

КОМПАКТНЫЕ МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФИЛЬТРЫ С ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТНОЙ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ПОЛУВОЛНОВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Аристархов Григорий Маркович

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

Кириллов Игорь Николаевич

МТУСИ, аспирант кафедры «Электроника», Москва, Россия

g.aristarkhov2010@yandex.ru

Аннотация

Исследуются два подхода к повышению предельной частотной избирательности и уменьшению габаритов микрополосковых фильтров при существенно ограниченном числе резонаторов. Проводится сравнительный анализ эффективности этих подходов для проектирования компактных высокоизбирательных фильтров. Показана возможность сочетания этих противоречивых качеств в компактных высокоизбирательных структурах микрополосковых фильтров на полуволновых сонаправленных шпилечных резонаторах, свернутых в форму "скрепки".

Ключевые слова

Микрополосковый фильтр, кольцевые и сонаправленные шпилечные резонаторы, решетчатая секция, дополнительные электромагнитные связи, предельная частотная избирательность.

Введение

Микрополосковые фильтры (МПФ) на полуволновых резонаторах находят самое широкое применение в интегральных устройствах СВЧ, так как они не содержат короткозамыкающих на экран элементов. Это определяет высокую технологичность и возможность их реализации в широком диапазоне частот, включая миллиметровый диапазон длин волн. В последние годы усилия разработчиков направлены на поиск путей повышения частотной избирательности, уменьшения габаритов и снижения потерь в полосе пропускания МПФ. Противоречивость этих требований очевидна, так как с уменьшением габаритов резонаторов пропорционально снижается их собственная добротность, и, как следствие, повышаются потери в полосе пропускания и снижается крутизна рабочего затухания в переходных областях. Как известно, повышение частотной избирательности МПФ может быть достигнуто путем формирования значительного числа полюсов рабочего затухания на конечных частотах, а уменьшение их габаритов - уменьшением числа резонаторов и выполнением их в виде более компактных свернутых структур вида: кольцо, меандр, шпилька, скрепка и тому подобных. Возникает вопрос, а возможно ли такое сочетание конструктивно-технологических и электрических параметров в каких-либо компактных микрополосковых структурах?

В настоящее время известно несколько подходов к решению этой противоречивой задачи в рамках структур с ограниченным числом резонаторов. Это прежде всего структуры с дополнительными электромагнитными связями между несмежными кольцевыми резонаторами [1, 2], а также структуры на сонаправленных шпилечных резонаторах [3, 4]. В данной работе приводится сопоставительный анализ этих подходов к повышению частотной избирательности МПФ при существенно ограниченном числе резонаторов в них.

Структура МПФ с дополнительными кросс-связями

На рисунке 1, а представлена традиционная структура МПФ [1] на основе кольцевых резонаторов, в которой между входным и выходным резонаторами организована дополнительная электрическая связь (расстояние между связанными линиями $S1$), обуславливающая формирование двух близлежащих к полосе пропускания полюсов затухания. Чем сильнее эта связь, тем ближе располагаются эти полюсы затухания к полосе пропускания [1, 2], что обеспечивает более высокую крутизну рабочего затухания в переходных областях. Так, для кривой а) (рис. 1, б) зазор между отрезками связанных микрополосковых линий (МПЛ) составляет $S1=2.5$ мм, а для кривой б) (рис. 1, б) – $S1=1.4$ мм.

Другие вспомогательные полюсы затухания формируются шлейфами, которые являются частью входного и выходного резонаторов. При сильной параллельной связи происходит вырождение этих полюсов затухания в области верхних частот (кривая б) на рис. 1), в результате чего ухудшается частотная избирательность МПФ.

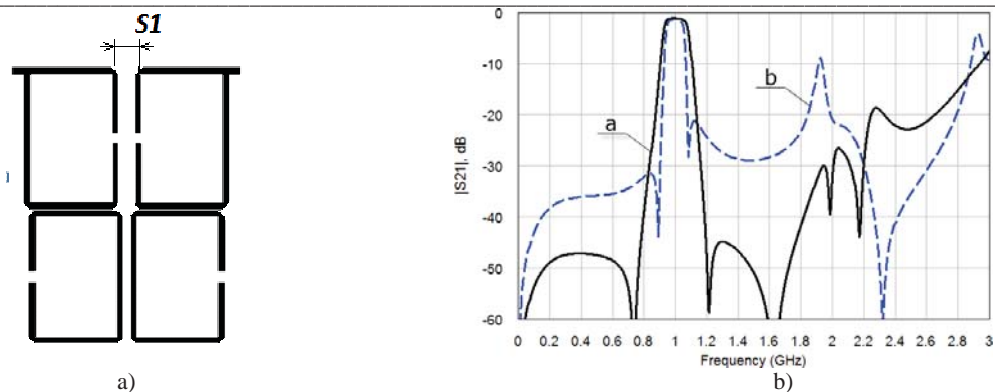


Рис. 1. Четырехрезонаторный МПФ с дополнительными электромагнитными связями

Размеры данной структуры и в том и в другом случае составляют $A \times B = 36.5 \times 27 \text{ мм}^2$ (или $0.073\lambda^2$, где λ – длина квази-Т-волны в структуре) при реализации ее на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 10$ и толщиной $H = 1 \text{ мм}$. Для корректности сравнения параметров различных МПФ все рассматриваемые далее структуры выполняются на данном типе подложки. Относительная ширина полосы пропускания в этих структурах выбиралась равной 10%.

Структуры МПФ на основе свернутых сонаправленных шпилечных резонаторов

В структурах на сонаправленных шпилечных резонаторах, принцип действия которых основан на эффекте неравенства фазовых скоростей нормальных волн, возможно формирование $P = N + 1$ основных полюсов рабочего затухания [3, 4] (где N – число резонаторов в структуре). С целью существенного уменьшения размеров МПФ имеет смысл применить схмотехнический прием свертывания полуволновых шпилечных резонаторов в форму «скрепки». При этом, необходимо определить условия повышения частотной избирательности за счет появившихся новых электромагнитных связей между смежными элементами топологии.

Для этого рассмотрим потенциальные селективные возможности трехрезонаторного МПФ. На рис. 2, а представлена структура этого МПФ, а ее амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) приведена на рис. 2, б (сплошная кривая) на фоне АЧХ четырехрезонаторного МПФ на кольцевых резонаторах (пунктир).

Полюсы рабочего затухания в области нижних частот формируются решетчатыми секциями, и степень их расщепления определяется электрической связью между концами центрального полуволнового резонатора. Полюсы затухания в области верхних частот формируются шлейфами входного и выходного Т-сочленений. Расщепление этих полюсов затухания также достигается преобладающей электрической связью между шлейфами. Таким образом, данная трехрезонаторная структура МПФ позволяет сформировать $P = N + 2$ полюса затухания. Размеры данной структуры составляют $A \times B = 25.2 \times 18 \text{ мм}^2$ или $0.034\lambda^2$, т. е. габариты этого МПФ в два раза меньше, чем МПФ на кольцевых резонаторах. При этом частотная избирательность данных структур практически одинакова. Следует отметить, что при прочих равных условиях в трехрезонаторной структуре в 1,2 раза меньше групповое время запаздывания (ГВЗ) и потери в полосе пропускания (рис. 2, с, d).

Осуществим повышение порядка МПФ данного типа до четырех резонаторов. Топология этой структуры представлена на рис. 3, а, а ее АЧХ – на рис. 3, б (сплошная кривая). Здесь же приведена АЧХ четырехрезонаторного МПФ на кольцевых резонаторах (пунктир).

Резонаторы данной структуры также свернуты в форму «скрепки». Таким образом, между плечами второго и третьего резонаторов образуется дополнительная электрическая связь. Первый и второй, а также третий и четвертый резонаторы образуют своими плечами первую и третью четвертьволновые решетчатые секции соответственно. Первая и третья решетчатые секции с преобладающей магнитной связью между МПЛ формируют полюсы рабочего затухания в области нижних частот. Магнитная связь между первой и третьей решетчатыми секциями определяет степень расщепления этих полюсов затухания. Полюс рабочего затухания №3 формируется центральной решетчатой секцией с преобладающей электрической связью между МПЛ и располагается вблизи полосы пропускания в области верхних частот.

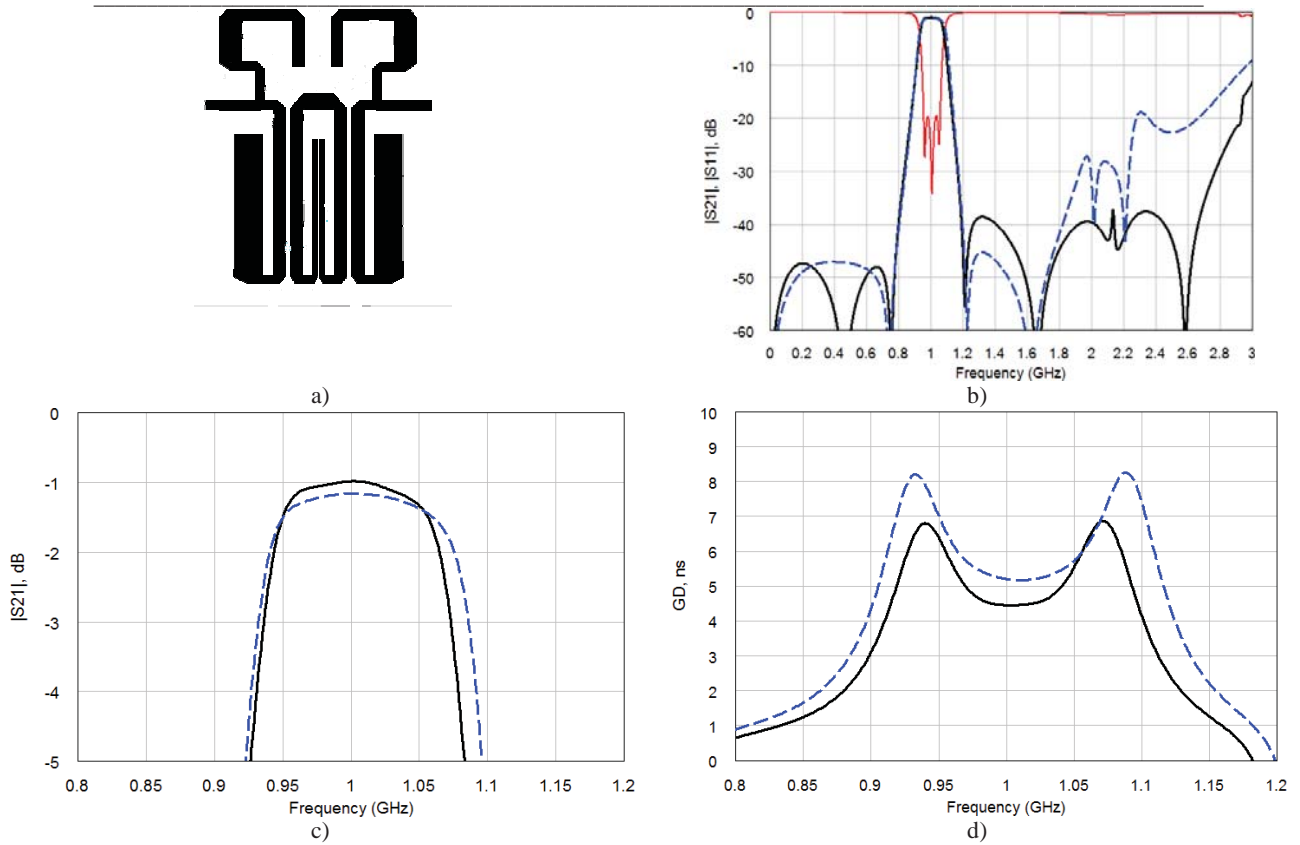


Рис. 2. Трехрезонаторный МПФ на основе свернутых полуволновых резонаторов

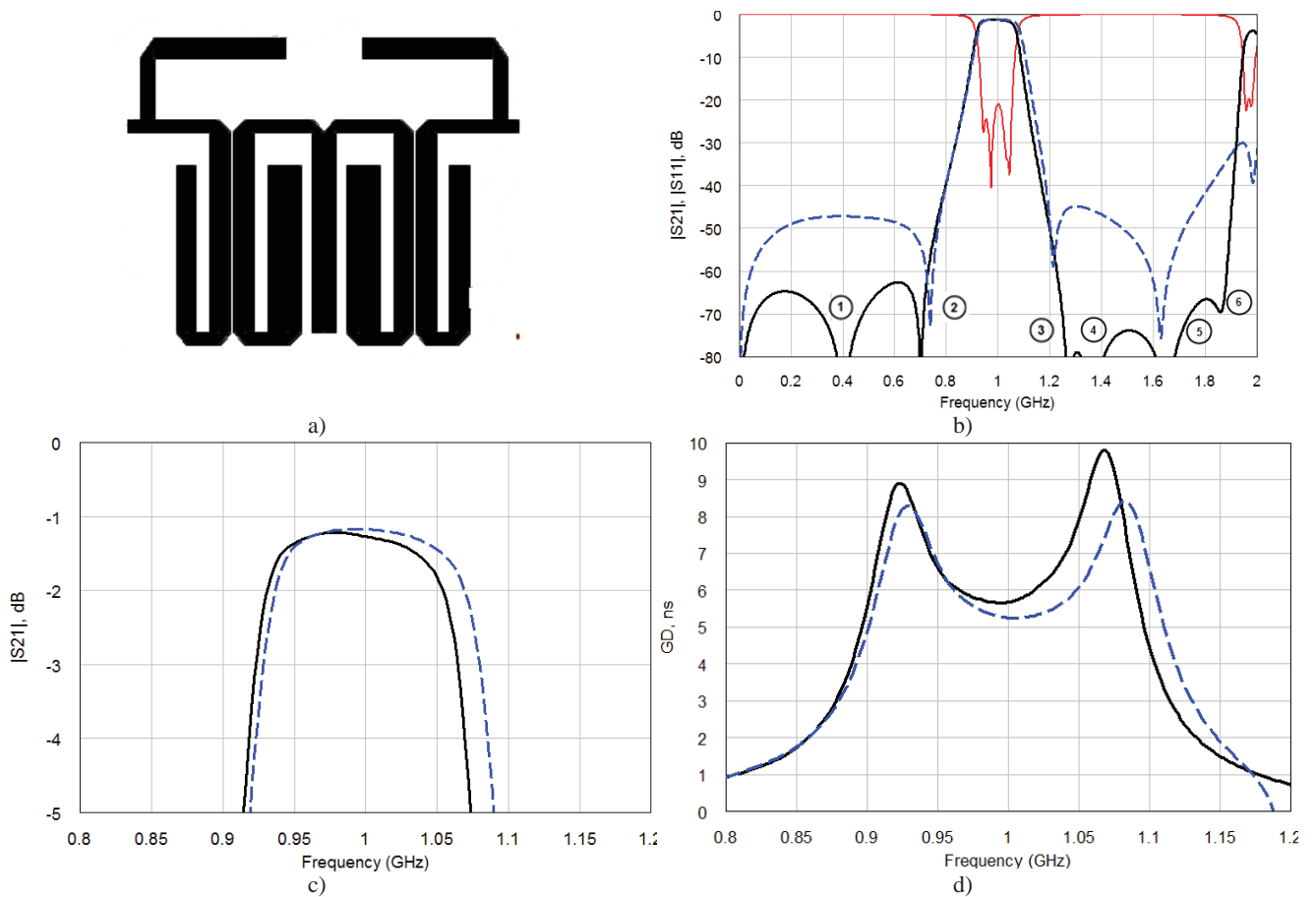


Рис. 3 Структура четырехрезонаторного МПФ

Входной и выходной шлейфы Т-сочленений также формируют расщепленные полюсы рабочего затухания в этой области частот. В целом формируется $N+2$ полюса затухания, что обеспечивает более высокий уровень затухания в полосе заграждения в области верхних частот (~ 70 дБ). Минимальная ширина зазора между МПЛ центральной решетчатой секции составляет $S_{\min}/H=0.2$, а площадь подложки, которую занимает структура МПФ, равна $A \times B = 30 \times 25$ мм², то есть $0.056\lambda^2$. Дальнейшее повышение крутизны рабочего затухания в переходных областях достигается в этих структурах только за счет сужения ширины зазора S_{\min} между связанными МПЛ, что предъявляет более жесткие требования к точности изготовления структур МПФ.

Представляется, что одним из возможных способов наращивания порядка МПФ, при котором сохраняются свойства базовых ячеек и достигается повышение крутизны рабочего затухания, является их гальваническое примыкание по всей или на большей части их длины. Осуществим гальваническое примыкание базовых двухрезонаторных ячеек, в результате которого вместо центральной решетчатой секции образуется шлейф (рис. 4).

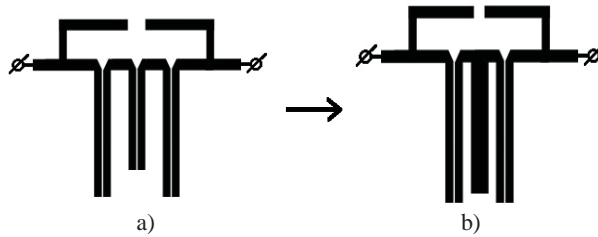


Рис. 4 Четырехрезонаторные МПФ

На рисунке 5,а представлена симметричная структура МПФ на свернутых резонаторах, в которой центральный шлейф формирует полюс рабочего затухания в области верхних частот вблизи полосы пропускания. Он обеспечивает более высокую крутизну рабочего затухания в его переходной области.

Данная структура формирует семь ($P=N+3$) полюсов рабочего затухания. Два дополнительных полюса затухания в области верхних частот формируются крайними решетчатыми секциями за счет реализации скачка волновых сопротивлений на отрезках линий передачи этих секций. Площадь подложки, которую занимает топология этой структуры МПФ, составляет $A \times B = 23,2 \times 20$ мм², то есть $0,034\lambda^2$, что в два раза меньше, чем у прототипа на четырех кольцевых резонаторах.

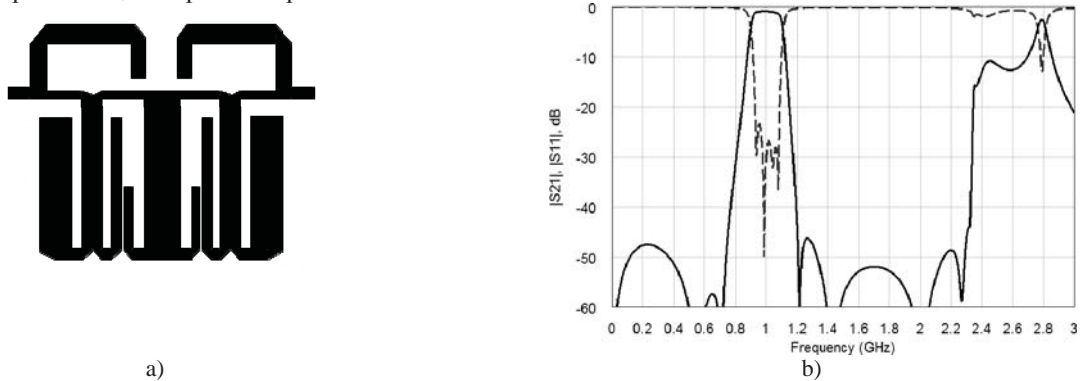


Рис. 5 Микрополосковый фильтр на основе гальванического примыкания двухрезонаторных секций

Рассмотрим теперь структуру четырехрезонаторного МПФ с повышенной крутизной рабочего затухания как в области верхних, так и нижних частот (рис. 6, а). АЧХ данной структуры в сравнении с АЧХ структуры на кольцевых резонаторах (рис. 1, б, пунктирная кривая) представлена на рис. 6, б.

В данной структуре полюсы затухания №3 и №4 формируются центральным полуволновым резонатором. С целью уменьшения габаритов свободные концы верхнего центрального шлейфа свернуты вовнутрь, из-за чего топология данной структуры визуально напоминает «штопор». Полюсы №1 и №2 в области нижних частот формируются крайними решетчатыми секциями с преобладающей магнитной связью между МПЛ. Магнитная связь между этими решетчатыми секциями определяет степень расщепления этих полюсов затухания, которая частично компенсируется электрической связью между плечами резонаторов. Этим достигается требуемое распределение полюсов рабочего затухания, формируемых в области нижних частот. Расщепление полюсов рабочего затухания №5 и №6, формируемых согласующими Т-сочленениями, достигается путем выбора различной электрической длины этих шлейфов. Полюсы рабочего затухания №7 и №8 являются вторичными полюсами, формируемыми крайними решетчатыми секциями, которые обеспечивают разрядку спектра паразитных полос пропускания.

Таким образом, в данной структуре формируется $P=2N$ полюсов рабочего затухания, что обеспечивает сочетание повышенных крутизны АЧХ в переходных областях и уровней затухания в полосах заграждения. Минимальная ширина зазора между МПЛ в рассматриваемой структуре $S_{\min}/H=0.5$, что обеспечивает более высокую технологичность МПФ. Площадь подложки, занимаемая топологией структуры, составляет $A \times B = 32 \times 26$ мм², то есть $0.062\lambda^2$, что в 1,2 раза меньше, чем у структур на кольцевых резонаторах (рис. 1, а).

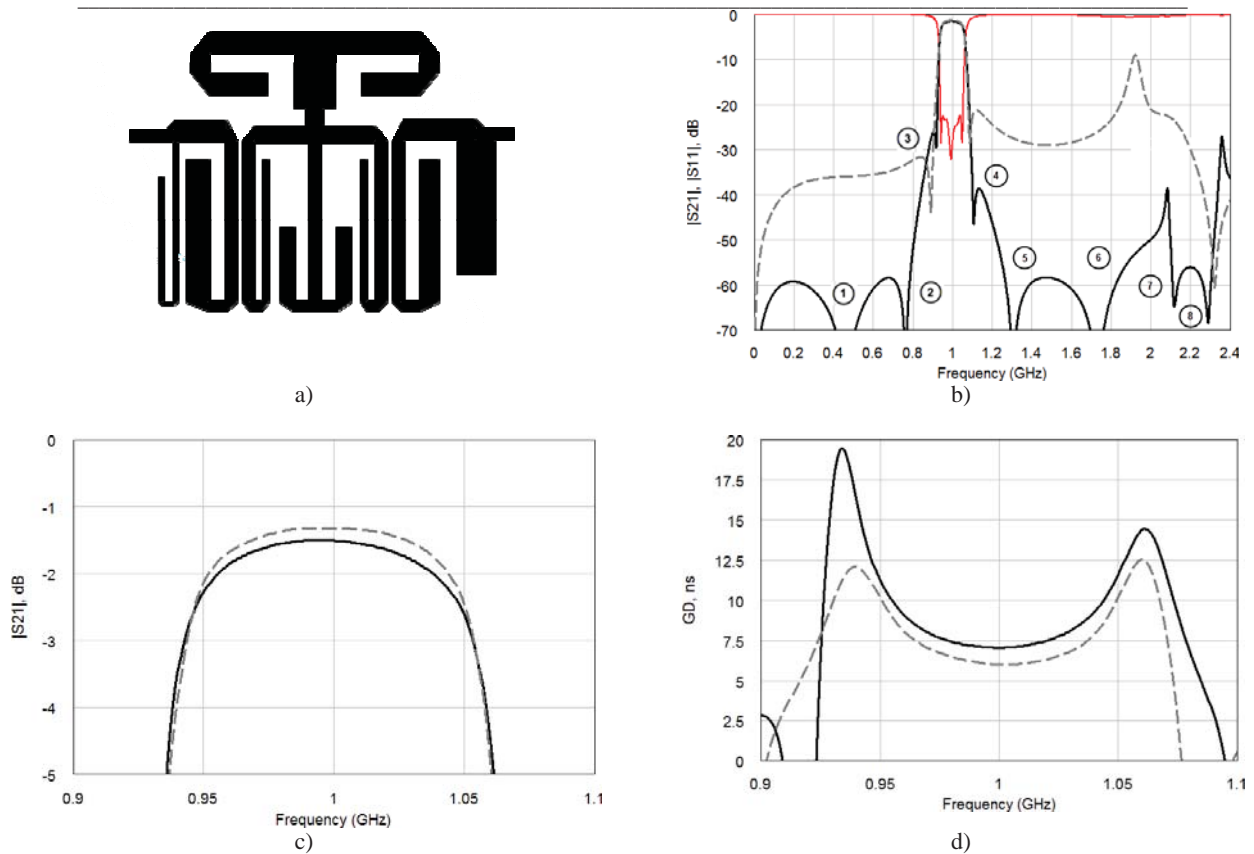


Рис. 6 МПФ с повышенной крутизной рабочего затухания

Заключение

Сравнительный анализ приведенных выше структур наглядно показывает преимущества структур на сонаправленных шпилечных резонаторах по сравнению со структурами с дополнительными электромагнитными связями между несмежными резонаторами с точки зрения повышения их предельной частотной избирательности. При этом количество резонаторов в обоих случаях ограничено (не более четырех).

Так, повышение частотной избирательности структур на кольцевых резонаторах возможно за счет усиления дополнительной электрической связи между входным и выходным резонаторами. При этом чрезмерное ее усиление приводит к вырождению полюсов рабочего затухания в области верхних частот, что значительно ухудшает результирующую частотную избирательность таких структур. Организация этих дополнительных связей приводит к увеличению габаритов МПФ, площадь которых составляет $0.073\lambda^2$.

Структуры на сонаправленных шпилечных резонаторах обладают заведомо более высокой частотной избирательностью, так как в них формируется $P=N+1$ полюс рабочего затухания. Это достигается за счет конструктивного разделения типов электромагнитных связей (электрическая и магнитная) на разных участках топологии структуры [4, 5]. В результате этого, частотно-избирательные свойства базовых элементов этих структур (решетчатые секции, согласующие Т-сочленения) сохраняются и в совокупности суммируются, обеспечивая высокую предельную частотную избирательность. Повышение компактности этих МПФ обеспечивается свертыванием полуволновых шпилечных резонаторов в форму "скрепки". В результате размеры таких МПФ были уменьшены в два раза и составили порядка $0.034\lambda^2$.

Применение способа гальванического примыкания в рассматриваемых структурах обеспечивает более высокую частотную избирательность вблизи полосы пропускания, так как при одних и тех же коэффициентах связи между МПФ удастся существенно приблизить к ней полюсы затухания, формируемые центральным шлейфом.

Литература

1. Lancaster M.I., Hong J.S. Theory and experiment of novel microstrip slow-wave open-loop resonator filters // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. Vol. MTT-45. P. 2358-2365, Dec. 1997.
2. Hong J.G., Lancaster M.J. Microstrip Filters for RF // Microwave Applications. New York: Wiley, 2001.
3. Aristarkhov G.M., Chernyshev V.P. Indirect synthesis of microstrip filters employing codirectional comb resonators // J. Commun. Technol. Electron. Vol. 32. P. 34-40, Oct. 1987.
4. Aristarkhov G.M., Grebennikov A., Zvezdinov N.V. High-Selectivity Microstrip Filters Based on Structures With a Limited Number of Hairpin Resonators // IEEE Microwave Magazine. Vol. 20, no. 11. P. 22-31, Nov. 2019.
5. Аристархов Г.М., Звездинов Н.В. Высокоизбирательные микроволновые фильтры на основе структур с предельно минимальным числом резонаторов // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2016. Т. 6. № 1. С. 6-8.