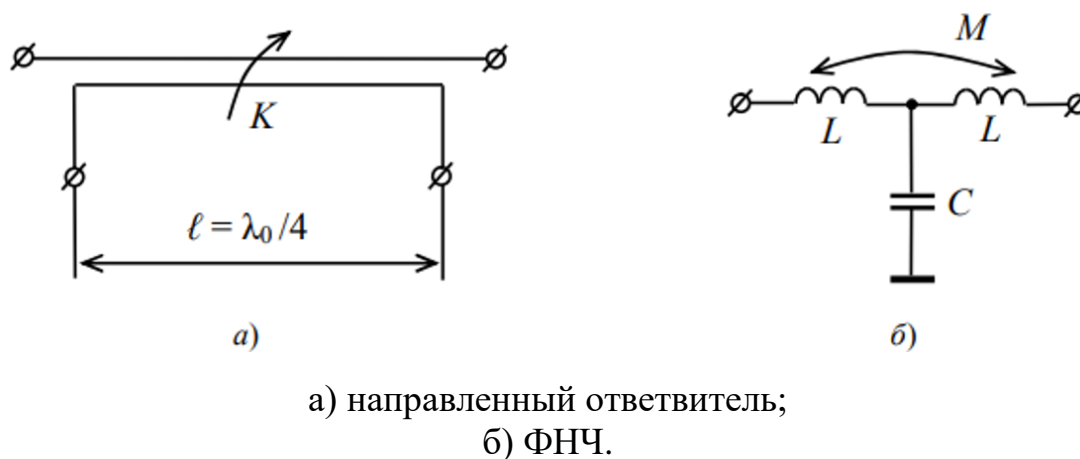


Рис. 7. Элементы направленного фильтра [24].

При передаче из порта 1 в порт 3 получена характеристика полосно-запирающего фильтра (коэффициент передачи $S_{13} \approx 0$) при максимальном коэффициенте отражения $S_{11} \leq 0.077$ от входного порта 1. Порт 4 развязан, коэффициент передачи из порта 1 в порт 4 составляет $S_{14} \leq 0.08$.

В работе [25] сообщается о разработке двух полосковых фильтров бегущей волны. Исследуемые фильтры бегущей волны входят в состав модуля, в котором имеются еще три направленных ответвителя и три нагрузки, образующих каскадное соединение двух направленных фильтров. Фото устройства показано на рис. 8. Модуль имеет габариты $460 \times 160 \times 20$ мм. Модуль выполнен на симметричной воздушно-полосковой линии передачи с волновым сопротивлением $Z_0 \approx 50$ Ом. Частоты настройки фильтров равны $f_1 = 837,5$ МГц и $f_2 = 1090,0$ МГц, а полосы пропускания 30 ± 5 и 40 ± 5 МГц соответственно, минимальные потери в полосе пропускания не превышают 3,2 дБ.

Основными недостатками этого фильтра являются значительные габариты, большие потери в полосе пропускания, существование нежелательных полос пропускания, кратных основным частотам f_1 и f_2 .

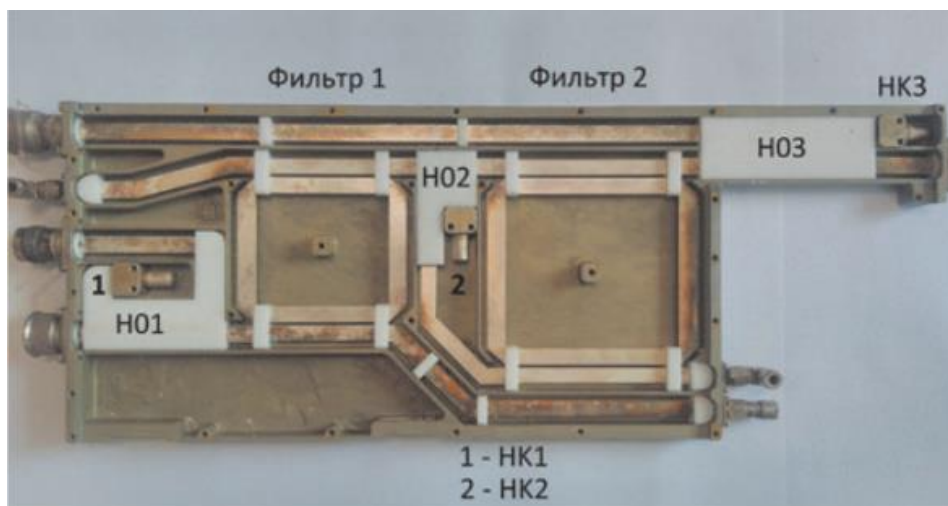


Рис. 8. Фото конструкции модуля с двумя фильтрами бегущей волны [25].

В работе [26] представлен микрополосковый направленный фильтр в планарном исполнении, выполненный на отрезках микрополосковых линий (рис. 9). Частотные характеристики S -параметров направленного фильтра в диапазоне 2-3 ГГц показаны на рис. 10. Коэффициент отражения S_{11} не превышает -22 дБ для всего рассматриваемого частотного диапазон. На центральной частоте $S_{11} = -25$ дБ. Коэффициенты передачи $S_{41} = -2,67$ дБ, а развязка порта 2 и порта 1 в полосе прозрачности полосы фильтра $S_{21} = -12,41$ дБ.

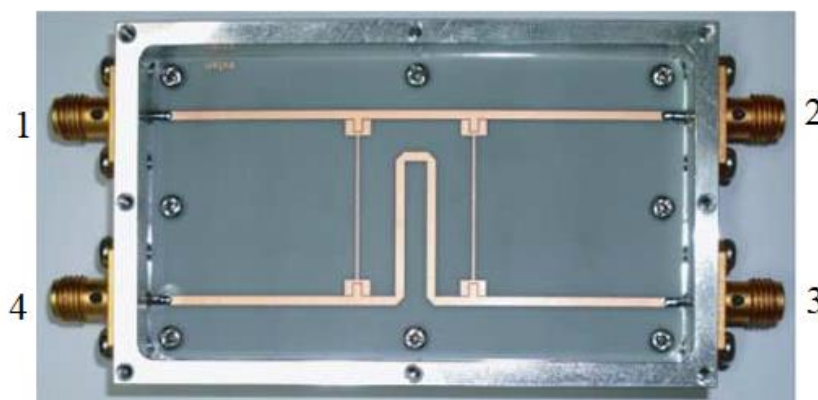


Рис. 9. Макет однокаскадного микрополоскового направленного фильтра [26].

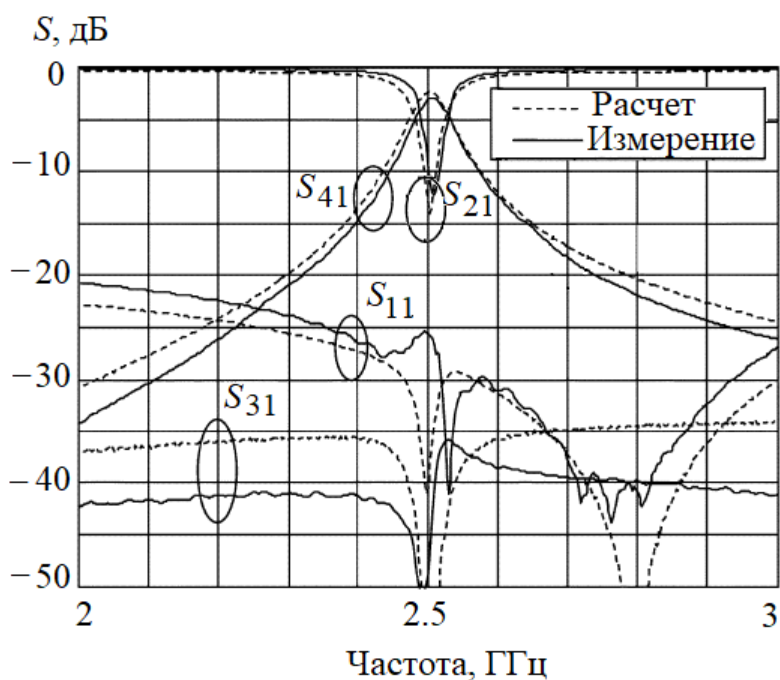
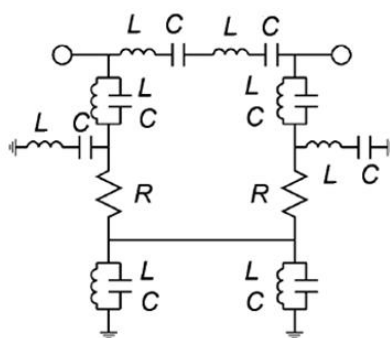


Рис. 10. Частотные характеристики S-параметров направленного фильтра в диапазоне 2-3 ГГц [26]

Таким образом, рассмотренные направленные фильтры позволяют реализовать функции полосно-пропускающих и полосно-запирающих фильтров с хорошим согласованием во всей полосе частот. Но общими недостатками являются большие габариты и существование нежелательных полос пропускания. Это связано с тем, что для изготовления мостов используются распределенные элементы в виде линий передачи. Поэтому уменьшение размеров мостов представляет актуальную задачу. В работах [27-28] приведено описание методов миниатюризации двухшлейфного моста. Процедура, на которой основан принцип уменьшения геометрических размеров мостов, заключается в замене четвертьволновых отрезков микрополосковой линии передачи на структуры, которые будут обладать схожими характеристиками с заменяемыми отрезками в определенной полосе частот.

3. Неотражающие фильтры на сосредоточенных элементах

Применение сосредоточенных элементов на высоких частотах и СВЧ стало возможным при переходе к технологиям SMD компонент, что позволило разработать компактные конденсаторы, резисторы и катушки индуктивности. Ко времени перехода к SMD технологии теория цепей на сосредоточенных элементах получила глубокое развитие. До этого была разработана и распространена методика представления СВЧ волноводных и полосковых фильтров эквивалентными схемами в виде цепей на сосредоточенных элементах. Поэтому оставалось только изготовить сами RLC компоненты и собрать подобно тому, как это делалось на низких частотах. Однако при таком подходе оказалось, что сосредоточенные элементы подвержены частотной зависимости их параметров и вырождению в распределенные элементы на СВЧ. По мере развития численных методов электродинамического анализа СВЧ устройств, стало возможным исследовать частотные характеристики и предельные возможности RLC компонент для проектирования самых разнообразных частотно-селективных устройств. Неотражающие фильтры стало возможным создавать исключительно на сосредоточенных элементах, если они реализуемы на СВЧ. В работе [29] представлен полосно-пропускающий трехкаскадный фильтр с нижним и верхним полюсами на частотах 110 и 310 МГц соответственно. Схема полосового однокаскадного фильтра показана на рис. 11(а), а его фотография на рис. 11(б). Частотные зависимости S -параметры показаны на рис. 12. Видно, что во всем частотном диапазоне коэффициент возвратных потерь не превышает -10 дБ. Для улучшения избирательности в полосе пропускания последовательно включаются несколько таких каскадов.



а)



б)

а) схема неотражающего полосно-пропускающего фильтра;
б) фото изготовленного макета.

Рис. 11. Неотражающий полосно-пропускающий фильтр [29].

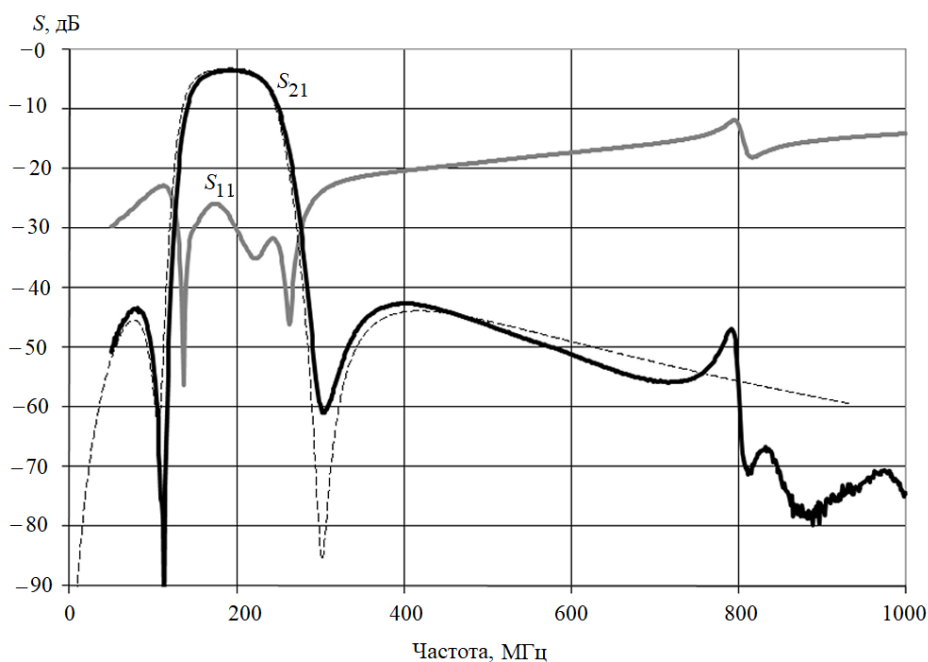
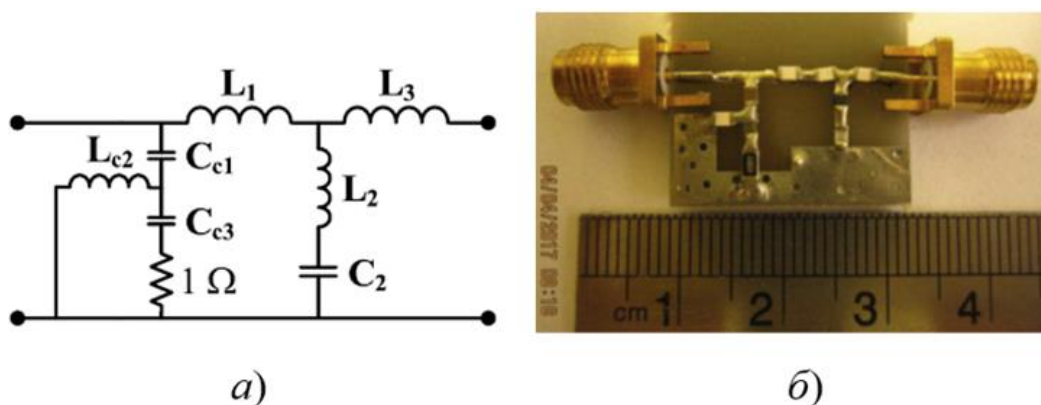


Рис. 12. Частотные зависимости S -параметров ППФ [29].

В работе [30] представлен неотражающий фильтр, имеющий обратную чебышевскую характеристику с произвольным затуханием в полосе заграждения. Предлагаемая схема состоит из двух взаимодополняющих друг друга схем. На рис. 13(а) показана схема данного фильтра, а на рис. 13(б) показан его макет.



а) схема нижних частот;
б) макет ФНЧ.

Рис. 13. Фильтр нижних частот [30].

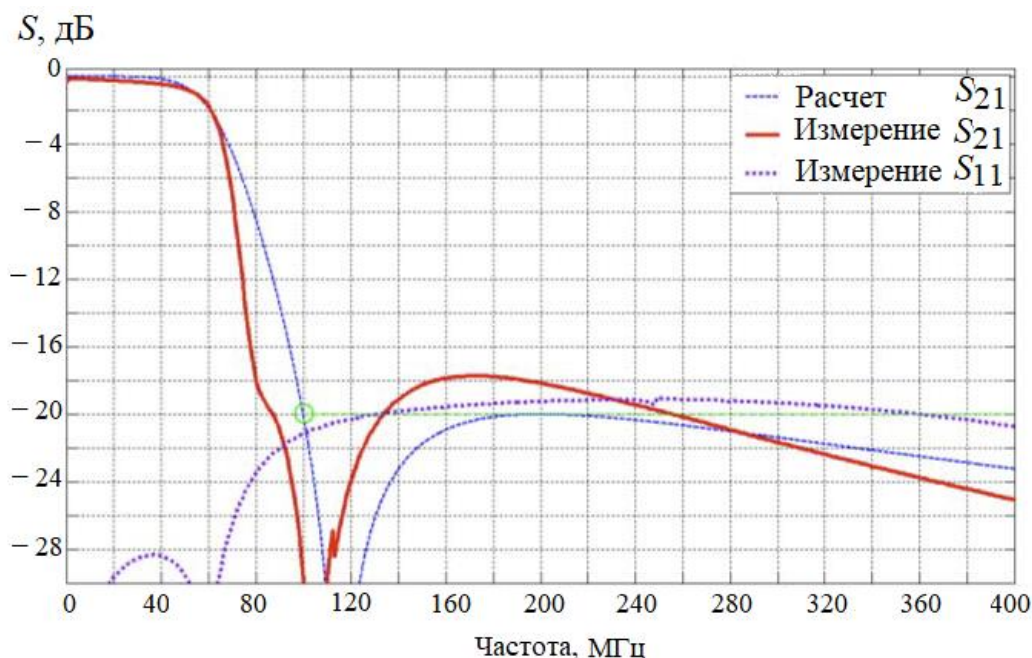


Рис. 14. Частотные зависимости S -параметров ФНЧ [30].

На рис. 14 показаны частотные характеристики S -параметров ФНЧ на сосредоточенных элементах. Это ФНЧ третьего порядка с затуханием -20 дБ в полосе заграждения, начиная с частоты $f = 100$ МГц. Импедансы источника и нагрузки 50 Ом. Из рис. 14 видно приемлемое согласие между теорией и измерениями.

Недостатком неотражающих фильтров на RLC компонентах является большое количество элементов с жесткими требованиями к допускам. Кроме того, почти все неотражающие фильтры на сосредоточенных элементах

имеют ограничения по частоте для использования на СВЧ по причине частотной зависимости индуктивностей, сопротивлений и в меньшей степени емкостей от частоты. Особенно проблематично получение катушек индуктивности со значениями номиналов меньше 1 нГн. Однако существуют технологии построения фильтров, способные решить эту проблему. Работы [31-33] посвящены исследованию возможностей создания библиотеки достоверных моделей интегральных пассивных элементов на подложках Si, SiGe, GaAs. Эти модели оказываются достаточными для проектирования интегральных LC-фильтров в частотном диапазоне от 1 до 40 ГГц с погрешностями, не превышающими 2% для номиналов индуктивностей от 0,1 до 10 нГн. На рис. 15 показаны частотные зависимости коэффициента передачи LC полосно-пропускающего фильтра в диапазоне от 14 до 18 ГГц, отражающего внеполосные частоты.

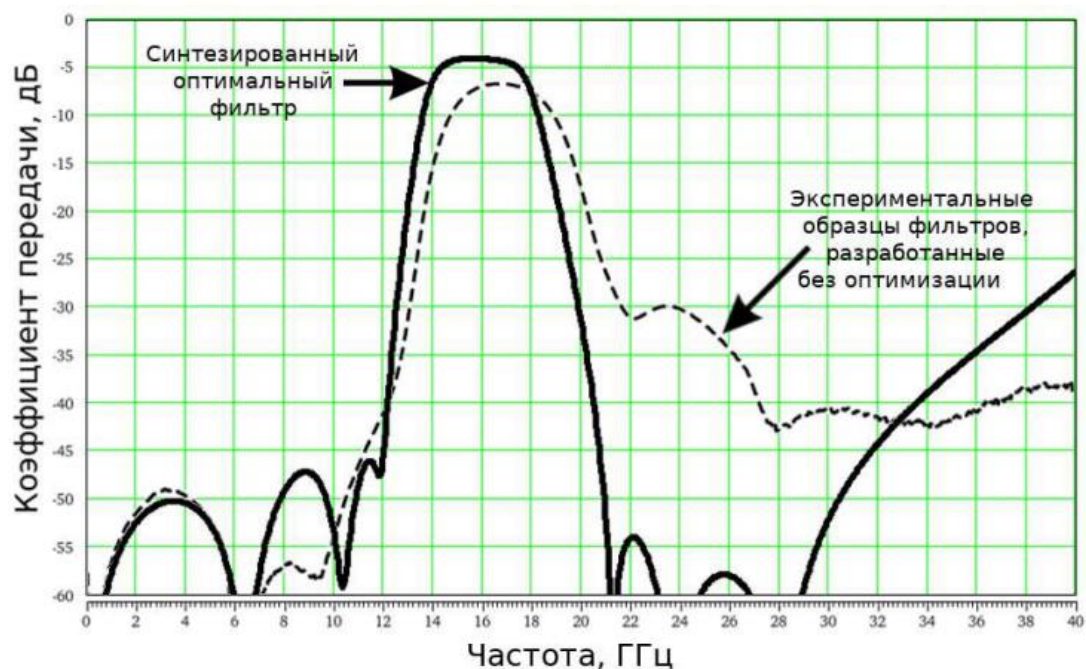


Рис. 15. Частотные зависимости коэффициента передачи ППФ [33]

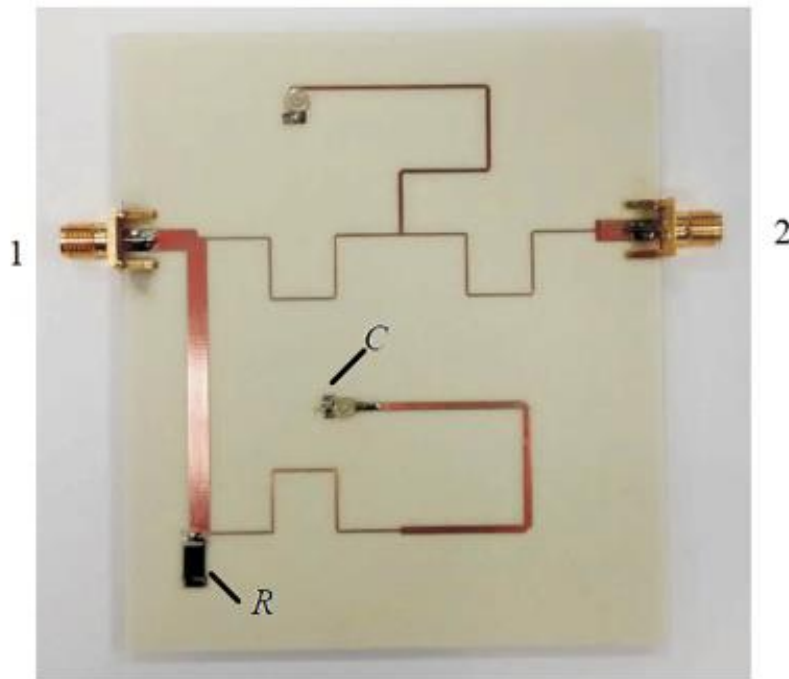
Очевидно, что решение технологической задачи изготовления резисторов с минимально возможными паразитными параметрами позволит проектировать неотражающие фильтры на частотах до 40 ГГц. Успехи в создании LC фильтров могут служить базой для разработки неотражающих RLC-фильтров.

4. Неотражающие фильтры с нагруженными отрезками линий передачи

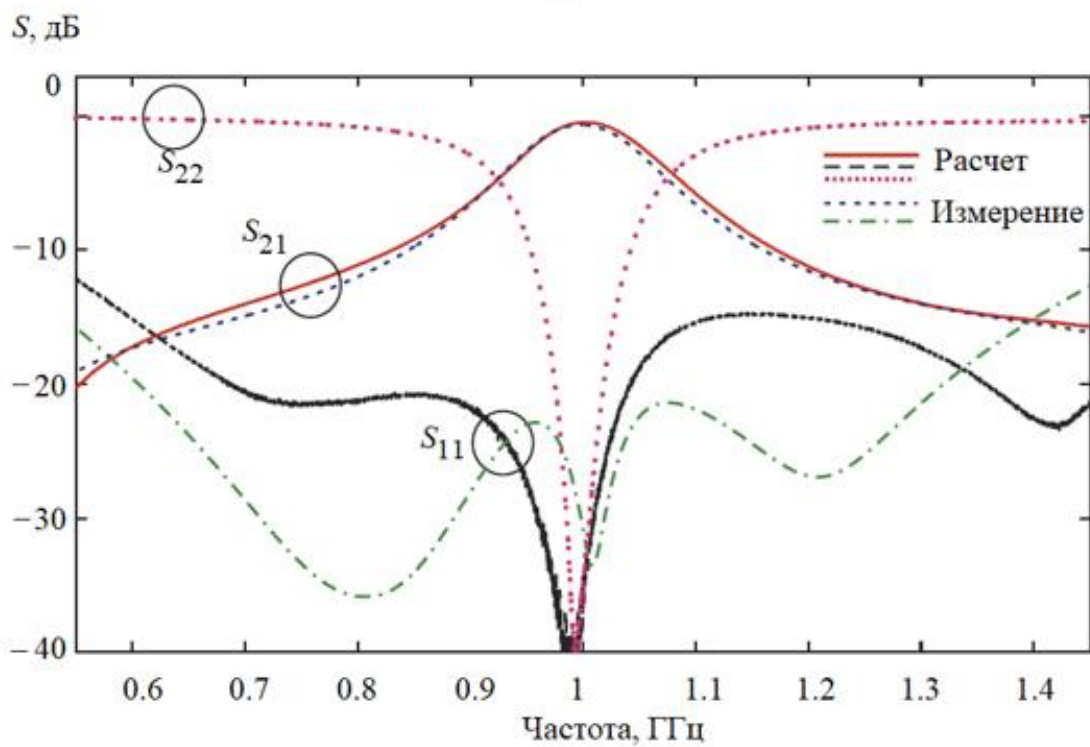
Еще одним вариантом реализации фильтров неотражающего типа является использование нагруженных полосковых и микрополосковых линий передачи. Фильтры состоят из основного и вспомогательного каналов с противоположными передаточными функциями фильтрации. Подключив резистор опорного сопротивления к вспомогательному каналу и выбрав выходной узел основного канала в качестве выхода для всей схемы, можно создать неотражающий фильтр [34-39].

В работе [34] представлен квазипоглощающий микрополосковый полосно-пропускающий фильтр. Его фотография и частотные зависимости S -параметры показаны на рис. 16 (а) и (б). Основные измеренные характеристики однокаскадного фильтра: центральная частота равна 1 ГГц; абсолютная полоса пропускания 127 МГц (т. е. 12,7% в относительном выражении) по уровню 3 дБ, минимальные вносимые потери – 0,47 дБ на центральной частоте полосы пропускания, коэффициент отражения S_{11} не хуже –12,2 дБ в интервале 0,55-1,45 ГГц.

Та же идея используется при разработке микрополосковых однопортовых поглощающих многополосных полосно-пропускающих фильтров и полосно-запирающих фильтров [36], фильтрующих делителей мощности [37], полосно-пропускающих фильтров [38] и мультиплексоров [39]. Пример фильтра из работы [38] представлен на рис. 17, где показан макет неотражающего ППФ и графики частотных зависимостей S -параметров. Из рис. 17 этой работы [38], видно, что центральная частота составляет 1,81 ГГц, полоса пропускания по уровню –3 дБ составляет 160 МГц, т. е. 8,8%, минимальные вносимые потери –0,96 дБ на центральной частоте полосы пропускания.



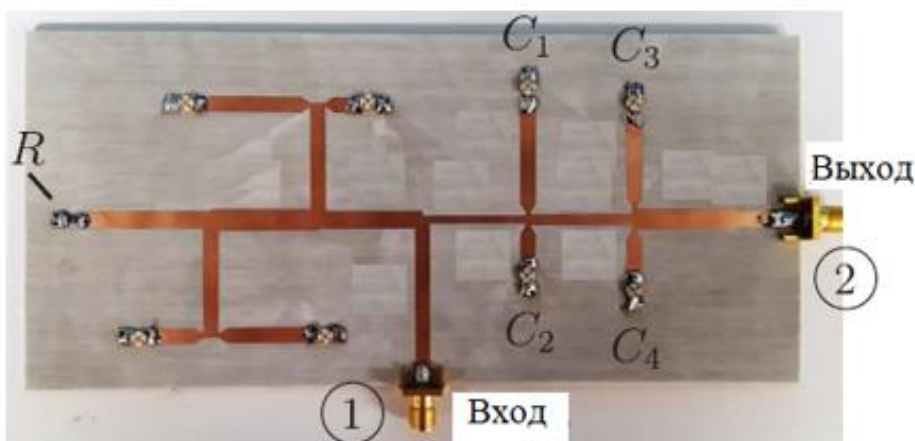
а)



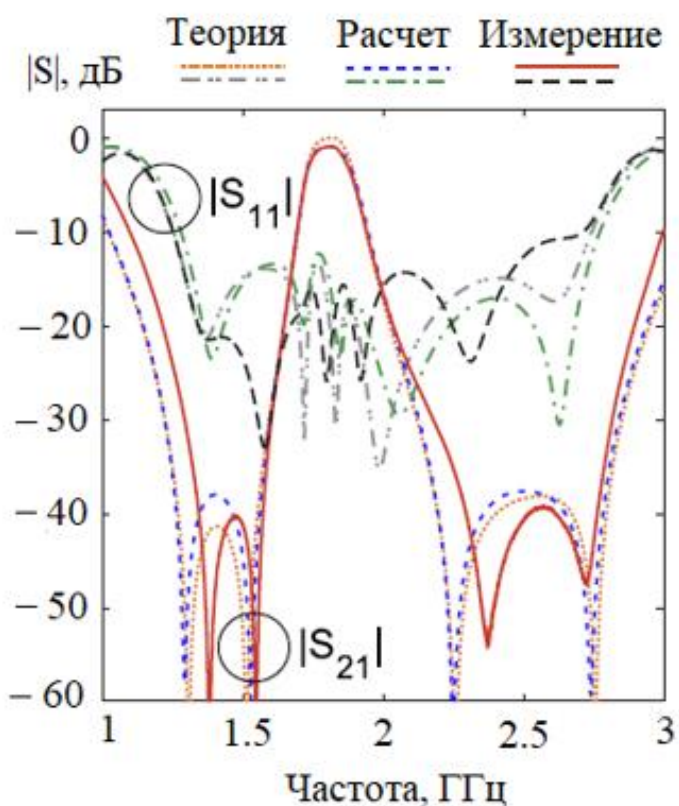
б)

а) макет квазипоглощающего микрополоскового полосового фильтра;
 б) частотные характеристики фильтра.

Рис. 16. Квазипоглощающий микрополосковый полосовой фильтр [34].



а)



б)

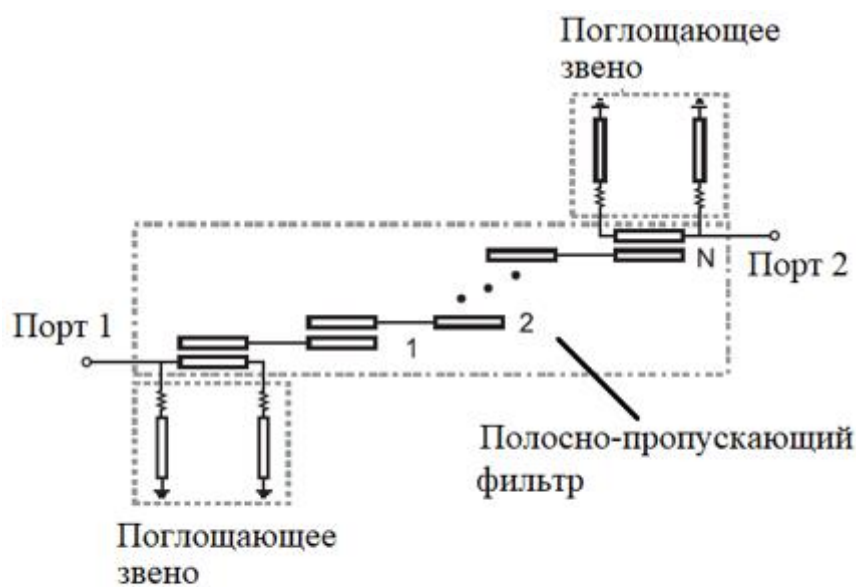
а) макет неотражающего фильтра ППФ;
 б) частотные характеристики фильтра ППФ.

Рис. 17. Неотражающий фильтр ППФ [38].

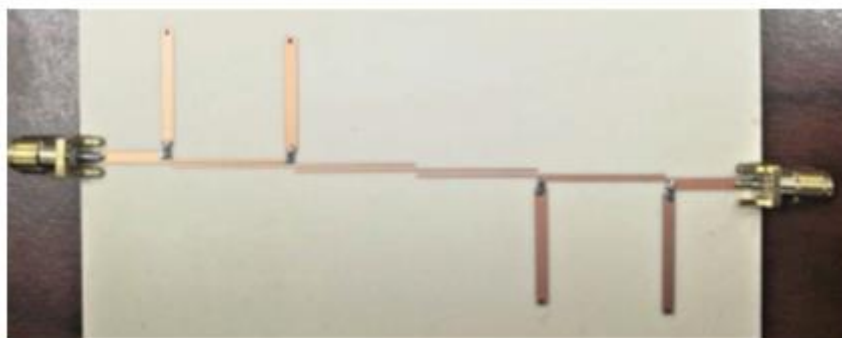
Таким образом, общие схемы неотражающих фильтров с нагруженными отрезками линий передачи имеют большие габариты в силу разветвленной топологии проводников, обеспечивают согласование в ограниченной полосе частот, причем $S_{11} \neq S_{22}$.

5. Неотражающие фильтры на связанных линиях

В направленных фильтрах, рассмотренных в разделе 2, используются направленные ответвители (НО), связанные с резонаторами бегущей волны. Развитие основной идеи уменьшения отражений вне полосы прозрачности в таких фильтрах возможно получить, используя свойства сонаправленных НО и частотно-зависимых распределенных или сосредоточенных резонаторов. В [40] были представлены исследования неотражающего ППФ на связанных линиях (рис. 18).



a)



б)

- а) принципиальная схема;
 б) фотография топологии фильтра 4-го порядка.

Рис. 18. Квазипоглощающий ППФ N -го порядка.

Исследуемая структура содержит отрезки связанных линий и шунтирующие линии передачи, закороченные на конце и соединенные с одной из связанных линий через резисторы. Резисторы и линии передачи являются частотно-зависимыми нагрузками подводящих и связанных полосковых линий. Поскольку короткозамкнутые шлейфы обладают периодически повторяющейся частотной характеристикой, то и фильтр, включающий такие шунтирующие линии, также обладает периодически повторяющейся полосой пропускания.

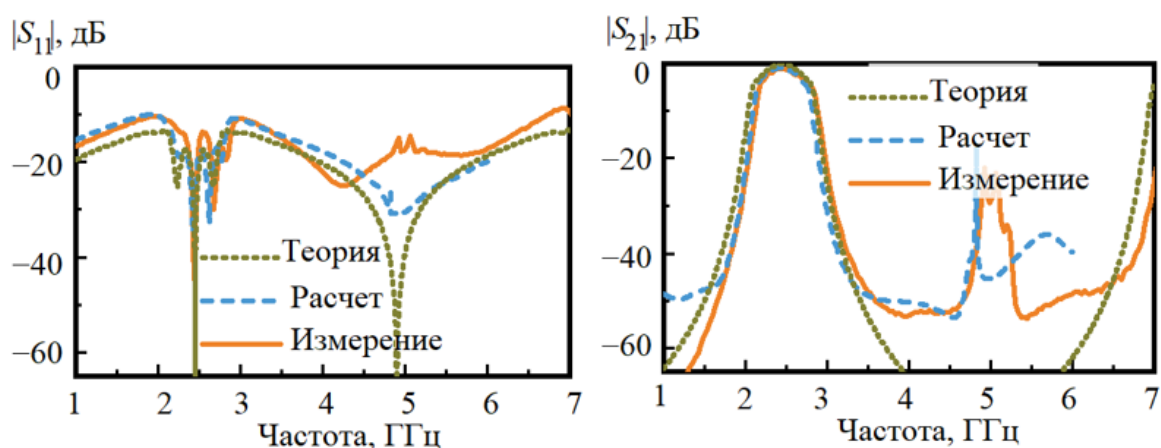


Рис. 19. Частотные характеристики [40].

Принципиальная схема квазипоглощающего ППФ N -го порядка представлена на рис. 18(а), а на рис. 18(б) показан изготовленный макет фильтра четвертого порядка. На рис. 19 показаны частотные зависимости коэффициентов передачи $|S_{21}|$ и коэффициентов отражения $|S_{11}|$ в диапазоне 1-7 ГГц. Видно, что измеренный коэффициент отражения не хуже -10 дБ в диапазоне 1-7 ГГц, измеренные вносимые потери в полосе пропускания составляют $-1,1$ дБ на частоте 2,45 ГГц, измеренная полоса пропускания составляет 2,2-2,76 ГГц (22,8%).

В статье [41] описывается неотражающий полосковый фильтр, названный фильтром поглощающего типа (ФПТ), схема которого представлена на рис. 20. Фильтр состоит из 3-дБ моста, в котором диагональные порты соединены с частотно-зависимыми нагрузками, представляющими отражающие фильтры на распределенных элементах с резистивными нагрузками. Мощность,

поступающая на вход фильтра, равномерно распределяется между нагруженными портами. Отраженные от нагрузок сигналы на выходе фильтра в полосе пропускания суммируются, так как фазы отраженных волн совпадают на средней частоте полосы пропускания НО частотах. Данный фильтр имеет следующий основной недостаток – периодическое повторение полосы пропускания по причине применения в качестве частотно-зависимых нагрузок связанных линий, как и в работе [40].

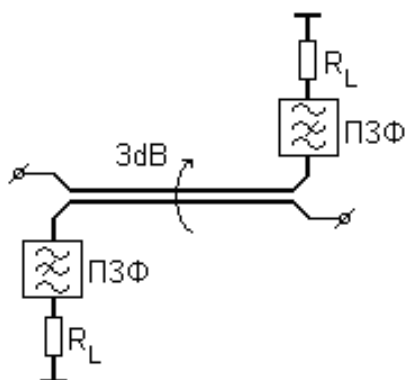


Рис. 20. Структурная схема фильтра поглощающего типа [41].

На основе структурной схемы (рис. 20) был разработан макет фильтра поглощающего типа. Макет ФПТ (рис. 21) состоял из отрезка связанных линий с вертикальной подложкой со связью 3 дБ, двух полосно-заграждающих фильтров на связанных линиях [42], в которых одна из линий нагружена на сопротивление 50 Ом. Такая трехмерная структура была выбрана для обеспечения сильной электромагнитной связи. Измеренные характеристики ФПТ приведены на рис. 22.



Рис. 21. Макет фильтра поглощающего типа [41].

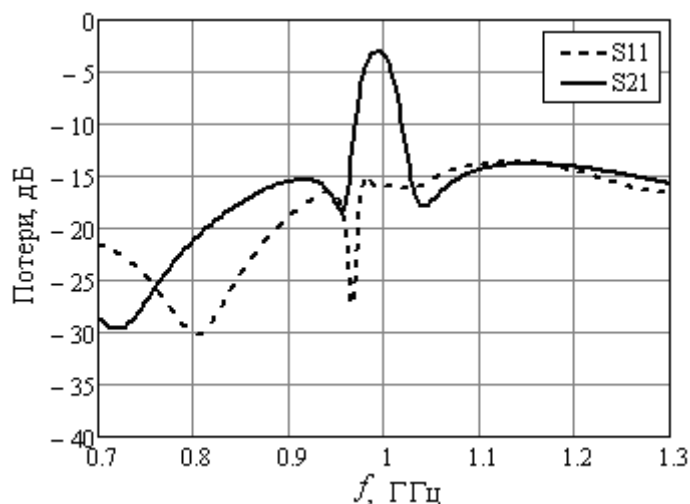


Рис. 22. Частотные характеристики фильтра поглощающего типа [41].

Как видно из рис. 22, ФПТ обладает достаточно хорошими избирательными свойствами для двухзвенного фильтра, при этом коэффициент отражения от входа фильтра во всей полосе рабочих частот не превышает -13 дБ.

В работе [43] рассмотрены схемы и конструкция частотно-селективных устройств на основе отрезков связанных полосковых линий (СПЛ) и сосредоточенных RLC цепей. Схема представлена на рис. 23. RLC цепь выполнена в виде последовательного колебательного контура из индуктивности L_0 и емкости C_0 . Контур демпфирован сопротивлением R_0 . Входное сопротивление RLC цепи на средней частоте f_0 полосы пропускания фильтра стремится к нулю, в результате чего связанные линии образуют звено ППФ с короткозамкнутыми диагональными плечами 2 и 3. На частотах $f < f_0$, $f > f_0$ входное сопротивление RLC цепи стремится к R_0 . Если R_0 выбирается равным входному сопротивлению связанных линий со стороны портов 2 и 3, коэффициент передачи фильтра и коэффициент отражения минимальны.

На рис. 24 показан изготовленный макет ППФ, а на рис. 25 показаны его экспериментальные характеристики в виде зависимости S -параметров от частоты f .

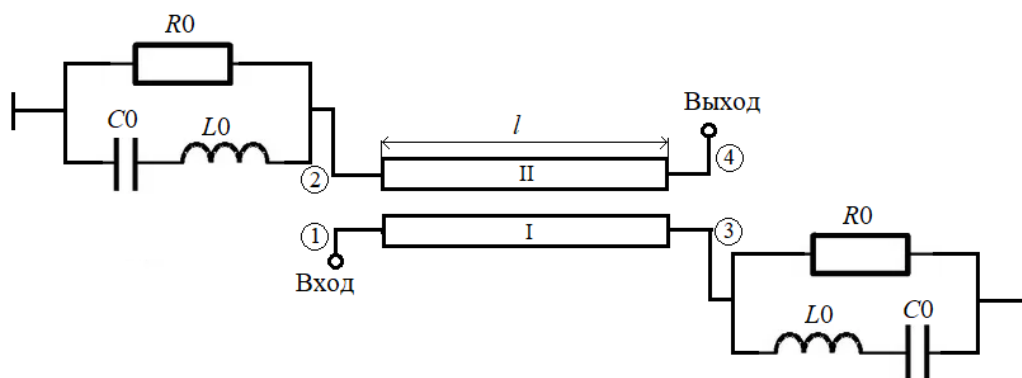


Рис. 23. Эквивалентная схема НПФ [43].

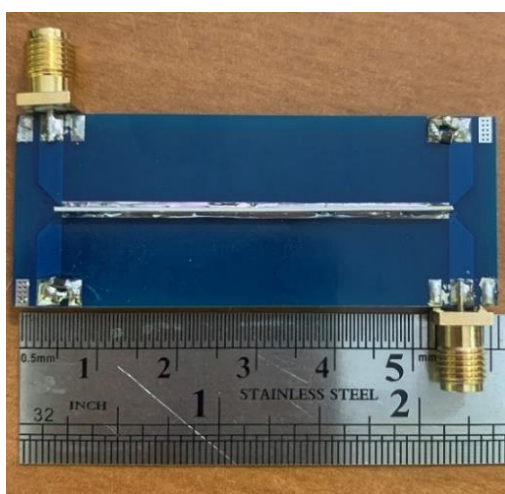


Рис. 24. Изготовленный макет НПФ [43].

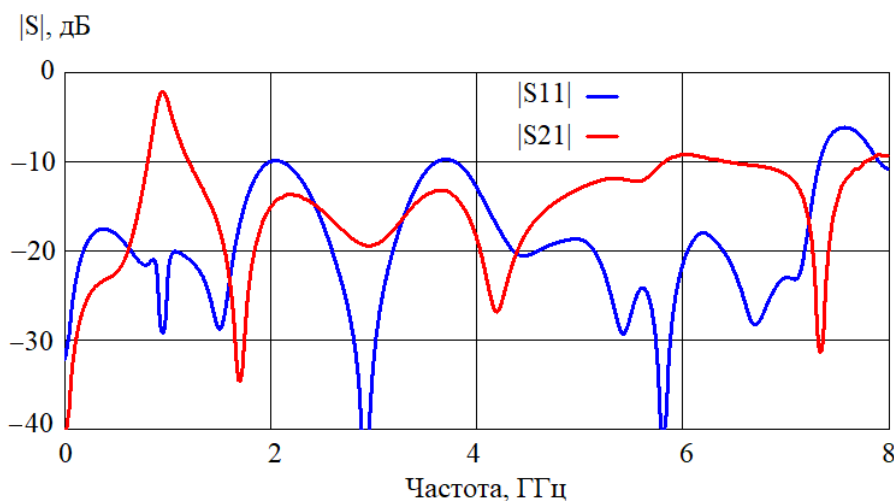


Рис. 25. Экспериментальные частотные зависимости S-параметров НПФ [43].

Из рис. 25 видно, что фильтр настроен на центральную частоту 0,94 ГГц как полосно-пропускающий НФ с полосой пропускания 0,18 ГГц. При этом коэффициент отражения не превышает -10 дБ во всем диапазоне частот до 8 ГГц.

Полученные экспериментальные данные подтверждают возможность создания неотражающего полоскового фильтра с единственной полосой пропускания в широком диапазоне частот. При этом уменьшаются его габариты по сравнению с фильтрами, в которых используются шунтирующие отрезки полосковых линий, которые нагружены на сопротивления в виде резисторов [41]. Использование комбинированной архитектуры фильтров в виде распределено-сосредоточенных цепей дает и другое преимущество, состоящее в отсутствии паразитных полос пропускания, что объясняется разреженным спектром собственных частот RLC-цепей в СВЧ диапазоне.

Заключение

Таким образом, разработка компактных и эффективных неотражающих фильтров СВЧ остается важной и актуальной задачей в современной радиотехнике. Существует ряд подходов к построению неотражающих фильтров, таких как направленные фильтры, неотражающие фильтры на сосредоточенных элементах, неотражающие фильтры с нагруженными отрезками линий передачи, а также фильтры на связанных линиях. У каждого из этих подходов есть свои преимущества и недостатки, но основные задачи остаются неизменными: создание неотражающего фильтра с высокой избирательностью, согласованием не только на входе, но и на выходе, а также уменьшение габаритов фильтров. Представляется, что подход, основанный на комбинировании распределенных и сосредоточенных цепей, перспективен для исследований и создания неотражающих фильтров.

Финансирование: Исследование выполнено по проекту № FEWM-2023-0014 от 01.03.2023, выполняемый по базовой части государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования РФ.

Литература

1. Беляев Б.А. и др. Высокоселективный волноводный полосно-пропускающий фильтр с уровнем подавления помех более 120dB //Письма в ЖТФ. – 2023. – Т. 49. – №. 10.
2. Аристархов Г. М., Аринин О.В., Кириллов И.Н. Микрополосковые фильтры на основе встречно-гребенчатых структур с дополнительной гальванической связью //Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2018. – Т. 9. – №. 4. – С. 8-12.
3. Михайлов М.А., Сдобнова В.П., Крутиев С.В. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО SIW-ТЕХНОЛОГИИ. – 2022.
4. Беляев Б.А. и др. Миниатюрный высокоселективный полосно-пропускающий фильтр на двухпроводниковых шпильковых резонаторах //Ural Radio Engineering Journal. 2022. Vol. 6.№ 2. – 2022. – Т. 6. – №. 2. – С. 129-139.
5. Беляев Б.А. и др. Широкополосный высокоселективный микрополосковый фильтр на двухмодовых резонаторах //Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2022. – Т. 503, № 1. – С. 57-62.
6. Беляев Б.А. и др. Монолитный миниатюрный полосно-пропускающий фильтр на многопроводниковых полосковых резонаторах //Письма в Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – №. 13. – С. 16-20.
7. Аристархов Г.М., Аринин О.В., Кириллов И.Н. Высокоизбирательные фильтры на основе гребенчатых и встречно-гребенчатых структур с ограниченным числом резонаторов //Радиотехника. – 2020. – Т. 84. – №. 1. – С. 35-44.
8. Беляев Б.А. и др. Микрополосковые фильтры с широкими полосами пропускания //Письма в Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – №. 7. – С. 30-34.
9. Кац Б.М., Мещанов В.П., Саяпин К.А. КОМПАКТНЫЙ ДВУХДИАПАЗОННЫЙ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР. – 2020.

10. Патент № 2781040 С1 Российская Федерация, МПК H01P 1/203. СВЧ фильтр: № 2021139584 : заявл. 27.12.2021 : опубл. 04.10.2022 / Б.А. Беляев, А.М. Сержантов, С.А. Ходенков, А.М. Попов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева".
11. Lewis W.D., Tillotson L.C. A non-reflecting branching filter for microwaves //The Bell System Technical Journal. – 1948. – Т. 27. – №. 1. – С. 83-95.
12. Met V. Absorptive filters for microwave harmonic power //Proceedings of the IRE. – 1959. – Т. 47. – №. 10. – С. 1762-1769.
13. Breitbarth J., Schmelzer D. Absorptive near-Gaussian low pass filter design with applications in the time and frequency domain //2004 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (IEEE Cat. No. 04CH37535). – IEEE, 2004. – Т. 3. – С. 1303-1306.
14. Guyette A.C. et al. Perfectly-matched bandstop filters using lossy resonators //IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005. – IEEE, 2005. – С. 517-520.
15. Guyette A.C., Hunter I.C., Pollard R.D. Design of absorptive microwave filters using allpass networks in a parallel-cascade configuration //2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – IEEE, 2009. – С. 733-736.
16. Jachowski D R. Compact, frequency-agile, absorptive bandstop filters //IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005. – IEEE, 2005. – С. 513-516.
17. Фельдштейн Я. Синтез 4-х полюсников и 8-ми полюсников на СВЧ. – 1971.
18. Альтман Д. Л., Лебедев И. В. Устройства сверхвысоких частот: Пер. с англ. – Мир, 1968.
19. Будурис Ж., Шеневье П. Цепи сверхвысоких частот:(Теория и применение). – Сов. радио, 1979.

20. Тиличенко М.П. Режекторные фильтры СВЧ поглощающего типа //Вестник Гомельского государственного технического университета им. ПО Сухого. – 2001. – №. 2 (5). – С. 020-027.
21. Тиличенко М.П. Фильтры СВЧ поглощающего типа логопериодической структуры. – 2004.
22. Сычев А.Н., Рудый Н.Ю. Параметры несимметричных связанных линий с неоднородным диэлектриком //Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2018. – Т. 21. – №. 4-1. – С. 7-15.
23. Sychev A.N. et al. Theory of Doubly-Shielded Coupled Lines for Directional Couplers of Various Directivity Types With Impedance Transformation //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2022.
24. Тиличенко М. П. Направленный фильтр в гибридном исполнении //Вестник Гомельского государственного технического университета им. ПО Сухого. – 2006. – №. 3 (26). – С. 076-082.
25. Агуреев А.В. и др. ДВА ФИЛЬТРА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ //Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2020. – Т. 16. – №. 3. – С. 83-93.
26. Kim J.P. Improved design of single-section and cascaded planar directional filters //IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 2011. – Т. 59. – №. 9. – С. 2206-2213.
27. Летавин Д.А., Мительман Ю.Е., Чечеткин В.А. Метод уменьшения размеров микрополосковых мостовых устройств //Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2016. – №. 5. – С. 52-56.
28. Летавин Д.А. Способ миниатюризации микрополоскового двухшлейфного моста //Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2017. – №. 5. – С. 41-46.
29. Morgan M.A., Boyd T.A. Theoretical and experimental study of a new class of reflectionless filter //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2011. – Т. 59. – №. 5. – С. 1214-1221.

30. Khalaj-Amirhosseini M., Taskhiri M.M. Twofold reflectionless filters of inverse-Chebyshev response with arbitrary attenuation //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2017. – Т. 65. – №. 11. – С. 4616-4620.
31. Ерохин В.В. Верификация модели интегральной катушки индуктивности для СВЧ LC-фильтров в Si-и SiGe-системах на кристалле //Вестник СибГУТИ. – 2022. – №. 2 (58). – С. 94-109.
32. Ерохин В.В., Завьялов С.А. Автоматизированный синтез топологий интегральных сверхвысокочастотных LC-фильтров с минимизацией потерь в полосе пропускания //Омский научный вестник. – 2023. – №. 4 (188). – С. 152-161.
33. Ерохин В.В., Завьялов С.А. Оптимизация топологий интегральных катушек индуктивности для синтеза СВЧ LC-фильтров в Si/SiGe/GaAs-системах на кристалле //Вестник СибГУТИ. – 2023. – Т. 17. – №. 3. – С. 87-105.
34. Psychogiou D., Gómez-García R. Reflectionless adaptive RF filters: Bandpass, bandstop, and cascade designs //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2017. – Т. 65. – №. 11. – С. 4593-4605.
35. Simpson D.J., Gómez-García R., Psychogiou D. Mixed-technology quasi-reflectionless planar bandpass filters //2018 48th European Microwave Conference (EuMC). – IEEE, 2018. – С. 551-554.
36. Gomez-Garcia R., FerrerasJosé-María Mu, Psychogiou D. Split-type input-reflectionless multiband filters //IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2018. – Т. 28. – №. 11. – С. 981-983.
37. Gomez-Garcia R., Munoz-Ferreras J.M., Psychogiou D. RF reflectionless filtering power dividers //IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. – 2018. – Т. 66. – №. 6. – С. 933-937.
38. Gomez-García R., Munoz-Ferreras J.M., Psychogiou D. Dual-behavior resonator-based fully reconfigurable input reflectionless bandpass filters //IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2018. – Т. 29. – №. 1. – С. 35-37.

39. Gómez-García R., Muñoz-Ferreras J.M., Psychogiou D. Tunable input-quasi-reflectionless multiplexers //2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on 5G Hardware and System Technologies (IMWS-5G). – IEEE, 2018. – С. 1-3.
40. Wu X., Li Y., Liu X. High-order dual-port quasi-absorptive microstrip coupled-line bandpass filters //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2019. – Т. 68. – №. 4. – С. 1462-1475.
41. Лоцилов А.Г. Анализ и оптимизация широкополосных устройств и антенн на основе нерегулярных структур комбинированного типа : дис. – Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники (ТУСУР) РАН, 2008.
42. Малютин Н.Д., Воробьев П.А. Анализ характеристик связанных полосковых линий на неоднородном диэлектрике с сосредоточенными регулируемые неоднородностями //Известия высших учебных заведений Министерства высшего и среднего специального образования СССР. Радиоэлектроника. – 1975. – Т. 18. – №. 2. – С. 97-99.
43. Thanh T.T., Loschilov A.G. Reflectionless Stripline Filters //2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). – IEEE, 2023. – С. 135-138.

Для цитирования:

Малютин Н.Д., Чинь Т.Т., Малютин Г.А. Неотражающие фильтры СВЧ (обзор). // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.4.4>