

МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФИЛЬТРЫ НА СОНАПРАВЛЕННЫХ ШПИЛЕЧНЫХ РЕЗОНАТОРАХ С РАСЩЕПЛЕННЫМИ ПОЛЮСАМИ РАБОЧЕГО ЗАТУХАНИЯ

Кириллов Игорь Николаевич

МТУСИ, аспирант кафедры «Электроника», Москва, Россия

Аристархов Григорий Маркович

МТУСИ, д.т.н., профессор, зав. кафедры «Электроника», Москва, Россия

Медведева Варвара Сергеевна

МТУСИ, Москва, Россия

Шигонцев Алексей Германович

МТУСИ, Москва, Россия

g.aristarkhov2010@yandex.ru

Аннотация

Исследуются потенциальные селективные возможности различных структур микрополосковых фильтров с ограниченным числом полуволновых сонаправленных шпилечных резонаторов. Показано, что в данных структурах возможна реализация значительного числа полюсов рабочего затухания на конечных частотах. Исследованы механизмы формирования, расщепления и смыкания полюсов затухания с целью обеспечения требуемого уровня затухания в заданных полосах заграждения.

Ключевые слова

Микрополосковый фильтр, сонаправленные шпилечные резонаторы, решетчатая секция, гальваническое примыкание, электромагнитное взаимодействие, полюсы рабочего затухания.

Введение

Микрополосковые фильтры (МПФ) на полуволновых резонаторах находят широкое применение в СВЧ-технике, так как они являются наиболее технологичными, поскольку не содержат короткозамкнутых на экран элементов [1, 2]. Это обеспечивает возможность применения этих МПФ в широком диапазоне частот, включая и миллиметровый диапазон длин волн. Повышение частотной избирательности этих структур достигается формированием в них полюсов рабочего затухания на конечных частотах. Известно множество подходов к решению этой задачи, среди которых необходимо выделить структуры, в которых формируется значительное число полюсов затухания без введения дополнительных режекторных звеньев. К ним в первую очередь следует отнести структуры на полуволновых шпилечных резонаторах с дополнительной кросс-связью между несмежными резонаторами [3, 4] и структуры на сонаправленных шпилечных резонаторах, принцип действия которых основан на эффекте неравенства фазовых скоростей нормальных волн в системах связанных микрополосковых линий (МПЛ) [5]. Как показано в [6], в этих структурах возможно формирование при том же числе резонаторов большего числа полюсов рабочего затухания.

Целью данной работы является исследование потенциальных селективных возможностей структур с ограниченным числом сонаправленных шпилечных резонаторов при различном распределении полюсов рабочего затухания на конечных частотах.

Четырехрезонаторные структуры МПФ

Четырехрезонаторные структуры (рис. 1а) представляют собой в первом приближении каскадное соединение трех четвертьволновых решетчатых секций (рис. 1б) и двух Т-сочленений (рис. 1в). Каждый из этих уединенных базовых элементов формирует свой полюс затухания. В полосно-пропускающей решетчатой секции в зависимости от того, какая связь между микрополосковыми линиями (МПЛ) является преобладающей (магнитная или электрическая), может формироваться полюс затухания или в области нижних, или в области верхних частот соответственно [5, 6]. Т-сочленения выполняют функцию трансформаторов сопротивлений и одновременно являются полосно-заграждающими звеньями. Таким образом, в рассматриваемых полосно-пропускающих структурах потенциально возможно формирование не менее пяти полюсов рабочего затухания ($P \geq N+1$).

Однако электромагнитное взаимодействие между этими базовыми звеньями может обуславливать или расщепление, или совмещение, или перемежение их полюсов затухания. При совмещении и перемежении отдельных полюсов затухания они вырождаются, что приводит к существенному ухудшению частотной избирательности МПФ.

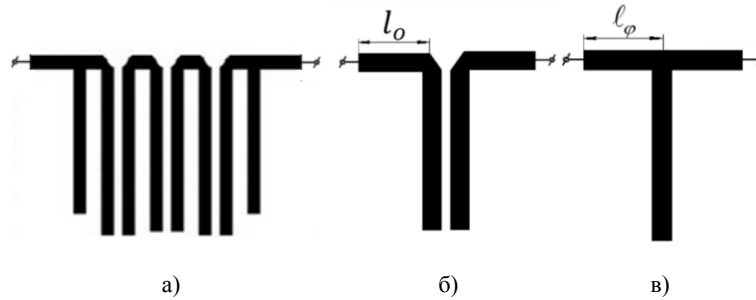


Рис. 1. Четырехрезонаторный МПФ и его базовые элементы

Исследуем условия, при которых полюсы затухания не вырождаются при различном их распределении на частотной оси.

Для определенности будут рассмотрены структуры, реализованные на подложке толщиной $H=1$ мм и с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=10$.

На рисунке 2а представлена симметричная структура, у которой все три решетчатые секции формируют полюсы затухания в области нижних частот (рис. 2б).

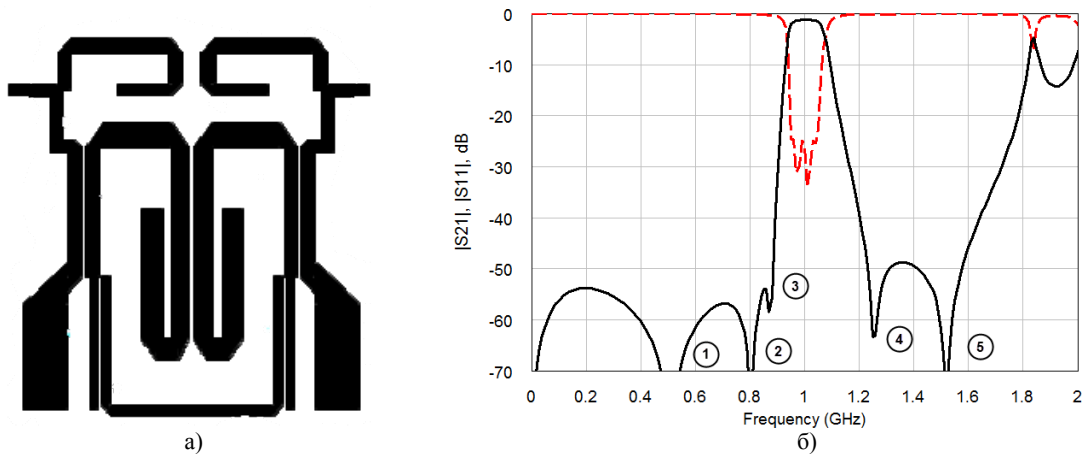


Рис. 2. Четырехрезонаторный МПФ с преобладающей магнитной связью в решетчатых секциях

Такое распределение полюсов затухания достигается тем, что во всех решетчатых секциях реализовано условие преобладающей магнитной связи между МПЛ. Центральная решетчатая секция формирует близлежащий к полосе пропускания полюс затухания №3, обеспечивая высокую крутизну рабочего затухания в его переходной области. Одинаковые крайние решетчатые секции формируют расщепленные полюсы затухания №1 и №2. Чрезмерное их расщепление за счет преобладающего магнитного взаимодействия между секциями частично скомпенсировано дополнительной электрической связью между ними, которая реализуется посредством перемычки (нижний участок топологии на рис. 2а). При отсутствии этой связи полюсы затухания №2 и №3 перемежаются и оба вырождаются. Одинаковые Т-сочленения формируют полюсы затухания в области верхних частот. Их расщепление достигается введением незначительной электрической связи между шлейфами Т-сочленений (верхний участок топологии). В рассматриваемой структуре МПФ минимальная ширина зазора между связанными МПЛ составляет $S_{\min}/H=0.15$. Площадь подложки, занимаемая топологией структуры, равна $A \times B = 29 \times 32$ мм², т.е. $0.069\lambda^2$, где λ – длина волны на центральной частоте полосы пропускания МПФ.

Рассмотрим второй вариант несимметричной структуры МПФ (рис. 3), в которой расщепление полюсов затухания, формируемых Т-сочленениями, достигается выбором различных электрических длин шлейфов Т-сочленений.

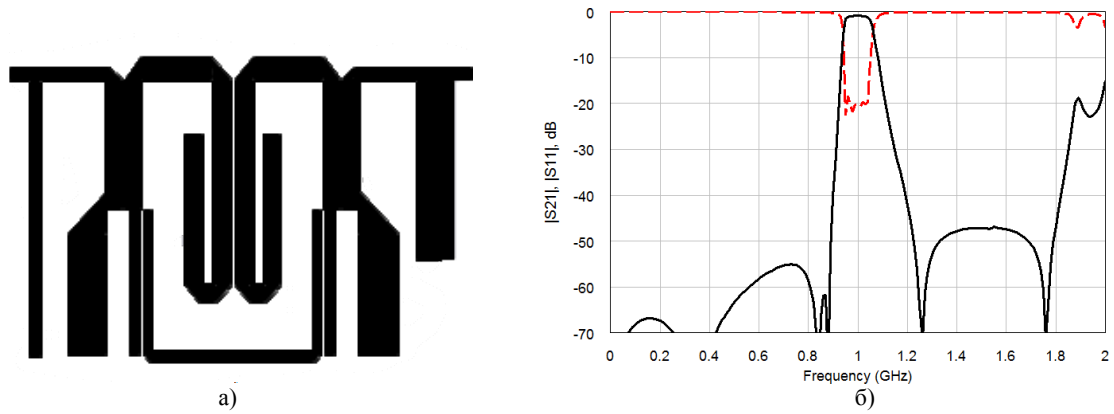


Рис. 3. Несимметричная структура четырехрезонаторного МПФ с преобладающей магнитной связью в решетчатых секциях

В этом случае площадь подложки, занимаемая топологией МПФ, составляет $A \times B = 33 \times 25 \text{ мм}^2$, т.е. $0.061\lambda^2$. В этой структуре обеспечивается формирование дополнительных полюсов затухания. Достигнутое при этом сужение топологии структуры способствует предотвращению возбуждения в ней волн высших типов.

На рисунках 4 и 5 представлены аналогичные структуры, в которых центральная решетчатая секция формирует полюс рабочего затухания в области верхних частот вблизи полосы пропускания. Это достигается за счет того, что в этих секциях преобладающей связью между МПЛ является электрическая связь. Ширина зазора между МПЛ в этой секции составляет $S_{\min}/H = 0.07$. Повышение крутизны рабочего затухания в области верхних частот может быть достигнуто только усилением этой связи ($S_{\min}/H < 0.05$), что предъявляет более жесткие требования к технологии изготовления МПФ. Площадь подложки, занимаемая топологией МПФ (рис. 4а), составляет $A \times B = 24 \times 42 \text{ мм}^2$, т.е. $0.075\lambda^2$. А площадь подложки, занимаемая топологией МПФ (рис. 5а), составляет $A \times B = 24 \times 33 \text{ мм}^2$, т.е. $0.059\lambda^2$.

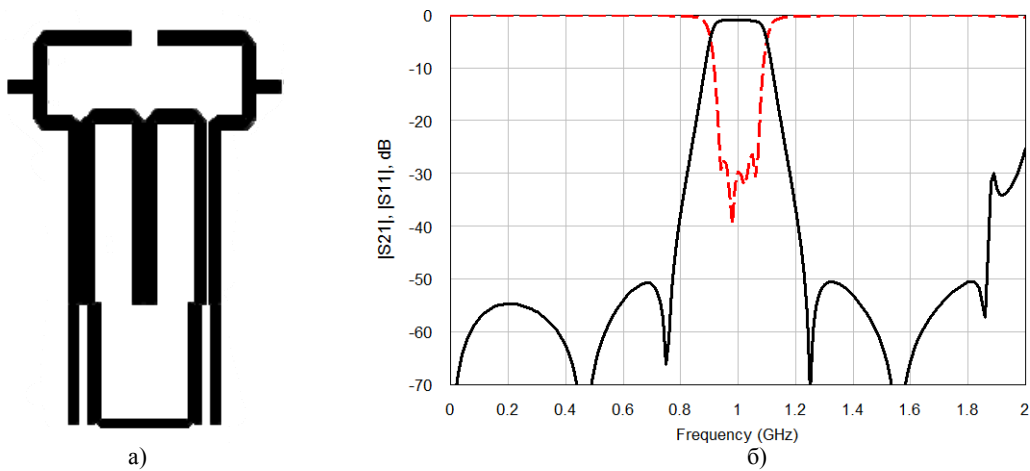


Рис. 4. Симметричная структура МПФ с преобладающей электрической связью в центральной решетчатой секции

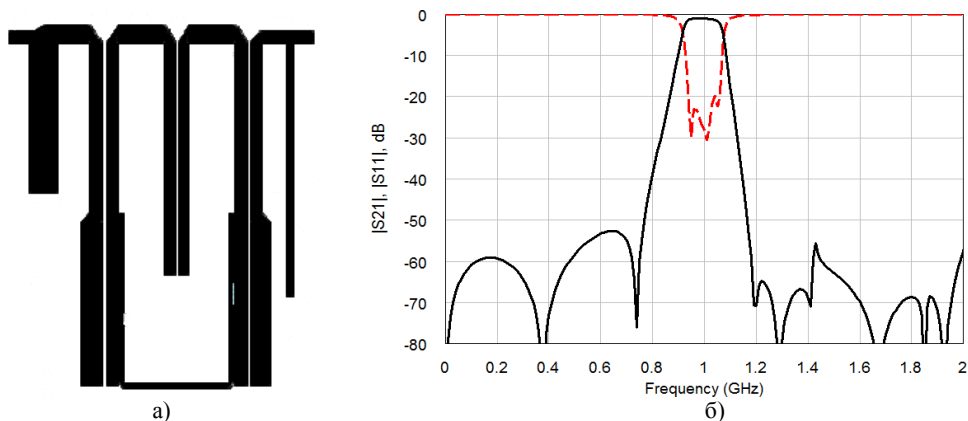


Рис. 5. Несимметричная структура МПФ с преобладающей электрической связью в центральной решетчатой секции

Прием гальванического примыкания двухрезонаторных секций

При гальваническом примыкании двухрезонаторных секций в четырехрезонаторной структуре центральная решетчатая секция (рис. 5) становится шлейфом (рис. 6). При такой реализации МПФ снимаются технологические ограничения в возможности близкого расположения полюса затухания относительно полосы пропускания в области верхних частот. Площадь подложки, занимаемая топологией МПФ, составляет $A \times B = 27 \times 31 \text{ мм}^2$, т.е. $0.062\lambda^2$.

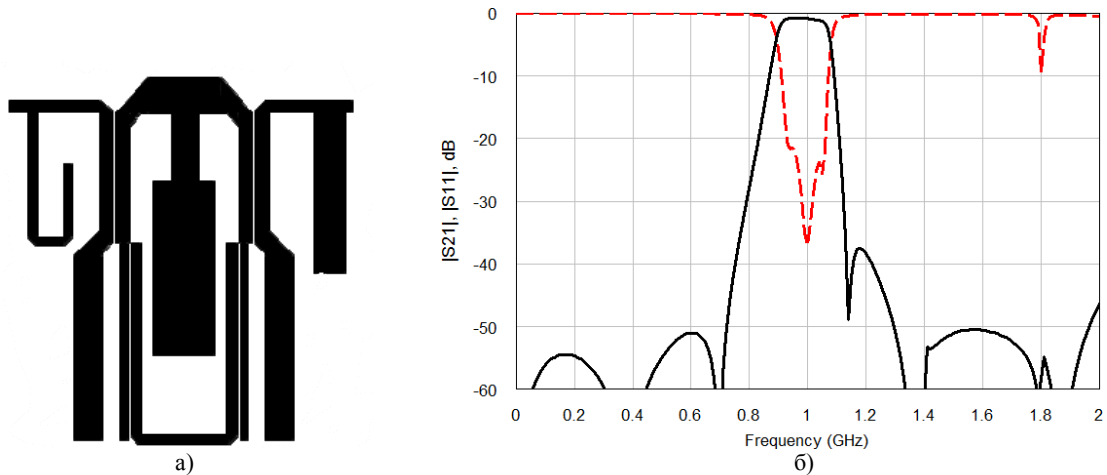


Рис. 6. Несимметричная структура МПФ на основе гальванического примыкания двухрезонаторных секций

На рисунке 7 приведена симметричная структура МПФ с гальванической связью двухрезонаторных секций. Расщепление полюсов затухания, формируемых входным и выходным Т-сочленениями, достигается введением электрической связи между шлейфами. Этот МПФ наряду с повышенной крутизной рабочего затухания в области верхних частот обеспечивает разрядку спектра паразитных полюсов пропускания. Это достигается за счет смещения вторичных полюсов затухания решетчатых секций в область второй гармоники. Минимальный зазор между связанными МПЛ для этой структуры равен $S_{\min}/H=0.4$, а площадь подложки, занимаемая топологией МПФ, составляет $A \times B = 26 \times 36 \text{ мм}^2$, т.е. $0.07\lambda^2$.

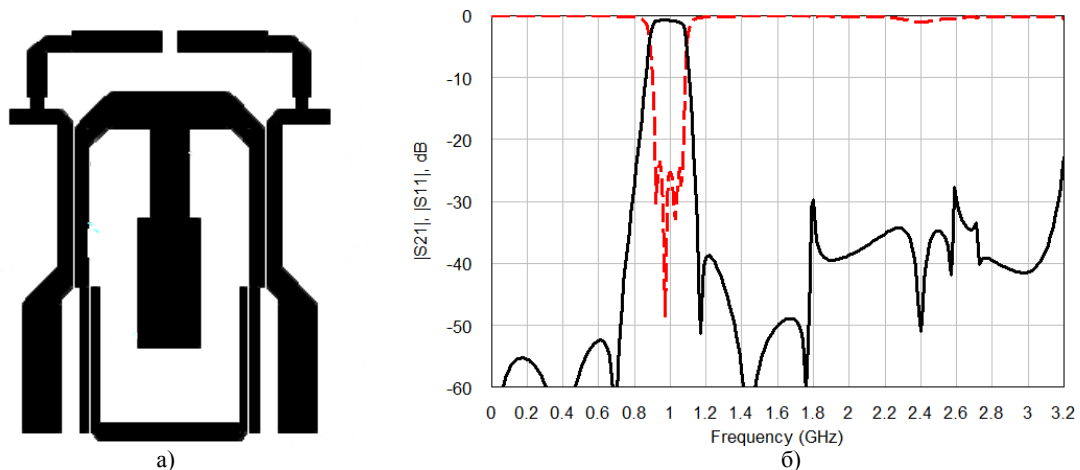


Рис. 7. Симметричная структура МПФ с разрядкой спектра паразитных полюсов пропускания

Заключение

В МПФ на полуволновых шпилечных резонаторах возможно формирование значительного числа полюсов рабочего затухания. Распределение полюсов затухания относительно полосы пропускания достигается применением схмотехнических приемов их формирования, расщепления и смыкания. В основе этих приемов лежит реализация необходимого соотношения в структурах степени электромагнитного взаимодействия как между смежными так и несмежными резонаторами.

Приведенные в данной работе различные варианты топологий МПФ служат наглядными примерами, иллюстрирующими возможности применяемых способов управления расположением полюсов затухания на конечных частотах.

Литература

1. *Маттей Д.Л., Янг Л., Джон Е.М.Т.* Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. М.: Связь, 1971, 1972. Т.1,2. 451 с., 494 с.
2. *Мазенова О.И., Мецанов В.П., Прохорова Н.И.* и др. Справочник по элементам полосковой техники / Под ред. А.Л. Фельдштейна. М.: Связь, 1979. 336 с.
3. *M. I. Lancaster and J. S. Hong*, "Theory and experiment of novel microstrip slow-wave open-loop resonator filters," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. MTT-45, pp. 2358-2365, Dec. 1997.
4. *J. G. Hong and M. J. Lancaster*, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. New York: Wiley, 2001.
5. *Аристархов Г.М., Чернышев В.П.* Косвенный синтез микрополосковых фильтров на сонаправленных шпилечных резонаторах с полюсами затухания на конечных частотах // *Радиотехника и электроника*. 1987. Т. 32. №6. С. 1168-1175.
6. *G. M. Aristarkhov, A. Grebennikov and N. V. Zvezdinov*, "High-Selectivity Microstrip Filters Based on Structures With a Limited Number of Hairpin Resonators [Application Notes]," // *IEEE Microwave Magazine*, vol. 20, no. 11, pp. 22-31, Nov. 2019. doi: 10.1109/MMM.2019.2935362