

**ВЫСОКОИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ ЧЕТЫРЕХРЕЗОНАТОРНЫЕ
МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ С «РОКИРОВКОЙ»
ПОЛЮСОВ РАБОЧЕГО ЗАТУХАНИЯ**

© 2017 г. Г.М. АРИСТАРХОВ, Н.В. ЗВЕЗДИНОВ

Московский технический университет связи и информатики
e-mail: g.aristarkhov2010@yandex.ru nikitazvezdinov@mail.ru

Микрополосковые фильтры (МПФ) на полуволновых шпилечных резонаторах находят самое широкое применение в технике СВЧ, так как они являются одними из наиболее компактных структур и не содержат короткозамкнутых на экран элементов, что определяет их высокую технологичность и возможность реализации в широком диапазоне частот. Вместе с тем, все возрастающие требования, предъявляемые к частотной избирательности МПФ, их габаритам и технологичности конструкций, обуславливают необходимость поиска более компактных структур, в которых повышение частотной избирательности достигалось бы не путем увеличения количества резонаторов в МПФ, а за счет формирования полюсов рабочего затухания на конечных частотах. В настоящее время в этой области достигнуты значительные успехи. Принципы построения таких МПФ разнообразны и основаны на: формировании дополнительных электромагнитных связей между несмежными резонаторами [1-3]; рациональном использовании эффекта неравенства фазовых скоростей нормальных волн в системах связанных микрополосковых линий (МПЛ) [4], а также свойств многомодовых резонаторов [5]. Однако потенциальные селективные возможности этих структур существенно ограничены, так как число формируемых в них полюсов рабочего затухания обычно не превышает числа резонаторов N в МПФ.

Новые возможности в решении этой задачи открываются в связи с применением в составе МПФ компактных одно- и двухрезонаторных структур, в которых число формируемых полюсов рабочего затухания в три и более раза превышает количество резонаторов [6, 7]. Это уникальное свойство одно- и двухрезонаторных СВЧ цепи приобретают вследствие совместного использования в этих структурах эффекта неравенства фазовых скоростей нормальных волн в системах связанных МПЛ, реализации определенной степени неуравновешенности электромагнитных связей на разных участках длины смежных МПЛ, эффекта смыкания основной и паразитной полос пропускания, а также приема «рокировки» полюсов рабочего затухания. Однако вопрос об эффективности применения этого подхода при построении МПФ более высокого порядка остается открытым.

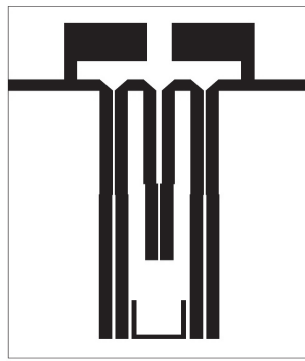
В данной работе исследуются на примере четырехрезонаторных структур потенциальные селективные возможности многорезонаторных МПФ с «рокировкой» полюсов рабочего затухания.

Эффективность развиваемого в данной работе подхода к созданию высокоизбирательных МПФ с ограниченным числом резонаторов проиллюстрируем на основе сравнительного анализа электрических параметров четырехрезонаторных структур на сонаправленных шпилечных резонаторах, выполненных без «рокировки» и с «рокировкой» полюсов рабочего затухания. Выбор этих структур обусловлен тем, что в них по сравнению со структурами с дополнительными связями между несмежными резонаторами формируется существенно большее число полюсов рабочего затухания. Кроме того, они обладают, как будет показано ниже, более высокой компактностью.

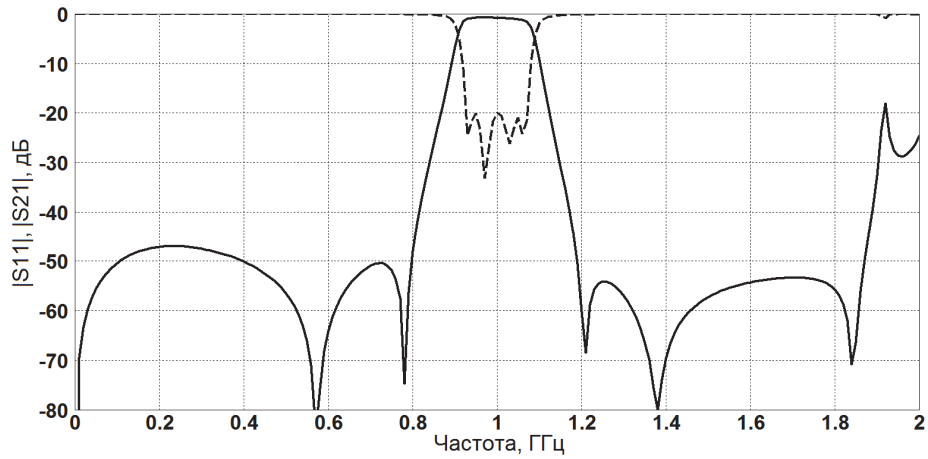
Так, в четырехрезонаторной структуре с дополнительными электромагнитными связями между несмежными резонаторами формируется только два полюса рабочего затухания $(N-2)$ [2]. При этом площадь подложки, занимаемая этой структурой, составляет порядка $0,0625\lambda^2$, где λ -длина квази Т-волны на центральной частоте полосы пропускания. В четырехрезонаторных структурах, в которых применяются решетчатые четвертьволновые секции и дополнительные параллельные электромагнитные связи между несмежными резонаторами, формируется пять полюсов рабочего затухания $(N+1)$ [8]. Однако площадь подложки, занимаемая этой структурой, составляет более $0,25\lambda^2$.

Исследуемые структуры МПФ представлены на рис. 1 и 2 соответственно. Симметричная структура МПФ без «рокировки» полюсов рабочего затухания (рис. 1) образована тремя четвертьволновыми решетчатыми секциями, в двух крайних из них доминирующей связью является магнитная связь между их смежными МПЛ, а в центральной решетчатой секции доминирующей является электрическая связь между ее МПЛ. Таким образом, крайние решетчатые секции формируют полюсы затухания в области нижних частот и их расщепление обеспечивается магнитной связью между этими решетчатыми секциями. Частичная компенсация этой связи может быть обеспечена дополнительной электрической связью между ними за счет введения отрезка линии передачи (нижний участок топологии, рис.1, а). Этим достигается требуемое распределение на частотной оси чрезмерно расщепленных за счет магнитной связи полюсов рабочего затухания. Центральная решетчатая секция формирует в области верхних частот близлежащий к полосе пропускания полюс рабочего затухания. Расщепление полюсов затухания, формируемых в области верхних частот Т-сочленениями, достигается незначительной электрической связью между несмежными резонаторами. При отсутствии этой связи полюсы затухания, формируемые Т-сочленениями, совпадают и вырождаются. При значительном усилении этой связи, полюсы затухания чрезмерно расщепляются и перемежаются с полюсами затухания, формируемыми центральной решетчатой секцией, что также обуславливает их вырождение. Таким образом, для формирования в многосвязанной структуре «ярких» полюсов затухания необходимо определенным образом распределить их на частотной оси. В данной реализации в четырехрезонаторном МПФ формируется пять расщепленных полюсов рабочего затухания $(N+1)$. При этом площадь подложки, занимаемая этой структурой, составляет порядка $0,06\lambda^2$.

Увеличим число формируемых полюсов рабочего затухания в четырехрезонаторной структуре, применив прием их «рокировки». На рис. 2 представлен один из вариантов структуры, схематическую основу которой составляет трехрезонаторный МПФ на сонаправленных полуволновых шпилечных резонаторах с дополнительным четвертым полуволновым резонатором, параллельно подключенным к центральному резонатору исходной структуры (структура типа «вертолет»). Именно этот резонатор формирует два полюса рабочего затухания, которые расположены вблизи полосы пропускания справа и слева от нее (рис. 2,б). Симметричное расположение этих полюсов затухания относительно полосы пропускания обеспечивается выбором электрической и магнитной связей между плечами этого резонатора. Т-сочленения формируют полюсы затухания в области нижних частот и степень их расщепления обеспечивается выбором магнитной связи между плечами крайних резонаторов структуры. Частичная компенсация этой магнитной связи осуществляется электрической связью между шлейфами Т-сочленений. При этом слабая электрическая связь способствует расщеплению полюсов затухания, формируемых Т-сочленениями в области верхних частот. Решетчатые секции с преобладающей электрической связью между МПЛ формируют полюсы затухания в области верхних частот. Их расщепление обеспечивается электрической связью между плечами центрального резонатора. Минимальное расстояние между связанными МПЛ структуры составляет 0,1 мм, что легко реализуемо в рамках любой из тонкопленочных технологий.

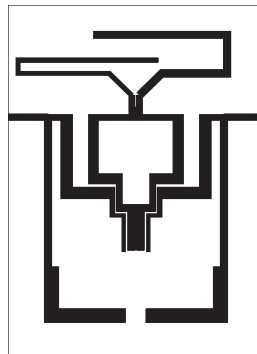


а)

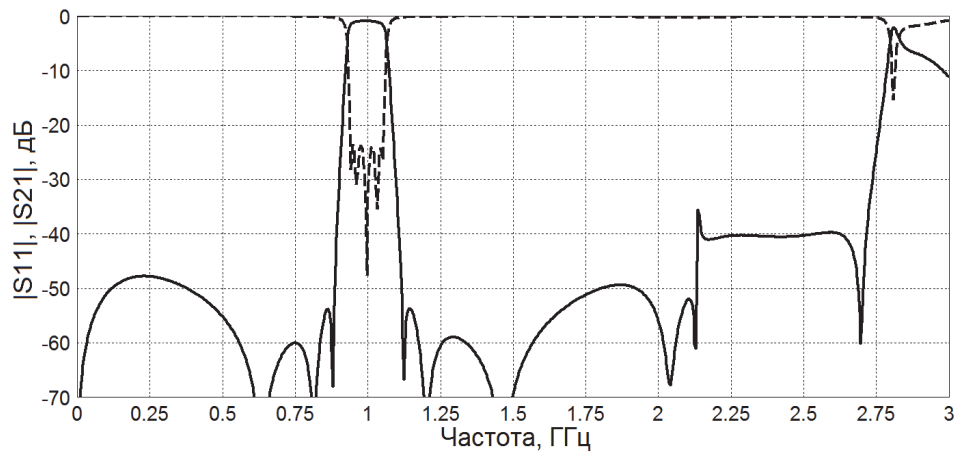


б)

Рис. 1. Четырехрезонаторный МПФ и его частотные характеристики.



а)



б)

Рис. 2. Четырехрезонаторная структура типа «вертолет» и её частотные характеристики.

Общее число формируемых полюсов рабочего затухания в структуре МПФ типа «вертолет» равно $2N+1$, а число нулей рабочего затухания $N+1$. При этом площадь подложки, занимаемая структурой, составляет порядка $0,06\lambda^2$.

Сравнительный анализ рассмотренных четырехрезонаторных структур показывает, что при прочих равных условиях МПФ с «рокировкой» полюсов рабочего затухания существенно превосходит их как по крутизне АЧХ в ее переходных областях и по уровням затухания в полосах заграждения, так и по компактности структуры.

Таким образом, в структурах МПФ с существенно ограниченным числом резонаторов возможно формирование значительного числа полюсов рабочего затухания на конечных частотах, что обеспечивает повышенную частотную избирательность этих структур. Это достигается совместным использованием различных волновых особенностей микрополосковых структур и схемотехнических способов управления волновыми процессами в этих структурах. К ним следует отнести использование эффекта неравенства фазовых скоростей нормальных волн в многорезонаторных системах связанных ПМЛ, задание определенной степени неуравновешенности электромагнитных связей на разных участках длины как между смежными МПЛ, так и не смежными резонаторами, а также использование приема «рокировки» полюсов рабочего затухания. При проектировании такого типа многосвязанных структур необходимо особое внимание обращать на распределение полюсов рабочего затухания на частотной оси, так как их совмещение и тем более перемежение обуславливает их вырождение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Роудз Дж. Д. Теория электрических фильтров. – М.: Советское Радио, 1980. - 240 с.
2. Lancaster J.M., Hong J.-S. Theory and experiment of novel microstrip slow-wave open-loop resonator filters // IEEE Trans. MTT – 1997, vol. 45, № 12, p. 2358-2365.
3. Захаров А.В., Ильченко М.Е., Трубаров И.В. Планарные трехрезонаторные полосно-пропускающие фильтры с перекрестной связью. // Радиотехника и электроника. – 2017, т. 62, № 2, с. 187-195.
4. 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.
5. Беляев Б.А., Ходенков С.А., Галеев Р.Г. Шабанов В.Ф. Исследование микрополосковых конструкций широкополосных полосно-пропускающих фильтров. // Доклады академии наук. – 2015, т. 461, №1, с. 27-33.
6. Аристархов Г.М., Звездинов Н.В. Селективные свойства микрополосковой секции на двух сонаправленных шпилечных резонаторах с неуравновешенными электромагнитными связями // Антенны. 2016. №2. С. 76-82.
7. Аристархов Г.М., Звездинов Н.В. Высокоизбирательные одно- и двухрезонаторные микрополосковые фильтры // Радиотехника и электроника. – 2017, т. 62. № 8, с. 819-824.
8. Hsu C.-L., Kuo J.-T. Microstrip Realization of Trisection Synthesis with Frequency-Dependent Admittance Inverter // Progress in Electromagnetics Research, 2011, Vol. 113, p. 195-210.