

МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ ВСТРЕЧНО-ГРЕБЕНЧАТЫХ СТРУКТУР С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ СВЯЗЬЮ

Аристархов Григорий Маркович,
Аринин Олег Вячеславович,
Кириллов Игорь Николаевич,

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

Аннотация

Исследуются принципы построения микрополосковых фильтров с повышенной частотной избирательностью на основе компактных структур с ограниченным числом четвертьволновых резонаторов. Показано, что в трехрезонаторных трехступенчатых гребенчатых структурах возможно формирование трех полюсов рабочего затухания на конечных частотах. Определены условия реализации на основе этих структур многорезонаторных высокоизбирательных микрополосковых фильтров с числом полюсов рабочего затухания, равным количеству резонаторов в МПФ.

Ключевые слова: микрополосковые фильтры, гребенчатые секции, полюсы затухания, электромагнитная и гальваническая связи

Введение

Микрополосковые фильтры [МПФ] находят самое широкое применение в технике СВЧ, что определяется их совместимостью с технологией создания гибридных и монолитных интегральных схем, а также сравнительно малыми габаритами. Следует отметить, что основной тенденцией развития современных модулей СВЧ является существенное повышение их функциональной сложности и степени интеграции при одновременном уменьшении масса-габаритных показателей. В связи с этим к МПФ предъявляются все более жесткие требования к их частотной избирательности, потерям в полосе пропускания и габаритам.

Одними из наиболее компактных структур являются МПФ на основе встречно-стержневых и гребенчатых структур. В этих структурах повышение частотной избирательности достигается формированием полюсов рабочего затухания на конечных частотах за счет организации дополнительных электромагнитных связей между несмежными четвертьволновыми резонаторами [1, 2, 7]. Однако это существенно усложняет конструкции МПФ. Кроме того, число формируемых за счет применения этого схемотехнического приема полюсов рабочего затухания ограничено и не превышает значения $N-2$, где N – число резонаторов в МПФ.

Целью данной работы является определение условий формирования в МПФ значительно большего числа полюсов рабочего затухания, обеспечивающих повышенную частотную избирательность фильтров без организации каких-либо дополнительных связей между несмежными резонаторами при ограниченном их числе.

Базовые трехрезонаторные гребенчатые секции и их частотные свойства

Исследуем многоступенчатые четвертьволновые трехрезонаторные гребенчатые структуры, представленные на рис. 1-3. Как известно, необходимым условием формирования на основе гребенчатых структур полосно-пропускающих фильтров является реализация в них неуравновешенных электромагнитных связей между резонаторами. Это достигается или за счет реализации скачка волновых сопротивлений в двухступенчатых резонаторах [3], или использования эффекта неравенства фазовых скоростей нормальных волн в связанных микрополосковых линиях (МПЛ) [4], а также за счет сочетания того и другого приемов [5].

Отличительной особенностью рассматриваемых в данной работе структур является применение в них многоступенчатых резонаторов. В этом случае легко реализуется требуемая степень неуравновешенности электромагнитных связей на разных участках связанных резонаторов. Именно эта конструктивная особенность позволяет сформировать в трехрезонаторных структурах не менее трех полюсов рабочего затухания, которые могут достаточно произвольно располагаться на частотной оси.

На рисунке 1 представлены результаты численного электродинамического моделирования трехрезонаторной симметричной структуры с преобладающей магнитной связью между резонаторами (нижний участок топологии МПФ). Здесь и далее для определенности все рассматриваемые структуры реализуются на подложках толщиной $H=1$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=10$. На верхнем участке топологии сформирована дополнительная электрическая связь между смежными резонаторами. При этом минимальное и максимальное расстояния между резонаторами в структуре равны соответственно $S_{\min}=0,25$ мм и $S_{\max}=3,3$ мм, а минимальная и максимальная ширина отрезков МПЛ равны $W_{\min}=0,4$ мм и $W_{\max}=3$ мм. Важно отметить, что без дополнительной электрической связи между резонаторами в трехрезонаторном МПФ этого типа формируется только один (№1) полюс рабочего затухания.

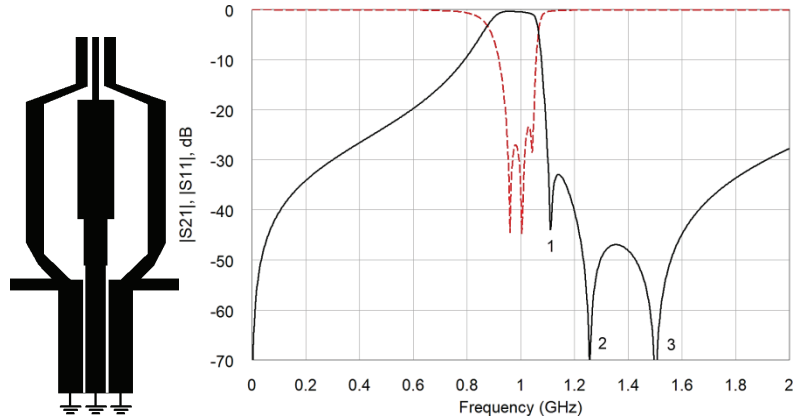


Рис. 1. Структура МПФ с повышенной частотной избирательностью в области верхних частот

Введение дополнительной электрической связи между смежными МПЛ обуславливает формирование двух дополнительных полюсов рабочего затухания (№2 и №3). Степень их расщепления определяется расстоянием между связанными отрезками МПЛ на этом участке топологии. Чем оно 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 рис. 2 представлена симметричная структура МПФ с преобладающей электрической связью между смежными резонаторами. В структуре формируется три основных полюса рабочего затухания (№1 – №3), два первых из которых расположены в области нижних частот.

Введение дополнительной электрической связи между несмежными резонаторами формирует четвертый полюс затухания в области второй гармоники. Дополнительная электрическая связь реализуется в виде перемычки между первым и третьим резонаторами (верхний участок топологии). При этом минимальная и максимальная ширины отрезков МПЛ равны $W_{\min}=0,55$ мм и $W_{\max}=1,9$ мм, а минимальное и максимальное расстояния между МПЛ равны $S_{\min}=0,15$ мм и $S_{\max}=1,7$ мм, соответственно.

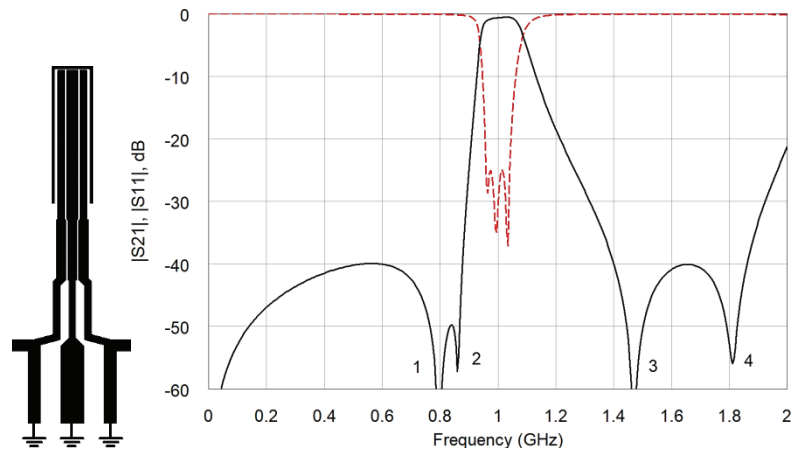


Рис. 2. Структура МПФ с дополнительной электрической связью между несмежными резонаторами

На рисунке 3 представлена несимметричная структура МПФ, 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 $W_{\min}=0,5$ мм и $W_{\max}=2,9$ мм, а $S_{\min}=0,15$ мм и $S_{\max}=3,9$ мм, соответственно.

Таким образом, в трехрезонаторных трехступенчатых гребенчатых микрополосковых структурах возможно формирование не менее трех полюсов рабочего затухания, что обеспечивает повышенную частотную избирательность МПФ. Распределение полюсов затухания на частотной оси определяется степенью неуравновешенности электромагнитных связей между смежными резонаторами на разных участках их длин (сравним топологии, представленные на рис. 1-3). 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 $S_{\min} \geq 0,15$ мм, что обеспечивает высокую технологичность МПФ.

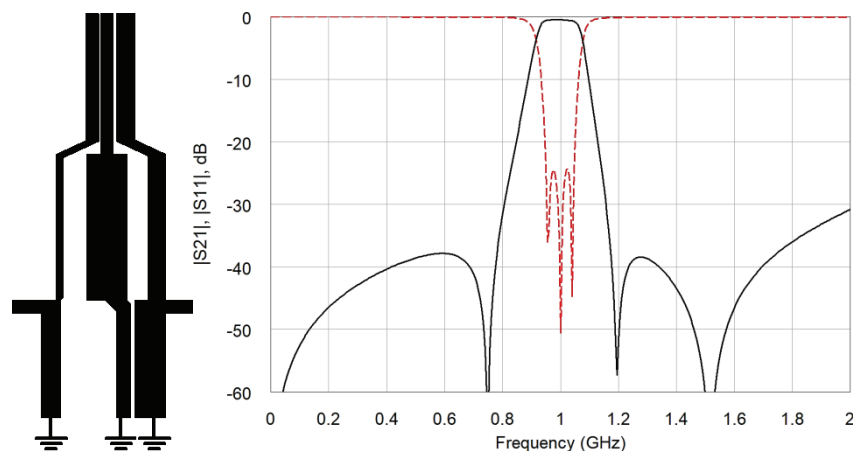


Рис. 3. Несимметричная структура МПФ с квазисимметричной частотной характеристикой

Встречно-гребенчатые структуры с дополнительной гальванической связью

Традиционно повышение порядка гребенчатых фильтров достигается увеличением числа резонаторов в них. Таким образом, МПФ этого типа представляют собой многосвязанные многопроводные многомодовые структуры с невырожденным спектром собственных значений, что является достаточным условием для формирования на их основе полосно-пропускающих фильтров. Однако в этих однородных или двухступенчатых структурах, не содержащих дополнительных связей между несмежными резонаторами, может формироваться существенно ограниченное число полюсов рабочего затухания. Это обусловлено электромагнитным взаимодействием между всеми резонаторами, вследствие чего полюсы рабочего затухания, присущие двух- и трехрезонаторным секциям, в многорезонаторной структуре вырождаются. Частично разрешить это противоречие удастся за счет организации встречно-гребенчатых структур, в которых формируется три полюса рабочего затухания в области верхних частот (рис. 4). Минимальные и максимальные расстояния между связанными отрезками МПЛ и их ширины в данном МПФ равны $S_{\min}=0,15$ мм, $S_{\max}=2,5$ мм, $W_{\min}=0,5$ мм, $W_{\max}=3$ мм, соответственно.

Повышение частотной избирательности этой шестирезонаторной структуры может быть достигнуто за счет введения дополнительной гальванической связи между встречно включенными гребенчатыми секциями [6]. Таким образом, в этой структуре одновременно реализуется два способа наращивания порядка фильтров как за счет электромагнитного взаимодействия между резонаторами, так и за счет гальванической связи между ними (т.е. за счет каскадирования трехрезонаторных базовых секций).

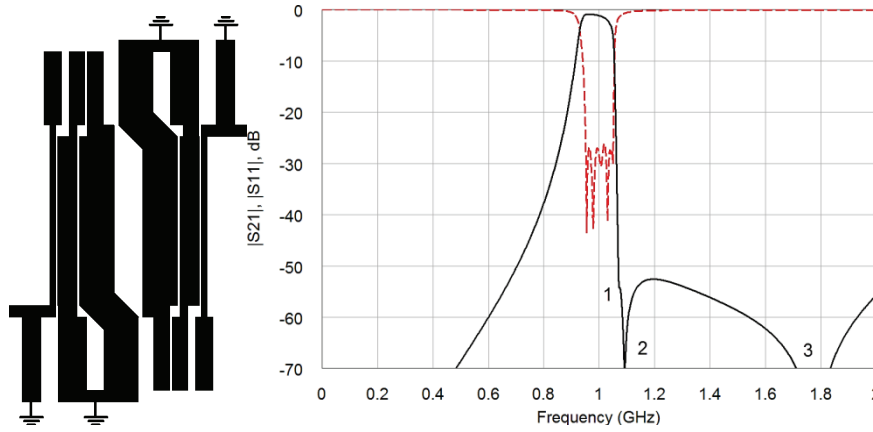


Рис. 4. Встречно-гребенчатая структура шестирезонаторного МПФ

На рисунке 5 представлены результаты численного электродинамического моделирования шестирезонаторных МПФ на основе встречно-гребенчатых структур с дополнительной гальванической связью. В этой компактной структуре со связями только между смежными резонаторами формируется шесть полюсов рабочего затухания, обеспечивающих повышенную частотную избирательность МПФ. Коэффициент прямоугольности рабочего затухания, определяемый по уровням минус 3 дБ и минус 50 дБ, равен, $K_{п3/50}=1,8$. При этом минимальное расстояние между отрезками связанных МПЛ $S_{\min} \geq 0,15$ мм, а максимальная и минимальная ширины отрезков МПЛ равны $W_{\max}=3$ мм, $W_{\min}=0,4$ мм, соответственно.

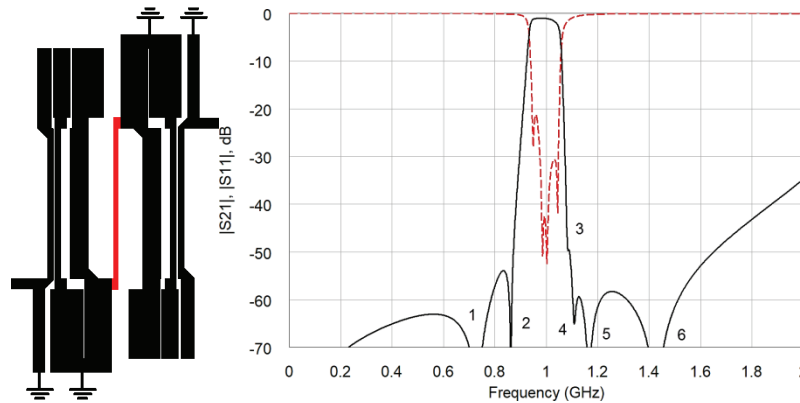


Рис. 5. Структура шестирезонаторного МПФ с гальванической связью

Следует отметить, что каждая из трехрезонаторных секций, образующих МПФ, формирует один полюс рабочего затухания в области нижних и два полюса рабочего затухания в области верхних частот. Такое расположение полюсов рабочего затухания обеспечивается тем, что подобно структуре, представленной на рис. 3, между первым и вторым резонаторами преобладающей является электрическая связь, а между вторым и третьим резонаторами – магнитная. При этом совместное электромагнитное взаимодействие и гальваническая связь между трехрезонаторными встречно-гребенчатыми секциями обуславливают расщепление этих полюсов рабочего затухания (а не их вырождение как в структуре, представленной на рис. 4, где используется только электромагнитное взаимодействие между секциями). Отметим, что нерациональный выбор этих связей может привести к чрезмерному расщеплению полюсов рабочего затухания и к их частичному или полному вырождению.

Заключение

Показано, что в микрополосковых гребенчатых структурах на основе трехпроводных систем связанных линий возможно формирование не менее трех полюсов рабочего затухания без организации дополнительных связей между несмежными резонаторами. Условием реализации этого режима работы гребенчатых структур является применение трехступенчатых систем связанных МПЛ с неуравновешенными электромагнитными связями. Расположение полюсов рабочего затухания относительно полосы пропускания определяется тем, какая из электромагнитных связей между резонаторами является преобладающей.

дающей, а также реализацией определенного соотношения коэффициентов связи на разных участках трехступенчатых МПЛ.

Повышение порядка МПФ с одновременным сохранением селективных свойств базовых трехрезонаторных секций может быть достигнуто в многопроводных встречно-гребенчатых структурах с дополнительной гальванической связью между смежными секциями. Таким образом, рассмотренные структуры, сочетающие высокую компактность и технологичность, отличаются повышенной частотной избирательностью.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю признательность фирме NI AWR и лично Табишу Канну за многолетнюю помощь и поддержку в образовательной деятельности кафедры «Электроника» МТУСИ.

Литература

1. *Rhodes J. D.* The stepped digital elliptic filter // IEEE Trans. MTT. 1969. Vol. MTT-17, №4, pp.178-184.
2. *Роудз Дж. Д.* Теория электрических фильтров. М.: Сов. радио, 1980. 240 с.
3. *Макимото М., Ямасито С.* Компактный полосовой фильтр на резонаторах со ступенчатым изменением сопротивления // ТИИЭР, 1979. Т.67. №1. С.17-21.
4. *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.
5. *Аристархов Г.М., Чернышев В. П.* Анализ микрополосковых секций решетчатого и гребенчатого типа при кондуктивном включении // Электронная техника. Сер. Микроэлектронные устройства. 1983. Вып.2(38). С.19-23.
6. *Aristarkhov G.M., Arinin O.V. and Kirillov I.N.* Compact highly-selective microstrip filters based on counter-comb structures / 2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, 2018, pp. 1-4. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8350569&isnumber=8350560>.
7. *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.