

МНОГОПОЛОСНЫЕ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ДВУХ СОНАПРАВЛЕННЫХ ШПИЛЕЧНЫХ РЕЗОНАТОРАХ

Аристархов Григорий Маркович,

МТУСИ, д.т.н., проф. кафедры «Электроника», Москва, Россия

Аринин Олег Вячеславович,

МТУСИ, ст. преп. кафедры «Электроника», Москва, Россия

Кириллов Игорь Николаевич,

МТУСИ, аспирант кафедры «Электроника», Москва, Россия

Марковский Андрей Владимирович,

МТУСИ, аспирант кафедры «Электроника», Москва, Россия

Доронина Анжела Дмитриевна,

МТУСИ, бакалавр кафедры «Электроника», Москва, Россия

g.aristarkhov2010@yandex.ru

Аннотация

Исследованы частотные свойства структур на двух многоступенчатых сонаправленных шпилечных резонаторах, которые обеспечивают возможность реализации при определенных условиях одно-, двух-, трех- и четырехполосных фильтров. Показано что эти двухрезонаторные фильтры обладают повышенной частотной избирательностью за счет формирования в них значительного числа полюсов рабочего затухания, которых в четыре раза больше количества резонаторов в фильтре. Определены топологические различия этих структур и исследованы механизмы формирования их частотных характеристик. Показано, что рассмотренные двухрезонаторные структуры сочетают компактность, повышенную частотную избирательность и пониженный уровень потерь.

Ключевые слова: *многополосные фильтры, микрополосковые шпилечные резонаторы, полюсы и нули рабочего затухания, топология*

Введение

Многополосные полосно-пропускающие фильтры находят широкое применение в многодиапазонных системах передачи информации, обеспечивая подавление сигналов радиоэлектронных средств, работающих в смежных частотных каналах. Известны различные принципы построения таких фильтров на основе многорезонаторных микрополосковых структур [1–3], для которых характерны повышенный уровень потерь в полосах пропускания и значительные габариты. Поэтому практический интерес представляет разработка структур фильтров с существенно ограниченным числом резонаторов, как потенциально обеспечивающих возможность улучшения этих характеристик. В работах [2,4,5] исследовались различные конфигурации топологий двухрезонаторных как двух-, так и трехполосных фильтров, в которых повышенный уровень подавления внеполосных сигналов может быть достигнут только при узких полосах пропускания. Это объясняется тем, что в рассматриваемых двухрезонаторных структурах формируется недостаточное число полюсов рабочего затухания в полосах заграждения. Вместе с тем известны структуры однополосных полосно-пропускающих фильтров [6-8], в которых формируется значительно большее число полюсов рабочего затухания, в несколько раз превышающее количество резонаторов в фильтре. Схемотехническую основу таких фильтров составляют компактные структуры на двух полуволновых сонаправленных шпилечных резонаторах.

В данной работе исследуются особенности построения двух-, трех- и четырехполосных фильтров на основе двухрезонаторных шпилечных структур с повышенной частотной избирательностью и с расширенными полосами пропускания.

I. Однополосный МПФ

Определим условия трансформации однополосной двухрезонаторной структуры в многополосную с множеством полюсов рабочего затухания. Рассмотрим механизмы формирования полюсов рабочего затухания в этих структурах. Обобщенная симметричная структура микрополоскового фильтра (МПФ) на двух полуволновых сонаправленных шпилечных резонаторах представлена на рисунке 1, б. В ее состав входят центральная четвертьволновая решетчатая секция и два согласующих Т-соединения, электромагнитно взаимодействующих с решетчатой секцией [7]. В работе [8] показано, что в двухпроводной трехступенчатой четверть—волновой решетчатой секции (рис.1, в, г) возможно формирование трех полюсов рабочего затухания (основного и двух дополнительных), что обеспечивает повышенную частотную избирательность в области верхних частот. Шлейфы согласующих Т-соединений формируют согласно [7] полюсы рабочего затухания в области нижних частот. При этом расщепление этих полюсов достигается преобладающим магнитным взаимодействием между плечами в каждом из резонаторов. Заметим, что в однополосной структуре усиление электрической связи между шлейфами и решетчатой секцией приводит к вырождению этих полюсов рабочего затухания.

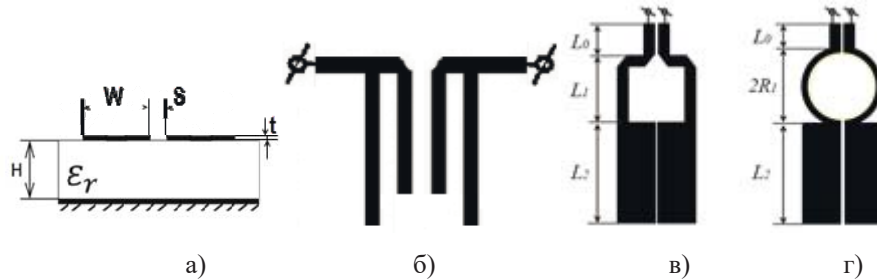


Рис. 1. Структура на сонаправленных шпилечных резонаторах (б) и варианты исполнения решетчатых секций (в-г)

На рисунке 2, б представлены частотные зависимости рабочего затухания и возвратных потерь однополосного фильтра, выполненного на подложке толщиной $H=1$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=9.8$. Расщепленные полюсы рабочего затухания под номерами 1, 2, 4 и 6 формируются шлейфами Т-соединений, а полюсы затухания 3, 5 и 7 – решетчатой секцией с преобладающей электрической связью между ее микрополосковыми линиями (МПЛ). Полюс затухания под номером 8 является продуктом общего электромагнитного взаимодействия в этой многомодовой структуре. Минимальная и максимальная ширины МПЛ равны соответственно $W_{\min}=0.5$ мм, $W_{\max}=6$ мм, минимальное расстояние между МПЛ составляет $S_{\min}=0.1$ мм. Относительная ширина полосы пропускания МПФ, определяемая по уровню возвратных потерь минус 23 дБ, равна 6%.

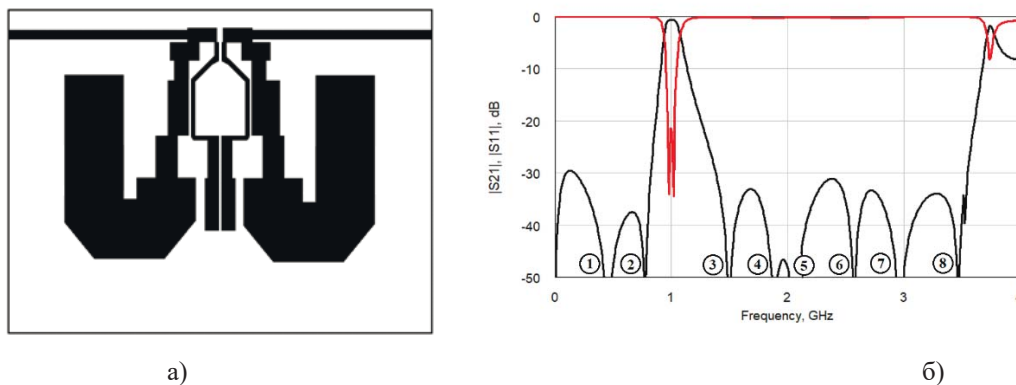


Рис. 2. Топология двухрезонаторного однополосного МПФ и ее частотные зависимости

Таким образом, в двухрезонаторной структуре формируется восемь полюсов рабочего затухания, что обеспечивает повышенную частотную избирательность и разрядку спектра паразитных полюсов пропускания.

II. Двухполосный МПФ

Определим условия формирования двухполосной амплитудно-частотной характеристики в двухрезонаторной структуре. Для этого основной полюс затухания решетчатой секции сформируем в полосе пропускания и расщепим ее на две полосы. Это достигается за счет применения следующих приемов:

- усилением магнитной связи в решетчатой секции за счет увеличения длины отрезков МПЛ на первой её ступени;
- ослаблением электромагнитного взаимо—действия между шлейфами и решетчатой секцией на среднем ее участке, что достигается выполнением связанных МПЛ решетчатой секции на второй ступени в виде полуколец (рис. 1, г);
- усилением электромагнитного взаимодействия между шлейфами и решетчатой секции на ее участке с преобладающей электрической связью (третья ступень);
- усилением электромагнитного взаимодействия между шлейфами.

Таким образом задается в двухрезонаторной трехступенчатой структуре необходимый баланс электромагнитного взаимодействия в четырехпроводной системе связанных линий на разных участках ее длины. Это, естественно, обуславливает существенное изменение топологии двухполосной структуры относительно однополосной.

На рисунке 3, а приведена топология двухрезонаторной двухполосной структуры МПФ, выполненной на подложке толщиной $H=1$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 20$. Максимальная ширина отрезков шлейфов $W_{max}=5.7$ мм, а минимальная ширина отрезков решетчатой секции $W_{min}=0.4$ мм. Минимальное расстояние между МПЛ составляет $S_{min}=0.15$ мм. В этой двухрезонаторной структуре также формируется восемь полюсов рабочего затухания.

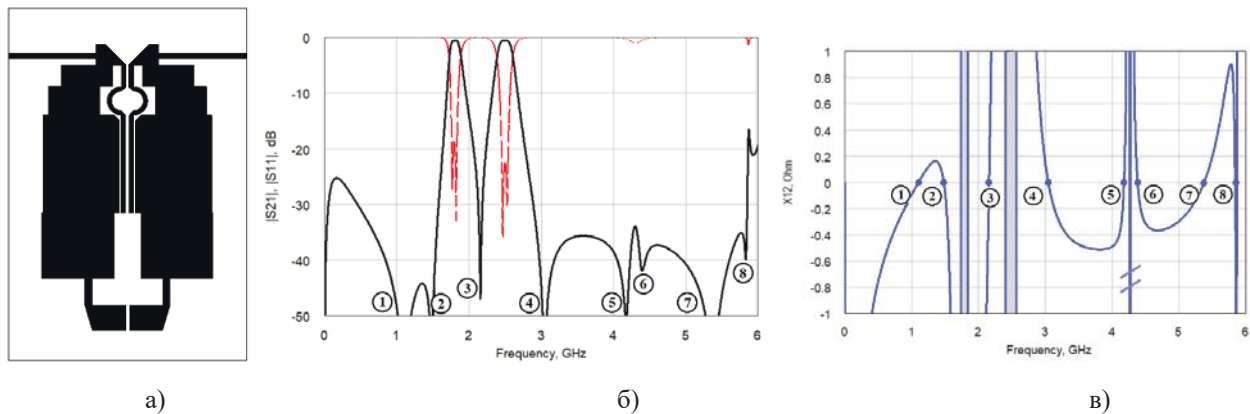


Рис. 3. Двухполосный МПФ на сонаправленных шпилечных резонаторах

При этом полюсы затухания распределены на частотной оси следующим образом: полюсы затухания под номерами 3, 6 и 7 формируются решетчатой секцией, а полюсы затухания 1, 2 и 4, 5 – шлейфами согласующих Т-сочленений. Полюс затухания под номером 8 является продуктом общего электромагнитного взаимодействия связанных МПЛ структуры. Наиболее наглядно механизмы формирования полюсов рабочего затухания и полос пропускания можно исследовать на основе анализа сопротивления связи эквивалентного четырехполюсника $Z_{12}(f)=jX_{12}(f)$. На частотах f_{oi} , на которых $X_{12}(f_{oi})$ приобретает значение ноль, связь между портами четырехполюсника отсутствует, то есть формируются на этих частотах полюсы рабочего затухания.

На рисунке 3, в в области вещественных значений характеристического сопротивления эквивалентного четырехполюсника закрашены. При выполнении условия согласования четырехполюсника с нагрузкой в этих областях возможно формирование полос пропускания. Для двухполосной реализации фильтра паразитная полоса пропускания на второй гармонике вырождена, что отмечено на рисунке 3, в двумя косыми чертами. Этот эффект достигается за счет уравнивания электромагнитных связей в структуре в этой области частот. Ширина обеих полос пропускания, определяемых по уровню возвратных потерь минус 18 дБ, составила не менее 70 МГц. Для сравнения на рисунке 4 представлены результаты моделирования двухрезонаторного двухполосного МПФ при тех же полосах пропускания, который выполнен по схеме, предложенной в [4], на подложке $H = 1$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 9.8$. При этом минимальная ширина отрезков связанных МПЛ составила $W_{min}=0.15$ мм. Как видим, этот фильтр существенно уступает фильтру на сонаправленных шпилечных резонаторах по уровням затухания в полосах заграждения.

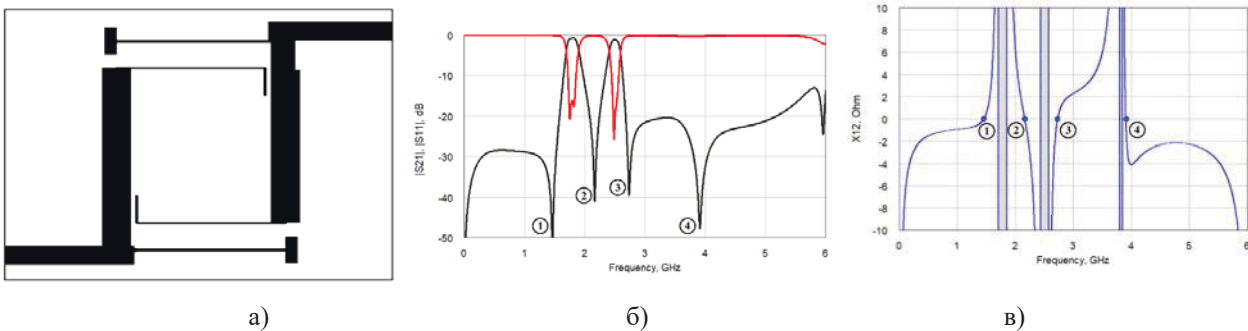


Рис. 4. Двухрезонаторный МПФ по схеме [4]

III. Многополосные фильтры

Наличие в двухполосной структуре вырожденной паразитной полосы пропускания (рис. 3, в) свидетельствует о возможности формирования еще одной дополнительной рабочей полосы пропускания. Выявим условие для образования этой дополнительной рабочей полосы пропускания и определим особенности изменения топологии структуры. Во-первых, третья полоса пропускания может быть сформирована в области частот, в которой в двухполосной структуре формируются полюсы затухания 5, 6 и 7 (рис. 3). Таким образом, эти полюсы затухания должны быть или смещены с этой области частот, или вырождены. Заметим, что полюсы затухания под номерами 6 и 7 в двухполосном фильтре формируются трёхступенчатой решетчатой секцией с ослабленной связью на ее центральной ступени (рис. 1, г). Следовательно, необходимо применить вместо трёхступенчатой решетчатой секции двухступенчатую, в которой формируется только один основной полюс затухания. Во-вторых, как показывают результаты моделирования, необходимое распределение полюсов рабочего затухания на частотной оси достигаются в трехполосной структуре при электромагнитном воздействии между шлейфами, которые должны быть выполнены в виде четырехпроводной секции (нижний участок топологии).

Топология синтезированной структуры трехполосного фильтра представлена на рисунке 5. МПФ выполнен на подложке толщиной $H = 1$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 20$. Максимальная ширина отрезков $W_{max}=6.5$ мм, а минимальная ширина решетчатой секции составляет $W_{min}=0.4$ мм.

Минимальное расстояние между МПЛ $S_{\min}=0,1$ мм. В трехполосном МПФ формируется пять полюсов рабочего затухания, третий из которых – решетчатой секцией, а остальные шлейфами. При этом ширина полосы пропускания в каждом из каналов составляет не менее 60 МГц.

Четырехполосный двухрезонаторный МПФ сочетает отличительные особенности двух- и трехполосных структур, в том числе:

- центральная решетчатая секция выполнена подобно двухполосному МПФ в виде трехступенчатой структуры с ослабленной связью между МПЛ на средней ступени;
- магнитная связь решетчатой секции со шлейфами ослаблена как в трехполосном МПФ;
- усиленная электромагнитная связь между шлейфами выполнена подобно трехполосному МПФ.

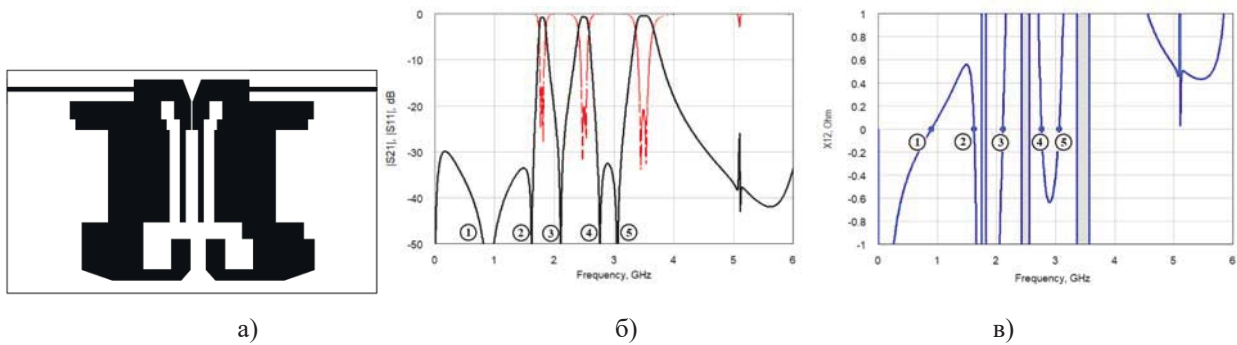


Рис. 5. Двухрезонаторный трехполосный МПФ

На рисунке 6 представлена топология четырехполосного МПФ, выполненного на подложке толщиной $H = 1$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 20$. Полюсы рабочего затухания под номерами 1, 2 и 4, 5 формируются согласующими шлейфами, а полюсы под номерами 3, 6 и 7 – решетчатой секцией. Полюс затухания под номером 8 также является продуктом электромагнитного взаимодействия между всеми МПЛ двухрезонаторной структуры. Важно отметить, что неправильное распределение полюсов рабочего затухания на частотной оси за счет их совмещения или перемежения обуславливает их вырождение.

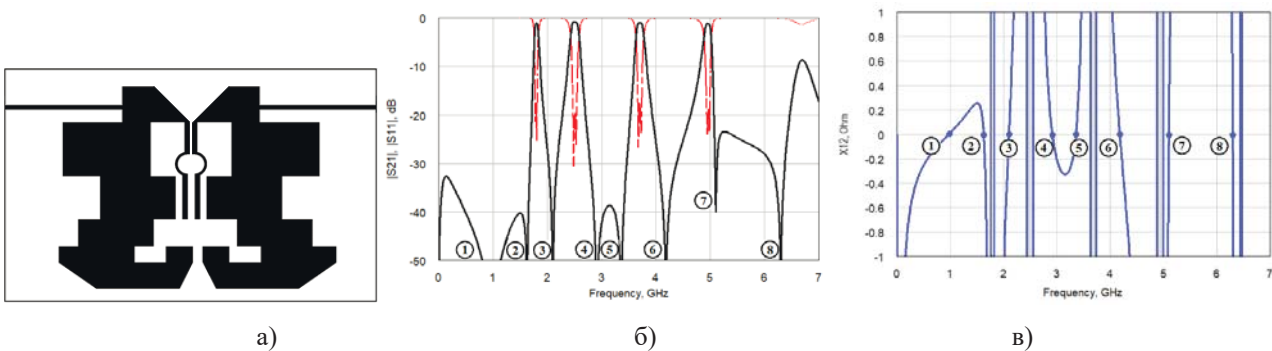


Рис. 6. Двухрезонаторный четырехполосный МПФ

Заключение

Показано, что многоступенчатые структуры на двух сонаправленных шпилечных резонаторах обладают достаточным числом степеней свободы для формирования в них до восьми полюсов рабочего затухания и четырех частотных областей вещественных значений характеристического сопротивления. Взаимное распределение на частотной оси этих полюсов затухания и указанных выше частотных областей, а также их вырождение, позволяют создавать многополосные фильтры на основе двухрезонаторных структур. Исследованы компактные двухрезонаторные двух-, трех- и четырехполосные фильтры и определены механизмы и условия формирования их частотных характеристик. Обсуждены отличительные особенности топологий каждого из фильтров, которые удовлетворяют условиям физической реализуемости в рамках планарных технологий. Показано, что рассмотренные двухрезонаторные структуры сочетают компактность, повышенную частотную избирательность и пониженный уровень потерь.

Литература

1. *Hong J.G., Lancaster M.J.* Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. New York: Wiley, 2001. 476 p.
2. *Vesna Crnojević-Bengin.* Advances in Multi-Band Microstrip Filters, Cambridge University Press, 2015. 317 p.
3. *Ходенков С.А., Беляев Б.А.* Исследование микрополосковых двухполосных полосно-пропускающих фильтров на основе двухмерного фотонного кристалла // Известия ВУЗов. Физика. 2015. Т. 58. №8-3. С. 124-127.
4. *Tang C., Wu P.* Design of a planar dual-band bandpass filter // IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 21, no. 7, pp. 362-364, July 2011.
5. *Беляев Б.А., Сержантов А.М., Тюрнев В.В.* Миниатюрный фильтр с двумя полосами пропускания на микрополосковых двухмодовых резонаторах // Письма в ЖТФ, 2012. Т. 38, вып. 18. С. 31-40.
6. *Аристархов Г.М., Гуляев Ю.В., Дмитриев И.Н., Зайченко К.В.* и др., Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства // Под ред. акад. Ю.В. Гуляева. М.: Радиотехника, 2020. 504 с.
7. *Aristarkhov G.M., Grebennikoy A., Zvezdinov N.V.* High-Selectivity Microstrip Filters Based on Structures With a Limited Number of Hairpin Resonators [Application Notes] // IEEE Microwave Magazine, vol. 20, no.11, pp. 22-31, Nov. 2019. doi: 10/1109/MMM.2019.2935362
8. *Aristarkhov G.M., Arinin O.V., Karavashkina V.N., Markovskiy A.V., Kirillov I.N.* Two-Resonator Microstrip Filters with Increased Single-Sided Frequency Selectivity // 2022 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/EMCTECH55220.2022.9934042.