

КОМПАКТНЫЕ ВЫСОКОИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ ВСТРЕЧНО-ГРЕБЕНЧАТЫХ СТРУКТУР

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

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

Введение

Микрополосковые фильтры (МПФ) находят самое широкое применение в микроволновых интегральных устройствах систем мобильной и спутниковой связи, радиолокации и навигации, что определяется их высокой технологичностью и сравнительно малыми габаритами. Особое место среди различных типов МПФ занимают четвертьволновые гребенчатые структуры, как обладающие наибольшей компактностью. Кроме того, в этих структурах возможно формирование полюсов рабочего затухания на конечных частотах, обеспечивающих повышенную частотную избирательность МПФ. Число формируемых полюсов рабочего затухания и их расположение на частотной оси определяется в этих структурах целым рядом взаимосвязанных факторов: скачком волновых сопротивлений или коэффициентов связи на разных участках длины двухступенчатых резонаторов [1,2], степенью их кондуктивного включения [3], неравенством фазовых скоростей нормальных волн в связанных микрополосковых линиях (МПЛ) [4], а также дополнительными электромагнитными связями между несмежными резонаторами [5].

Необходимо отметить, что в двухрезонаторных микрополосковых гребенчатых структурах потенциально возможно, как будет показано ниже, формирование при выполнении определенных условий двух полюсов рабочего затухания на конечных частотах.

Однако в N-резонаторных гребенчатых структурах число формируемых полюсов рабочего затухания P ограничено. Даже при организации дополнительных электромагнитных связей между несмежными резонаторами, что существенно усложняет конструкцию МПФ, их число не превышает значения $P \leq N-2$. Стремление сохранить в многорезонаторных структурах потенциальные селективные возможности, свойственные двухрезонаторным гребенчатым секциям, привело к созданию встречно-гребенчатых МПФ [6, 7].

В данной работе исследуются четырехрезонаторные многоступенчатые встречно-гребенчатые МПФ, в которых наряду с неуравновешенными электромагнитными связями между смежными резонаторами включена дополнительная гальваническая связь. Это обеспечивает возможность формирование четырех полюсов рабочего затухания ($P=N$) без введения каких-либо дополнительных связей между несмежными резонаторами. При этом полюсы рабочего затухания могут достаточно произвольно располагаться на частотной оси, обеспечивая требуемые уровни затухания в заданных полосах заграждения.

Базовые гребенчатые секции

На рис. 1а-с представлены симметричные четвертьволновые гребенчатые секции, каждая из которых выполнена на основе трехступенчатой (то есть нерегулярной) системы связанных МПЛ. В этой системе возбуждается, как известно, две волны четного ($0e$) и нечетного ($0o$) типов, для которых характерно неравенство фазовых скоростей $v_{0e} < v_{0o}$, обуслов-

ленное неоднородностью среды (подложка – воздух). Таким образом, каждая ступень связанных МПЛ характеризуется своими волновыми параметрами и коэффициентом электромагнитной связи. Совокупность этих параметров является достаточной для управления как шириной полосы пропускания, так и взаимным расположением полюсов затухания относительно полосы пропускания. На рис. 1д представлены частотные зависимости рабочего затухания этих секций соответственно. При этом относительная ширина полосы пропускания для всех рассматриваемых секций задавалась одинаковой и равной 5%. Структуры выполнены на подложке толщиной $H=1$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=10$; минимальное расстояние между МПЛ $S_{\min} \geq 0,15$ мм.

Учитывая характер распределения напряжений и токов в гребенчатых структурах, можно выделить в связанных резонаторах области с преобладающей магнитной и электрической связями между ними. Так, первая ступень в области короткозамкнутых на экран резонаторов определяет магнитную связь между резонаторами, а третья ступень, где резонаторы находятся в режиме холостого хода, определяет электрическую связь. Такое пространственное разделение электромагнитных связей обеспечивает конструктивную простоту управления частотными свойствами гребенчатых секций.

В структуре, представленной на рис. 1а, преобладающей связью между резонаторами является магнитная связь, что обуславливает формирование полюсов рабочего затухания в области верхних частот. Степень расщепления полюсов рабочего затухания определяется в основном соотношением коэффициентов связи во второй и в третьей ступенях секции.

В структуре, представленной на рис. 1б, преобладающей является электрическая связь между резонаторами, что обуславливает формирование полюсов затухания в области нижних частот. Расщепление этих полюсов затухания в основном определяется соотношением коэффициентов связи в первой и во второй ступенях секции.

В структуре, представленной на рис. 1с, полюсы затухания формируются как в области нижних, так и верхних частот. Этот режим работы секции обеспечивается выбором соответствующего баланса коэффициентов связи во всех ее ступенях.

Следует отметить, что совмещение полюсов затухания за счет неправильного выбора соотношения коэффициентов связи на разных участках длины резонаторов обуславливает их вырождение.

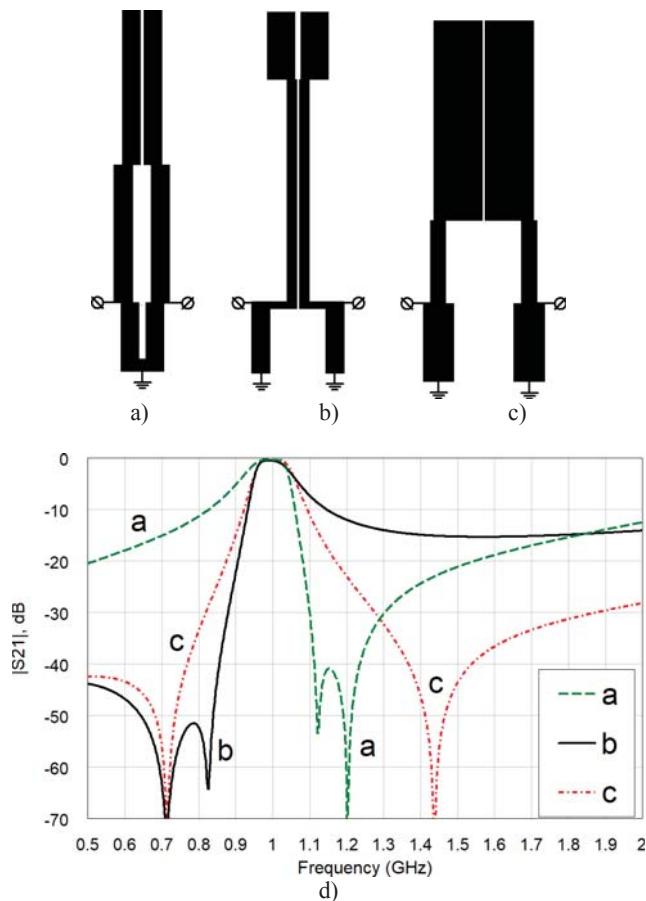


Рис. 1. Микрорешетчатые секции и их частотные характеристики

Четырехрезонаторные МПФ на основе встречно-гребенчатых структур

Исследуем четырехрезонаторную встречно-гребенчатую структуру, в которой двухрезонаторные секции электромагнитно связаны между собой (рис. 2а). Как видим, эта структура обладает (рис. 2б) повышенной крутизной рабочего затухания в области верхних частот. При этом характер частотной зависимости $|S_{21}|$ свидетельствует о том, что в этой области частот формируются полюсы рабочего затухания, но они являются вырожденными, так как эта структура не обладает достаточным числом степеней свободы для их расщепления.

Снять это ограничение в формировании и расщеплении полюсов рабочего затухания удастся за счет введения дополнительной гальванической связи между центральными резонаторами.

На рисунке 3а приведена топология такой структуры, в средней ступени которой образован дополнительный (пятый) отрезок МПЛ, связывающий две гребенчатые секции.

По существу, в этой компактной структуре реализовано два способа наращивания порядка фильтров: за счет электромагнитного взаимодействия между резонаторами и каскадного соединения отдельных звеньев (секций). В структуре формируется четыре ($P = N$) полюса рабочего затухания на конечных частотах, что обеспечивает повышенную частотную избирательность МПФ в области нижних частот (рис. 3с). Минимальные расстояния между МПЛ и максимальная ширина проводников равны $S_{\min} = 1,05$ мм и $W_{\max} = 3$ мм соответственно.

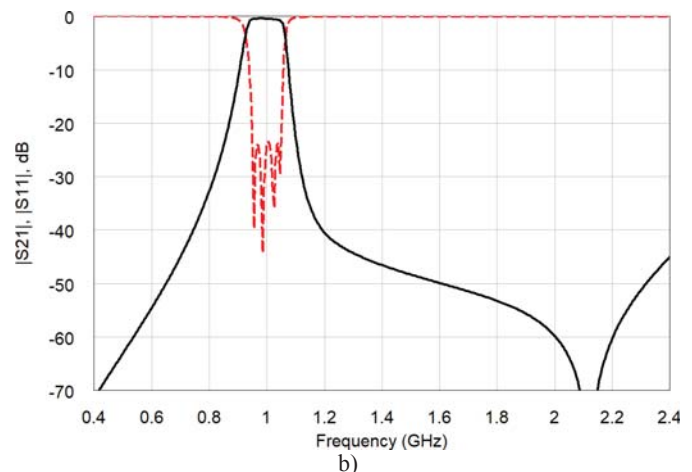
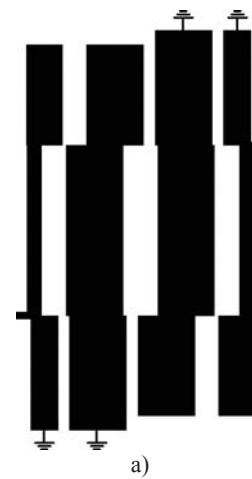
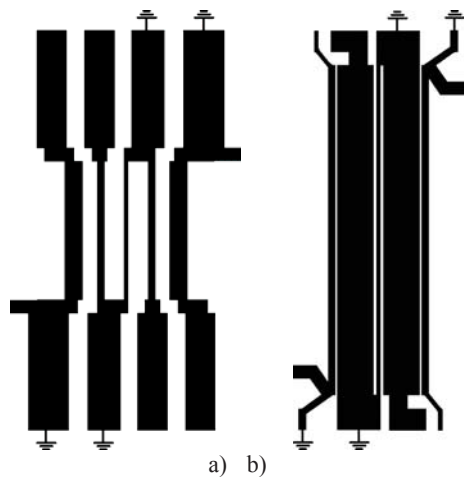


Рис. 2. Встречно-гребенчатая структура и частотные зависимости ее S-параметров

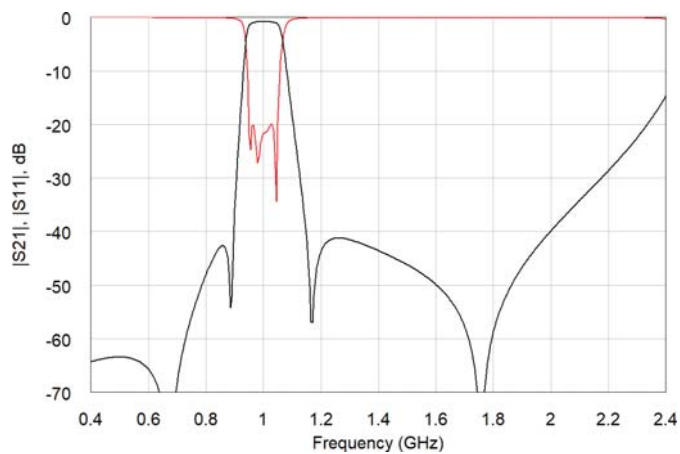
Перераспределим полюсы затухания на частотной оси с целью существенного повышения крутизны рабочего затухания в области верхних частот (рис. 3д). В этом случае сформируем один полюс затухания в области нижних и три – в области верхних частот.

Это достигается за счет уменьшения магнитной связи между МПЛ в каждой гребенчатой секции и усиления электромагнитного взаимодействия между гребенчатыми секциями (рис. 3б). Минимальные расстояния между МПЛ и максимальная ширина проводников равны $S_{\min} = 0,15$ мм и $W_{\max} = 3,3$ мм соответственно. Возможны и другие варианты распределения полюсов рабочего затухания на конечных частотах.

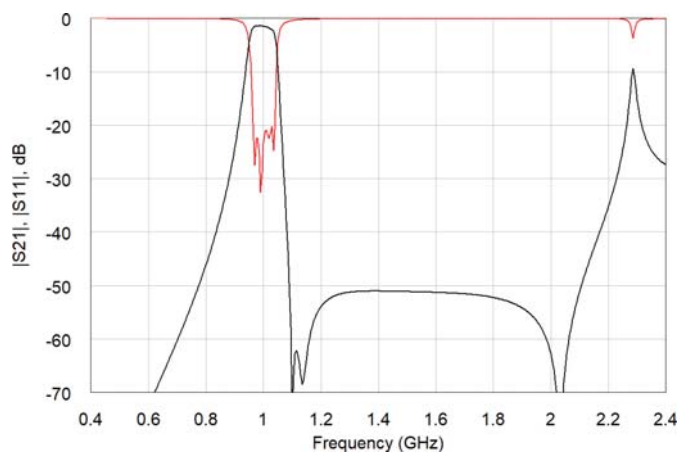
Важной особенностью рассматриваемых структур является высокое значение их характеристического сопротивления. Это обеспечивает возможность их реализации на подложках с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_r \approx 100$ без введения каких-либо дополнительных цепей согласования.



a) b)



c)



d)

Рис. 3. Встречно-гребенчатые структуры с квазисимметричной частотной характеристикой (а, с) и с повышенной односторонней частотной избирательностью (b, d)

Заключение

Рациональное сочетание в четвертьволновых встречно-гребенчатых структурах электромагнитного взаимодействия и гальванической связи между гребенчатыми секциями позволяет сформировать четыре полюса рабочего затухания на конечных частотах. Их заданное расположение на частотной оси достигается выбором степени неуравновешенности электромагнитных связей на разных участках длины резонаторов. Это открывает новые возможности в создании высокоизбирательных МПФ на основе компактных 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. 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.
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. Роудз Дж. Д. Теория электрических фильтров. М.: Сов. радио, 1980. 240 с.
6. Аристархов Г.М., Чернышев В.П. А.с. 1026203 СССР, МПК Н01Р 1/205. Микрополосковый фильтр на встречных стрержнях. Оpubл. 1983. Бюл. № 24.
7. Владимиров В.М., Марков В.В., Петров Д.В., Шепов В.Н. Трехдиапазонный малошумящий усилитель для активной антенны высокоточного позиционирования по сигналам ГЛОНАСС/GPS // Радиотехника. 2013. № 6. С. 012-017.