

# ВЫСОКОИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ГРЕБЕНЧАТЫХ СТРУКТУР С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ КРОСС-СВЯЗЬЮ

**Аринин Олег Вячеславович**

*МТУСИ, зав. лабораторией кафедры «Электроника», Москва, Россия*

**Аристархов Григорий Маркович**

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

**Ивичев Максим Павлович**

*МТУСИ, магистрант кафедры «Электроника», Москва, Россия*

[g.aristarkhov2010@yandex.ru](mailto:g.aristarkhov2010@yandex.ru)

## Аннотация

Исследуются селективные возможности высокоизбирательных трех- и четырехрезонаторных микрополосковых фильтров на основе многоступенчатых гребенчатых структур с дополнительной электромагнитной кросс-связью между несмежными резонаторами. Показано влияние скачков волновых сопротивлений на различных участках длины резонаторов на формирование полюсов рабочего затухания и их расположение на частотной оси. Продемонстрированы возможности различных способов управления степенью расщепления полюсов затухания и их расположения относительно полосы пропускания.

## Ключевые слова

Микрополосковые фильтры, гребенчатая секция, многоступенчатые резонаторы, полюсы рабочего затухания, электромагнитные связи.

## Введение

Гребенчатые микрополосковые фильтры (МПФ) находят широкое применение в СВЧ-технике, так как они являются одними из наиболее компактных структур [1-4]. 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 [5]. Однако применение этого схемотехнического приёма, во-первых, усложняет конструкцию фильтров [6], а во-вторых, обуславливает формирование в N-резонаторной структуре ограниченного числа полюсов рабочего затухания, равного  $P=N-2$ . В работе [7] показано, что за счёт реализации МПФ на основе многоступенчатых гребенчатых структур возможно (при определенном выборе различных коэффициентов электромаг-

нитного взаимодействия на разных ступенях) формирование N полюсов затухания без организации дополнительных кросс-связей между несмежными резонаторами.

В данной работе исследуются возможности повышения частотной избирательности гребенчатых МПФ за счёт рационального сочетания в структурах обоих выше отмеченных способов формирования полюсов затухания.

## Трехрезонаторные многоступенчатые гребенчатые структуры с дополнительной кросс-связью

На рисунке 1 представлена симметричная четырёхступенчатая трехрезонаторная структура с дополнительной электрической кросс-связью между первым и третьим резонаторами, которая реализуется в виде перемычки (верхний участок топологии). Преобладающей связью между всеми резонаторами структуры является электрическая связь.

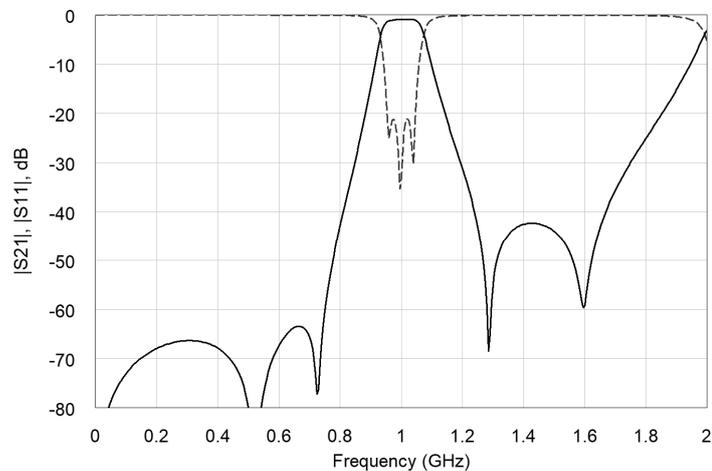
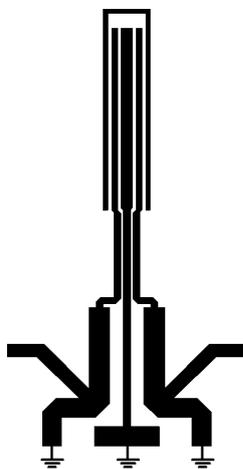


Рис. 1. Трехрезонаторный МПФ с симметричным расположением полюсов затухания

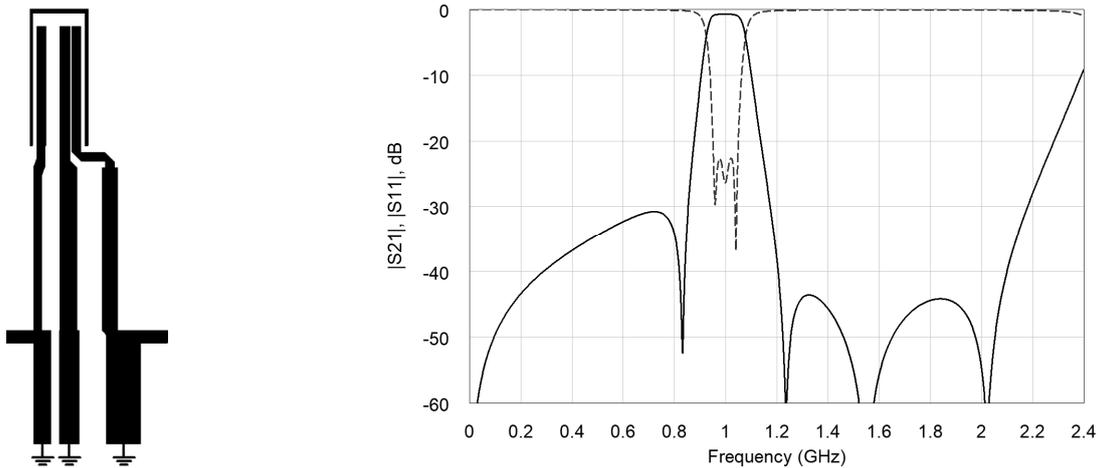


Рис. 2. Трехрезонаторный МПФ с несимметричным расположением полюсов затухания

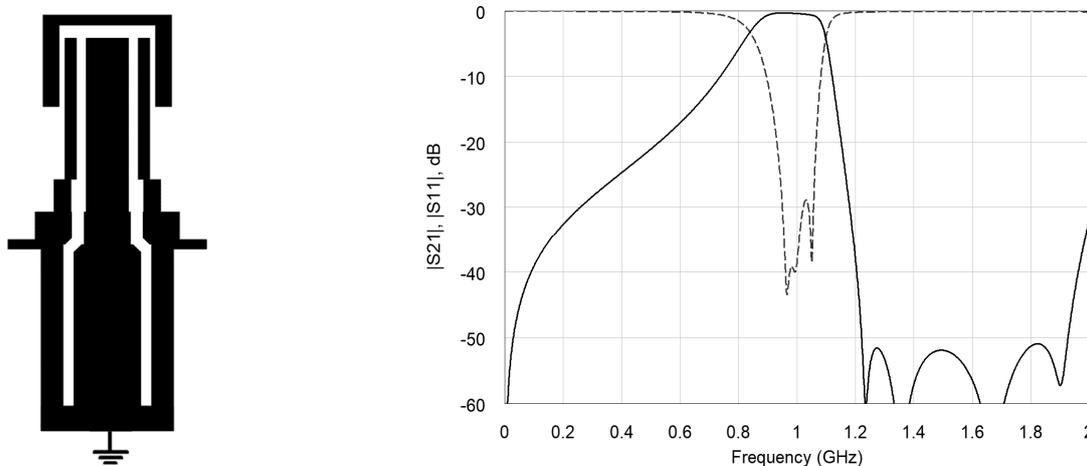


Рис. 3. Трехрезонаторный МПФ с повышенной частотной избирательностью в области верхних частот

При таком сочетании электромагнитных связей между смежными резонаторами в структуре без дополнительной кросс-связи формируется только один полюс затухания. Введение в структуру дополнительной кросс-связи обусловило формирование ещё трёх полюсов затухания. Таким образом, общее число формируемых полюсов затухания равно  $P=N+1$ . МПФ выполнен на подложке толщиной  $H=1$  мм с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r=10$ . При этом минимальная ширина зазора между МПЛ равна  $S_{\min}/H=0,15$ , а максимальная и минимальная ширины МПЛ соответственно равны:  $W_{\max}/H=4,35$ ,  $W_{\min}/H=0,3$ . Геометрические размеры топологии структуры  $A \times B=30 \times 12$  мм<sup>2</sup>, то есть  $0,0268\lambda^2$ , где  $\lambda$  длина квази-Т-волны на центральной частоте полосы пропускания.

Как показано в работе [8], при выполнении трехрезонаторного МПФ в виде несимметричной трехрезонаторной структуры в ней возможно формирование трех полюсов рабочего затухания на конечных частотах. Введение дополнительной кросс-связи (рис. 2) обуславливает формирование ещё одного полюса затухания ( $P=N+1$ ). Этот режим работы достигается тем, что между первым и вторым резонаторами преобладающей является магнитная связь,

а между вторым и третьим резонаторами - электрическая. Минимальная ширина зазора между связанными МПЛ этой структуры составляет  $S_{\min}/H=0,15$ , а максимальная и минимальная ширины МПЛ соответственно равны:  $W_{\max}/H=2,52$ ,  $W_{\min}/H=0,21$ . Толщина подложки равна  $H=1$  мм, а ее  $\epsilon_r=10$ . Геометрические размеры топологии структуры  $A \times B=33 \times 9$  мм<sup>2</sup>, то есть  $0,022\lambda^2$ .

Формирование всех полюсов рабочего затухания в области верхних частот достигается за счет реализации преобладающей магнитной связи между всеми резонаторами (рис. 3). В данной структуре для увеличения зазора между связанными МПЛ  $S_{\min}/H=0,28$  (с целью обеспечения более высокой технологичности МПФ) введена дополнительная перемычка (нижний участок топологии), что эквивалентно усилению магнитной связи между резонаторами. Структура реализована на подложке толщиной  $H=1$  мм с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r=80$ . Геометрические размеры топологии структуры равны  $A \times B=4 \times 12,62$  мм<sup>2</sup>, то есть  $0,028\lambda^2$ .

Таким образом, в трехрезонаторных многоступенчатых структурах с дополнительной кросс-связью возможно формирование четырёх полюсов затухания. Их расположение относительно полосы

пропускания определяется реализацией определенного баланса электромагнитных связей между резонаторами на разных участках их длины.

#### Четырехрезонаторные структуры

Повысим порядок гребенчатых фильтров и исследуем условия формирования полюсов рабочего затухания при различном их расположении относительно полосы пропускания.

На рис. 4 представлена симметричная четырехрезонаторная структура, в которой между первым и вторым четвертьволновыми резонаторами и соответственно между третьим и четвертым преобладающей является электрическая связь, а между вторым и третьим – магнитная. В этом случае формируется пять ( $P=N+1$ ) полюсов рабочего затухания, два из которых расположены в области нижних частот вблизи полосы пропускания, обеспечивая высокую крутизну рабочего затухания в его переходной области. МПФ реализован на подложке толщиной  $H=1$  мм с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r=10$ . Минимальная ширина зазора между связанными МПЛ составляет  $S_{min}/H=0,17$ . Геометрические размеры топологии структуры  $A \times B=29 \times 11$  мм<sup>2</sup>, то есть  $0,0237\lambda^2$ .

На рис. 5 представлена симметричная четырехрезонаторная структура, в которой формируется один полюс в области нижних частот и пять полюсов рабочего затухания в области верхних частот ( $P=N+2$ ). Такой режим работы МПФ обеспечивается тем, что между первым и вторым и соответственно между третьим и четвертым резонаторами преобладающей связью является магнитная связь. Усиление этой связи достигается введением перемычек между соответствующими резонаторами (нижняя часть топологии). При этом между вторым и третьим резонаторами преобладающей связью является электрическая связь. Минимальное расстояние между связанными МПЛ составляет  $S_{min}/H=0,11$ . Геометрические размеры топологии структуры  $A \times B=34 \times 16$  мм<sup>2</sup>, то есть  $0,0404\lambda^2$ . Отличительной особенностью этой структуры является то, что в ней обеспечивается разрядка спектра паразитных полос пропускания.

Повышенная крутизна частотной характеристики МПФ в области верхних частот достигается формированием всех полюсов рабочего затухания в этой области. Это обеспечивается в структуре, в которой преобладающей является магнитная связь между всеми резонаторами. Реализация сильной магнитной связи между резонаторами достигается за счет введения перемычки между ними (рис. 6, нижний участок топологии). Расщепление и распределение на частотной оси полюсов затухания обеспечивается выбором степени электромагнитного взаимодействия на средней ступени структуры. МПФ реализован на подложке толщиной  $H=1$  мм с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r=10$ . При этом минимальная ширина зазора между МПЛ  $S_{min}/H=0,24$ . Геометрические размеры топологии структуры  $A \times B=33 \times 13$  мм<sup>2</sup>, то есть  $0,0319\lambda^2$ .

#### Заключение

В многоступенчатых  $N$  резонаторных гребенчатых структурах с дополнительной кросс-связью возможно формирование не менее  $N+1$  полюсов рабочего затухания. Их расположение относительно полосы пропускания определяется тем, какая из электромагнитных связей (магнитная или электрическая) является преобладающей. Расщепление полюсов затухания с целью заданного их распределения на частотной оси обеспечивается выбором степени электромагнитного взаимодействия между резонаторами на средней их ступени, а также электрической связью между несмежными резонаторами. Следует отметить, что нарушение баланса электромагнитных связей между резонаторами на разных участках их длины может приводить к совмещению или перемежению отдельных полюсов затухания, что обуславливает их вырождение и ухудшение частотной избирательности МПФ.

Рассмотренные структуры МПФ с ограниченным числом резонаторов обладают повышенной частотной избирательностью и компактностью и реализуют различные типы частотных характеристик.

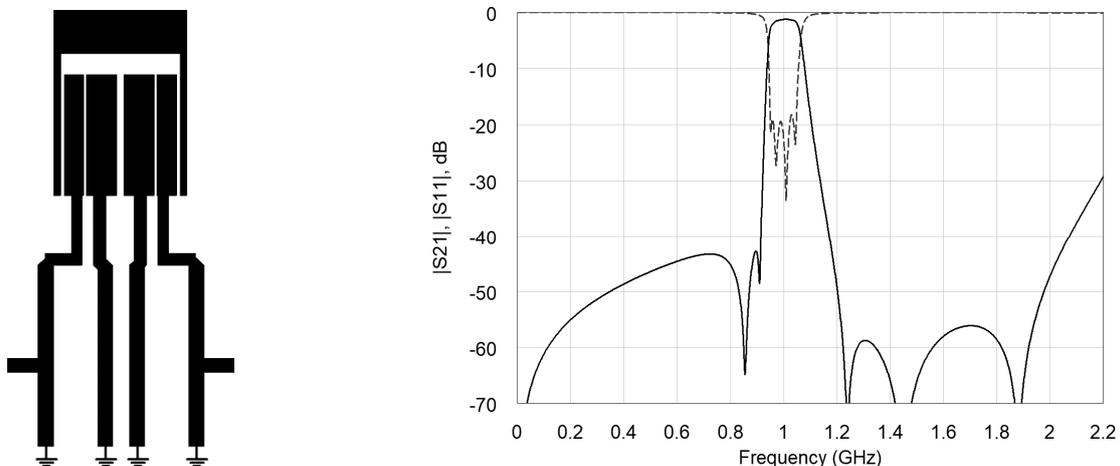


Рис. 4. МПФ с повышенной крутизной рабочего затухания в области нижних частот

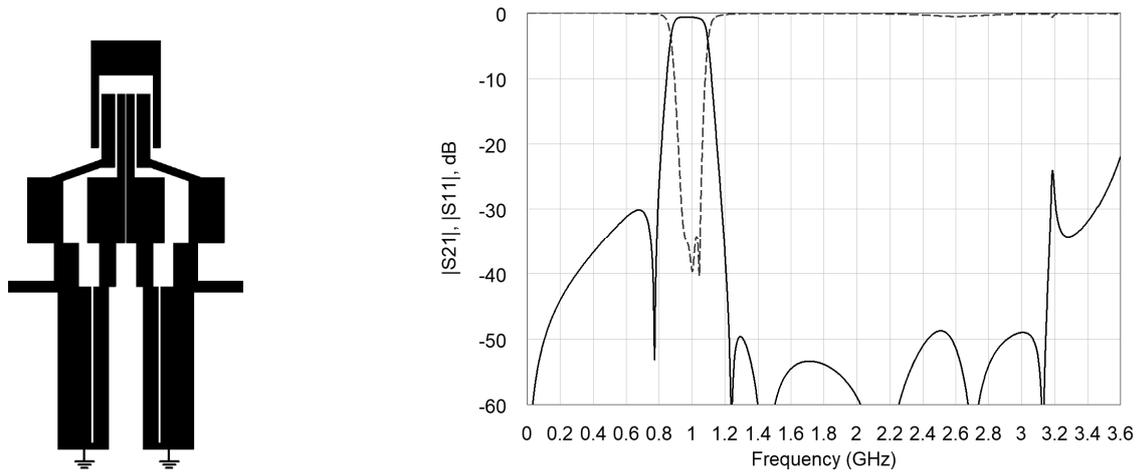


Рис. 5. МПФ с разрядкой спектра паразитных полос пропускания

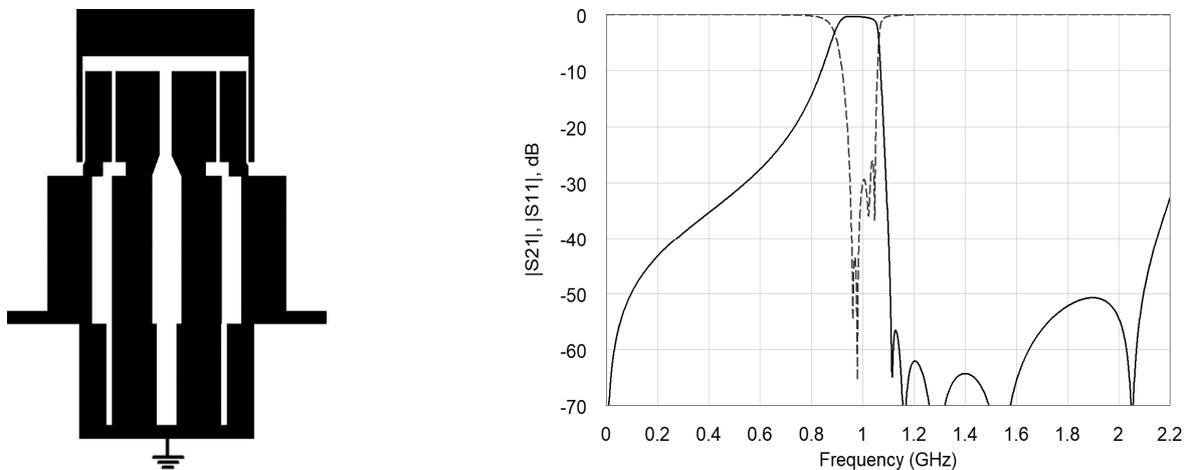


Рис. 6. МПФ с повышенной частотной избирательностью в области верхних частот

### Литература

1. Matthaei G.L., Young L. and Jones E.M. T., *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures* (McGraw-Hill, New York, 1964; Svyaz', Moscow, 1971).
2. Rhodes J.D. The stepped digital elliptic filter // *IEEE Trans. MTT*, 1969, Vol. MTT-17. №4, pp. 178-184.
3. Mazepova O.I., Meshchanov V.P., and Prokhorova N.I. *Handbook on Components of Stripline Technology*, Ed. by A.L. Fel'dshtein (Svyaz', Moscow, 1979) (in Russian).
4. Makimoto M. and Yamashita S. Compact bandpass filters using stepped impedance resonators // *Proc. IEEE*, vol. 67, 1979, pp. 16-19.
5. Rhodes J.D. *Theory of electrical filters*, New York, Wiley, 1976.
6. Zakharov A.V., Il'chenko M.E., Trubarov I.V. Planar three-resonator bandpass filters with cross coupling // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2017. T. 62. № 2, pp. 185-193.
7. 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. doi: 10.1109/SOSG.2018.8350569 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8350569>
8. Aristarkhov G.M., Arinin O.V. and Kirillov I.N. Microstrip filters based on counter-comb structures with additional galvanic connection // *2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Minsk, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456933 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8456933>