

# Схемотехника высокоизбирательных фильтров в базисе встречно-гребенчатых структур

Аристархов Г. М., Аринин О. В., Кириллов И. Н.  
Московский технический университет связи и информатики  
ул. Авиамоторная, д. 8а, Москва, 111024, Россия  
g.aristarkhov2010@yandex.ru

**Аннотация:** Исследованы частотные свойства микрополосковых фильтров на основе четвертьволновых четырехрезонаторных встречно-гребенчатых структур. Определены условия формирования в этих компактных структурах до шести полюсов рабочего затухания на конечных частотах, что обеспечивает их повышенную частотную избирательность при существенно ограниченном числе резонаторов. Приведены результаты численного электродинамического моделирования микрополосковых фильтров, реализуемых на подложках с различными значениями относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r=9.8$  и  $\epsilon_r=80$ .

**Ключевые слова:** микрополосковые фильтры, гребенчатые секции, шпилечные резонаторы, решетчатая секция, полюсы затухания, электромагнитная и гальваническая связи

## 1. Введение

Четвертьволновые встречно-штыревые и гребенчатые микрополосковые фильтры (МПФ) находят широкое применение в технике СВЧ, так как они являются одними из наиболее компактных структур [1,2]. Уменьшение их габаритов достигается за счет реализации МПФ на подложках с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r=10\dots 100$ , а также исполнением четвертьволновых резонаторов в виде свернутых элементов типа «спираль», «шпилька» и других конструктивных форм [3-4]. При этом повышение их частотной избирательности традиционно обеспечивается увеличением числа резонаторов и формированием полюсов рабочего затухания на конечных частотах за счет организации дополнительных электромагнитных связей между несмежными резонаторами. Однако в N-резонаторных структурах число формируемых таким образом полюсов рабочего затухания ограничено и не превышает значения N-2. Кроме того, организация дополнительных электромагнитных связей существенно усложняет конструкции МПФ.

Целью данной работы является исследование принципов построения более компактных МПФ на основе встречно-гребенчатых структур с повышенной частотной избирательностью за счет формирования значитель-

ного числа полюсов рабочего затухания на конечных частотах без организации дополнительных связей между несмежными резонаторами.

## 2. Исследуемые структуры и их частотные свойства

На рис. 1 представлены два типа встречно-гребенчатых микрополосковых структур, выполненных на основе многопроводной системы связанных линий. Задавая определенные краевые условия на концах линий, сформируем в каждой структуре по четыре электромагнитно взаимодействующих четвертьволновых шпилечных резонатора, один конец каждого из которых находится в режиме короткого замыкания. В каждой из этих структур по-разному организуется взаимодействие четвертьволновых резонаторов. В структуре, представленной на рис. 1, а, первый и второй резонаторы, а также третий и четвертый представляют собой секции на связанных резонаторах с преобладающей магнитной связью между ними. В этих полосно-пропускающих секциях формируются полюсы рабочего затухания в области верхних частот относительно полосы пропускания [5]. С другой стороны, второй и третий резонаторы образуют гребенчатую секцию с преобладающей электрической связью между ними, в которой возможно формирование полюса рабочего затухания в области нижних частот.

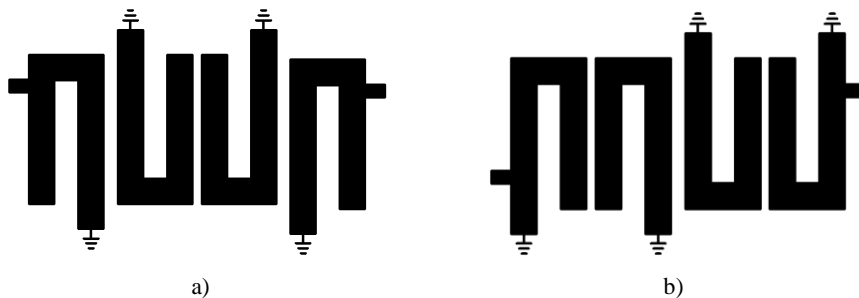


Рис. 1 Четырехрезонаторные встречно-гребенчатые структуры МПФ

На рис. 2 представлены результаты численного электродинамического 3D-моделирования этой структуры, выполненной на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r=80$  и толщиной  $H=0,5$  мм. Вышеотмеченные особенности формирования полюсов рабочего затухания в каждой секции проявляются в этой структуре без организации электромагнитных связей между несмежными резонаторами. При этом

обеспечивается разрядка спектра паразитных полос пропускания, что обусловлено двумя дополнительными особенностями рассматриваемой

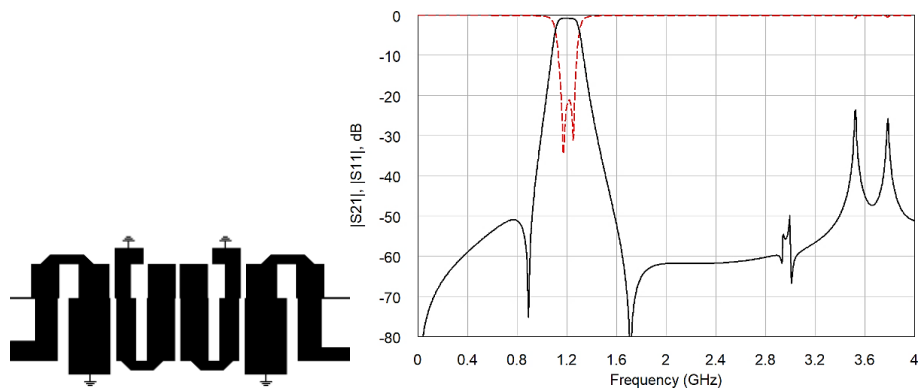


Рис. 2 Четырехрезонаторный МПФ с разрядкой спектра паразитных полос пропускания

структуры МПФ. Во-первых, входной и выходной резонаторы кондуктивно включены, в результате чего ненагруженные их концы представляют собой шлейфы, каждый из которых формирует полюс затухания в области между второй и третьей гармониками. Расщепление этих полюсов затухания достигается выбором различных электрических длин этих шлейфов. Во-вторых, ненагруженные плечи шпилечных резонаторов, образующих центральную гребенчатую структуру МПФ, представляют собой решетчатую секцию. Как известно в четвертьволновой решетчатой секции формируется за счет неравенства фазовых скоростей квази-Т волн свой полюс рабочего затухания [6]. Таким образом, в области второй и третьей гармоник потенциально возможно формирование еще нескольких полюсов рабочего затухания, которые и обеспечивают разрядку спектра паразитных полос пропускания. Отметим, что структура МПФ занимает площадь подложки  $12,5 \times 5,0$  мм, а минимальное расстояние между отрезками микрополосковых линий (МПЛ) равно  $S_{\min} = 0,15$  мм. Минимальная и максимальная ширины этих отрезков равны соответственно  $W_{\min} = 0,35$  мм и  $W_{\max} = 1,5$  мм.

### 3. Встречно-гребенчатые структуры с дополнительной гальванической связью

Сохранить полюсы рабочего затухания, свойственные отдельным секциям, образующим структуру четырехрезонаторного МПФ, возможно [7] за счет введения дополнительной гальванической связи между ними.

На рис. 4 представлены результаты синтеза встречно-гребенчатой структуры (рис. 1,б) на основе четвертьволновых шпилечных резонаторов, в которой рационально сочетаются два типа взаимодействия между гребенчатыми секциями. В этой структуре МПФ формируется шесть расщепленных полюсов рабочего затухания ( $N+2$ ). Два из них, расположенных в области нижних частот, формируются гребенчатыми секциями. Все остальные четыре полюса рабочего затухания формируются в области верхних частот решетчатыми секциями и обеспечивают повышенную частотную избирательность. Расщепление этих полюсов рабочего затухания достигается выбором баланса электромагнитных связей в решетчатых секциях на

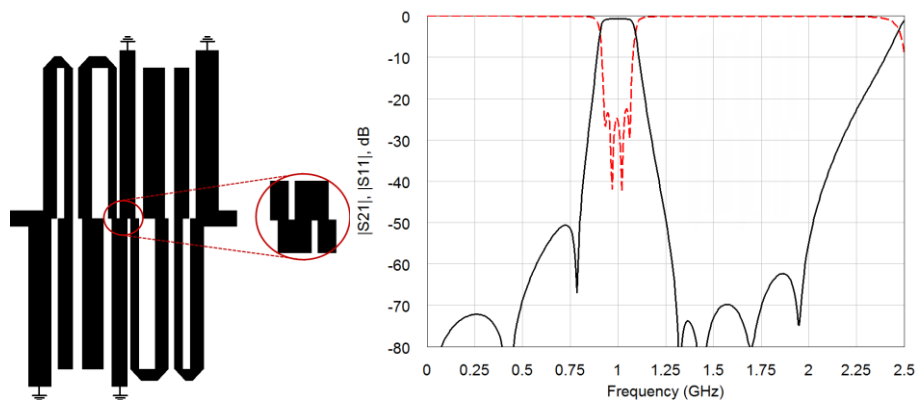


Рис. 4. Четырехрезонаторный МПФ с дополнительной гальванической связью

разных участках их длины. Нарушение этого баланса обуславливает сужение полосы заграждения, а также частичное вырождение некоторых полюсов рабочего затухания за счет их совмещения или перемерзания. МПФ выполнен на подложке толщиной  $H=1$  мм с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r=9,8$ . Минимальное расстояние между отрезками МПЛ  $S_{\min}=0,3$  мм, а минимальная и максимальная ширины отрезков МПЛ равны  $W_{\min}=0,5$  мм и  $W_{\max}=1,5$  мм, соответственно. Площадь подложки, занимаемая этим МПФ, составляет  $12,5 \times 18,5$  мм. Особенность топологии МПФ состоит в том, что вследствие гальванической связи между резонаторами четыре отрезка МПЛ, которые образуют эти резонаторы, объединены в единую физическую точку. В результате этого в центре структуры МПФ образуется отрезок с электрической длиной порядка  $\lambda/8$ , концы которого находятся в режиме короткого замыкания. Этот отрезок разделяет структуру МПФ на две части с преобладающей магнитной связью между

ними. Следует отметить, что коэффициент прямоугольности рабочего затухания для этой четырехрезонаторной структуры, определяемый по уровням минус 3дБ и минус 50 дБ, составляет  $K_{пз/50}=2,5$ .

#### 4. Заключение

Показано что в компактных встречно-гребенчатых структурах на основе четвертьволновых шпилечных резонаторов возможно формирование N+2 полюса рабочего затухания на конечных частотах. Это достигается за счет рационального сочетания в структурах как электромагнитного взаимодействия между резонаторами с преобладающей связью определенного типа (магнитной или электрической), так и гальванической связи между смежными резонаторами встречно направленных гребенчатых секций. Такой режим работы рассматриваемых структур обеспечивает возможность создания на их основе компактных высокоизбирательных микрополосковых фильтров с ограниченным числом резонаторов. Эти МПФ могут реализовываться на подложках с различными значениями относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r=2.2 - 100$  в рамках стандартных тонко- и толстопленочной технологий.

#### Список литературы

- [1] Маттей Д. Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. / Д. Л. Маттей, Л. Янг, Е.М.Т. Джонс. - М.: Связь, 1971, 1972. Т.1,2. 451 с., 494 с.
- [2] Роудз Дж.Д. Теория электрических фильтров // М.: Сов. радио, 1980. 240 с.
- [3] Беляев Б.А. и др., Селективные свойства микрополосковых фильтров на четвертьволновых сонаправленных шпилечных резонаторах / Беляев Б.А., Бутаков С.В., Лалетин Н.В., Лексиков А.А., Тюрнев В.В., Чесноков О.Н. // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 1. С. 24-36.
- [4] Николаев М. А. Компактные микрополосковые фильтры с повышенной селективностью // Современная электроника. 2008. № 1. С. 28-30.
- [5] Аристархов Г. М., Вершинин Ю. П., Анализ фильтров на связанных линиях с неравными фазовыми скоростями // Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28. № 9. С. 1714-1724.
- [6] Аристархов Г.М., Звездинов Н.В., Чернышев В.П., Микрополосковые фильтры на сонаправленных шпилечных резонаторах с повышенной частотной избирательностью // Радиотехника. 2014. № 10. С. 22-28.
- [7] Аристархов Г.М., Аринин О.В., Кириллов И.Н., Компактные высокоизбирательные микрополосковые фильтры на основе встречно-гребенчатых структур // Материалы XII Международной отраслевой научно-технической конференции «ТЕХНОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЩЕСТВА». 2018. С. 214-216.