

СЕЛЕКТИВНЫЕ СВОЙСТВА ДВУХ- И ТРЕХРЕЗОНАТОРНЫХ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ГРЕБЕНЧАТЫХ СТРУКТУР И ВЫСОКОИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Аристархов Григорий Маркович,

*Московский технический университет связи и информатики, кафедра «Электроника», Москва, Россия,
g.aristarkhov2010@yandex.ru*

Аринин Олег Вячеславович,

Московский технический университет связи и информатики, кафедра «Электроника», Москва, Россия

Кириллов Игорь Николаевич,

Московский технический университет связи и информатики, кафедра «Электроника», Москва, Россия

Аннотация

Исследуются новые принципы построения одного из базовых элементов интегральной СВЧ электроники – микрополосковых фильтров, обладающих повышенной частотной избирательностью. Показано, что придавая необходимую конфигурацию топологии многоступенчатых гребенчатых микрополосковых структур, можно сформировать в них значительное число полюсов рабочего затухания на конечных частотах за счет обеспечения определенного баланса электромагнитных связей между несмежными резонаторами на разных участках их длины. Это открывает новые возможности создания высокоизбирательных микрополосковых фильтров на основе компактных структур с существенно ограниченным числом резонаторов.

Ключевые слова

Микрополосковые фильтры, гребенчатые секции, полюсы затухания, электромагнитная и гальваническая связи.

Введение

Гребенчатые микрополосковые фильтры (МПФ) находят широкое применение в технике СВЧ, так как они являются одними из наиболее компактных структур [1, 2]. Повышение их частотной избирательности при ограниченном числе четвертьволновых резонаторов традиционно достигается формированием полюсов рабочего затухания на конечных частотах за счет организации дополнительных электромагнитных связей между несмежными резонаторами [3]. Однако применение этого схмотехнического приема, во-первых, усложняет конструкцию фильтров и в ряде структур приводит к существенному увеличению их габаритов [4], а во-вторых, обуславливает формирование в N резонаторной структуре ограниченного числа полюсов рабочего затухания, равного $P=N-2$.

В данной работе исследуются особенности построения микрополосковых фильтров с повышенной частотной избирательностью на основе более компактных многоступенчатых гребенчатых структур с ограниченным числом резонаторов, в которых формируется значительное количество полюсов рабочего затухания.

Следует отметить, что в такой постановке решалась в [5,6,9] задача создания высокоизбирательных МПФ на основе структур с ограниченным числом полуволновых шпилечных резонаторов. Однако специфика структур с четвертьволновыми резонаторами требует иных подходов к решению этой задачи.

Двухрезонаторные гребенчатые структуры и их частотные свойства

Схмотехническую основу полосно-пропускающих гребенчатых МПФ составляет секция на двух связанных микрополосковых линиях (МПЛ), принцип действия которой основан на совместном использовании скачка волновых сопротивлений на разных участках длины [2] и эффекта неравенства фазовых скоростей нормальных волн в системах связанных МПЛ [7]. Как было показано в [8], селективные возможности этих секций могут быть существенно расширены за счет применения многоступенчатых гребенчатых структур.

Так, в трехступенчатых гребенчатых секциях возможно формирование двух полюсов рабочего затухания на конечных частотах. Их расположение на частотной оси определяется соотношением коэффициентов связи на разных ступенях секции. При этом, полюсы рабочего затухания формируются в области верхних частот при доминирующей магнитной и сильной электрической связях между резонаторами. Расщепление этих полюсов рабочего затухания достигается при реализации более слабой электромагнитной связи на средней ступени секций. Только при таком сочетании электромагнитных связей между резонаторами выполняется условие формирования полюсов рабочего затухания на двух частотах.

В структуре с преобладающей электрической связью между резонаторами формируются полюсы затухания в области нижних частот. Расщепление этих полюсов рабочего затухания определяется в основном соотношением коэффициентов связи в первой и во второй ступенях секции.

В этих секциях также возможно формирование одного полюса затухания в области нижних, а второго – в

области верхних частот. Этот режим работы секции обеспечивается выбором соответствующего баланса коэффициентов связи во всех ее ступенях. Следует отметить, что совмещение полюсов затухания вследствие неправильного выбора соотношения коэффициентов связи на разных участках длины резонаторов обуславливает их вырождение.

Введение еще одной ступени определяет возможность формирования еще трех полюсов рабочего затухания в частотной области третьей и четвертой гармоник (рис. 1). При этом преобладающей связью между резонаторами является электрическая связь, а минимальные расстояния между связанными МПЛ составляют $S_{\min}=0,1$ мм. При фазовом синхронизме волн в случае применения структуры с однородной средой (полосковые линии) возможно формирование еще ряда дополнительных полюсов рабочего затухания, обеспечивающих разрядку спектра паразитных полос пропускания вплоть до седьмой гармоники включительно (рис. 2).

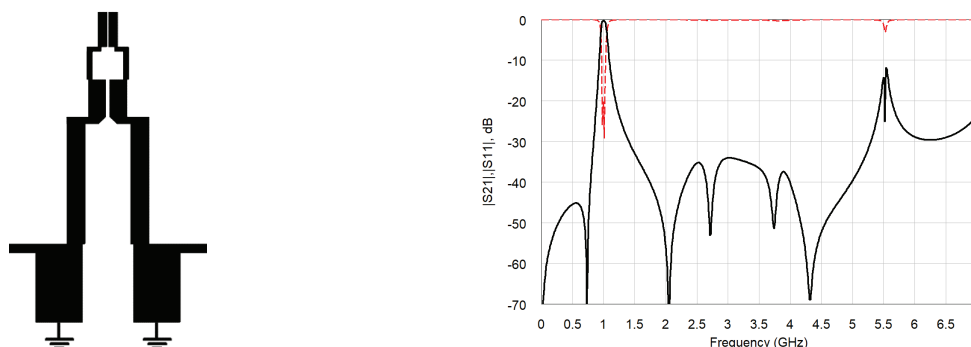


Рис. 1. Микрополосковая гребенчатая секция с повышенной частотной избирательностью в области верхних частот

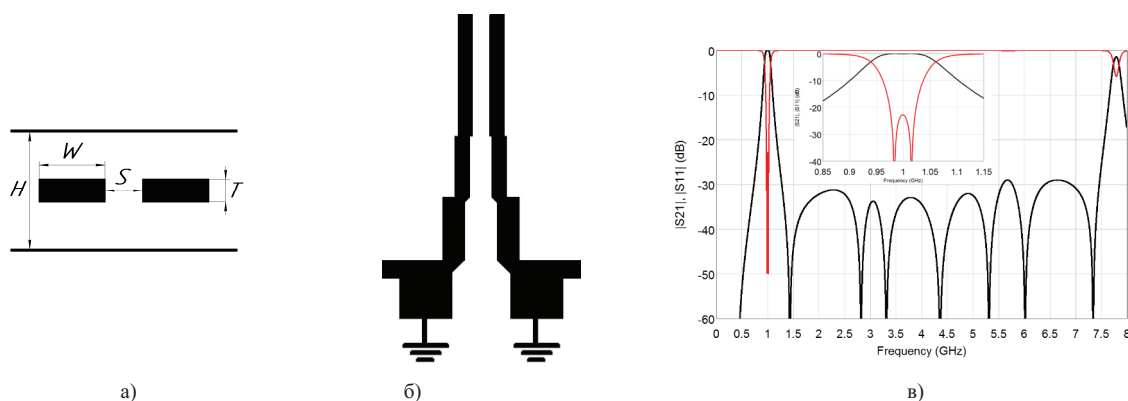


Рис. 2. Полосковая гребенчатая секция с разрядкой спектра паразитных полос пропускания:
а) вид сбоку; б) топология; в) частотные характеристики

Трехрезонаторные гребенчатые структуры

Распространим этот подход к формированию полюсов рабочего затухания применительно к построению трехрезонаторных микрополосковых гребенчатых структурах. На рисунке 3 представлены результаты численного электродинамического 3D-моделирования трехрезонаторной симметричной структуры с преобладающей магнитной связью между резонаторами (нижний участок топологии МПФ). В качестве подложки используется диэлектрик толщиной $H=1$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=9,8$. На верхнем участке топологии сформирована дополнительная электрическая связь между смежными резонаторами. При этом минимальное и максимальное расстояния между резонаторами в структуре равны соответственно $S_{\min}/H=0,25$ и $S_{\max}/H=3,3$, а минимальная и максимальная ширина отрезков МПЛ равны $W_{\min}/H=0,4$ и $W_{\max}/H=3$. Важно отметить, что без дополнительной электрической связи между смежными резонаторами в трехрезонаторном МПФ этого типа формируется только один (№1) полюс рабочего затухания.

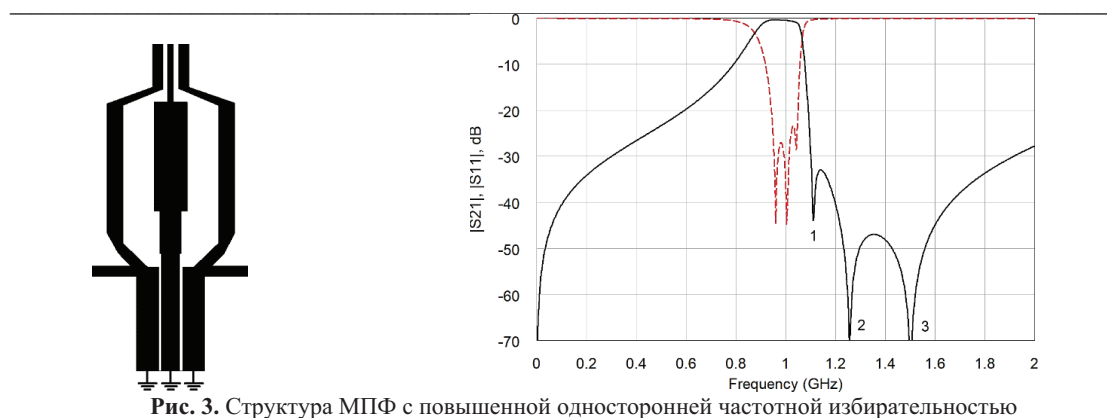


Рис. 3. Структура МПФ с повышенной односторонней частотной избирательностью

Таким образом, усиление электрической связи между смежными МПЛ обуславливает формирование двух дополнительных полюсов рабочего затухания (№2 и №3). Степень их расщепления определяется шириной зазора между связанными отрезками МПЛ на этом участке топологии. Чем она меньше, тем больше степень расщепления полюсов рабочего затухания. При чрезмерном усилении этой электрической связи между резонаторами полюсы рабочего затухания №2 и №3 расщепляются в большей степени и при ослаблении магнитной связи полюс рабочего затухания №2 совпадает или переменяется с полюсом затухания №1, вследствие чего они оба вырождаются.

На рисунке 4 представлена несимметричная структура МПФ, реализованная на том же типе подложки, в которой между первым и вторым резонаторами преобладающей является электрическая, а между вторым и третьим резонаторами – магнитная связь. Вследствие такого сочетания неуравновешенных электромагнитных связей на разных участках длины резонаторов формируется один полюс рабочего затухания в области нижних и два – в области верхних частот. При этом минимальная и максимальная ширины отрезков МПЛ равны $W_{\min}/H=0,5$ и $W_{\max}/H=2,9$, а $S_{\min}/H=0,15$ и $S_{\max}/H=3,9$, соответственно.

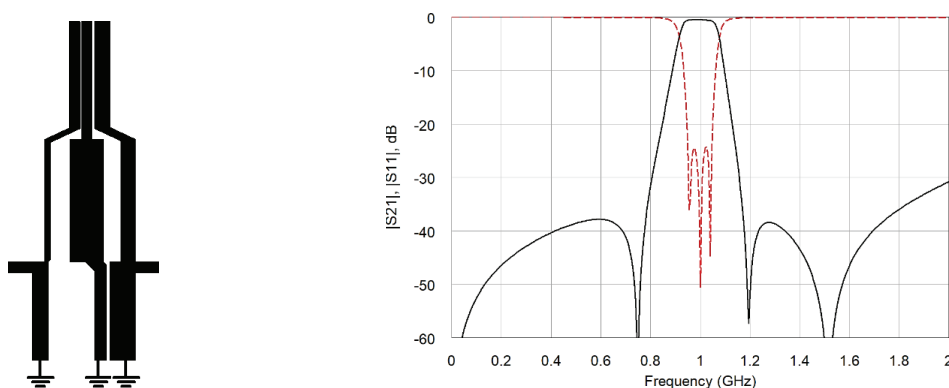


Рис. 4. Несимметричная структура МПФ с квазисимметричной частотной характеристикой

Таким образом, в трехрезонаторных трехступенчатых гребенчатых микрополосковых структурах возможно формирование трех полюсов рабочего затухания без введения дополнительных связей между несмежными резонаторами. Распределение полюсов затухания на частотной оси определяется степенью неуравновешенности электромагнитных связей между смежными резонаторами на разных участках их длин. Основные полюсы затухания при преобладающей электрической связи между смежными резонаторами располагаются в области нижних частот, а при преобладающей магнитной связи – в области верхних частот. Расположение вспомогательных полюсов затухания определяется степенью электромагнитного взаимодействия между резонаторами в области центральной ступени структур. При этом минимальное расстояние между связанными МПЛ в рассматриваемых структурах $S_{\min}/H \geq 0,15$, что обеспечивает высокую технологичность МПФ.

Трехрезонаторные гребенчатые структуры с кросс-связью

Введем в симметричную трехрезонаторную структуру дополнительную электрическую связь между несмежными резонаторами и определим условия формирования полюсов рабочего затухания. Дополнительная связь реализуется переключкой между крайними резонаторами (рис. 5,а верхний участок топологии). На рисунке 5,б представлены частотные зависимости рабочего затухания этой структуры, в которой формируется четыре полюса рабочего затухания, два из которых в области нижних частот совмещены. Эта структура обладает повышенной частотной избирательностью. При этом доминирующей связью между смежными резонаторами является электрическая связь и минимальные расстояния между МПЛ составляют $S_{\min}/H=0,1$. Относительная диэлектрическая проницаемость подложки толщиной $H=1$ мм равна $\epsilon_r=80$.

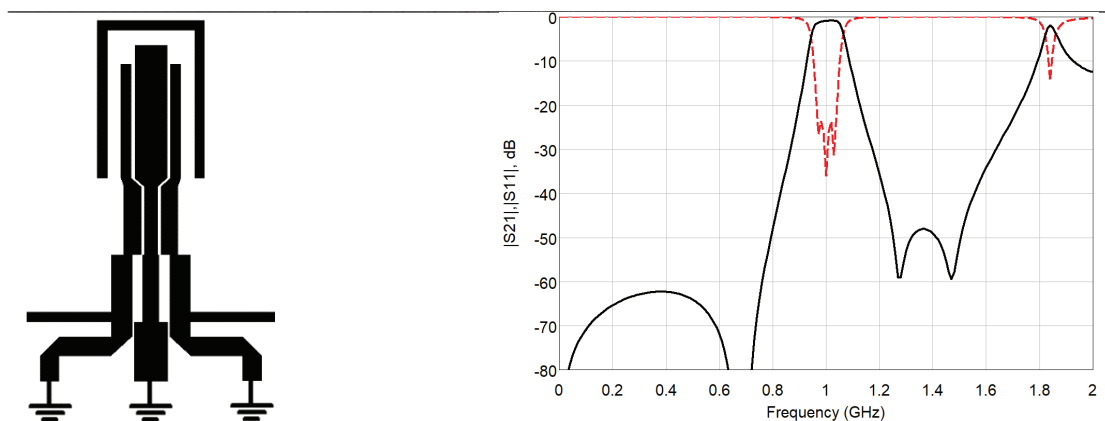


Рис. 5. Трехрезонаторный МПФ с квазисимметричной амплитудно-частотной характеристикой

При преобладающей магнитной связи между смежными резонаторами все четыре полюса рабочего затухания формируются в области верхних частот (рис. 6). Рассматриваемая структура также выполняется на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=80$. Повышенная магнитная связь между смежными резонаторами реализуется за счет введения перемычки между ними (нижний участок топологии). При этом $W_{\max}=2$ мм, $W_{\min}=0,3$ мм, а минимальное расстояние между МПЛ $S_{\min}=0,155$ мм.

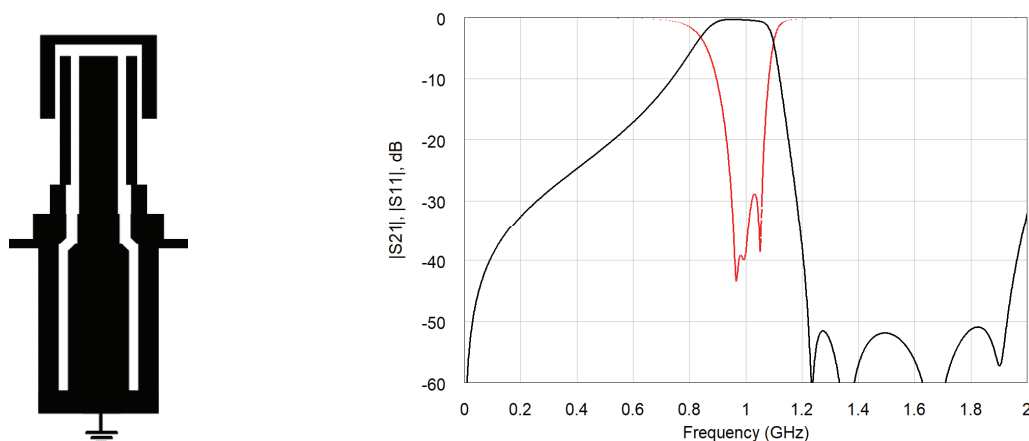


Рис. 6. Трехрезонаторный МПФ с дополнительной магнитной связью между смежными резонаторами

Заключение

В данной работе показано, что многоступенчатые четвертьволновые гребенчатые структуры обладают достаточным числом степеней свободы для формирования в них полюсов рабочего затухания без введения дополнительных электромагнитных связей между несмежными резонаторами. Расположение полюсов затухания относительно полосы пропускания достигается за счет реализации определенного баланса коэффициентов электромагнитной связи между смежными резонаторами на разных участках их длины.

Введение дополнительной электромагнитной связи между несмежными резонаторами способствует расщеплению полюсов рабочего затухания, формируемых в гребенчатых структурах, и обуславливает формирование дополнительных полюсов затухания. При этом общее число формируемых полюсов рабочего затухания больше количества резонаторов в структуре.

Результаты численного электродинамического 3D моделирования подтвердили возможность создания компактных высокоизбирательных МПФ на основе гребенчатых структур с существенно ограниченным числом резонаторов.

Литература

1. Rhodes J.D. The stepped digital elliptic filter // IEEE Trans. MTT, 1969. Vol. MTT-17. №4, pp. 178-184.
2. Макимото М., Ямасито С. Компактный полосовой фильтр на резонаторах со ступенчатым изменением сопротивления // ТИИЭР. 1979. Т.67, №1. С. 17-21.
3. Роудз Дж.Д. Теория электрических фильтров. М.: Сов. радио, 1980. 240 с.
4. Захаров А.В., Ильченко М.Е., Трубаров И.В. Гребенчатые фильтры на основе симметричных полосковых линий передачи // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62. № 6. С. 607-615.
5. Аристархов Г.М., Звездинов Н.В. Селективные свойства микрополосковой секции на двух сонаправленных шпилечных резонаторах с неуравновешенными электромагнитными связями // Антенны. 2016. № 2 (222). С. 76-82.

6. *Аристархов Г.М., Звездинов Н.В.* Высокоизбирательные одно- и двухрезонаторные микрополосковые фильтры // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62. № 8. С. 819-824.
7. *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.
8. *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.
9. *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.