

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

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.

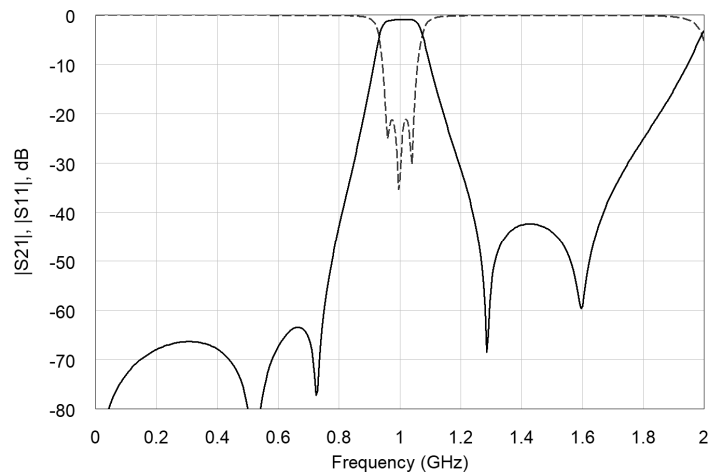
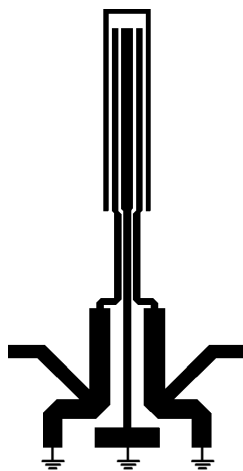


Рис. 1. Трехрезонаторный МПФ с симметричным расположением полюсов затухания

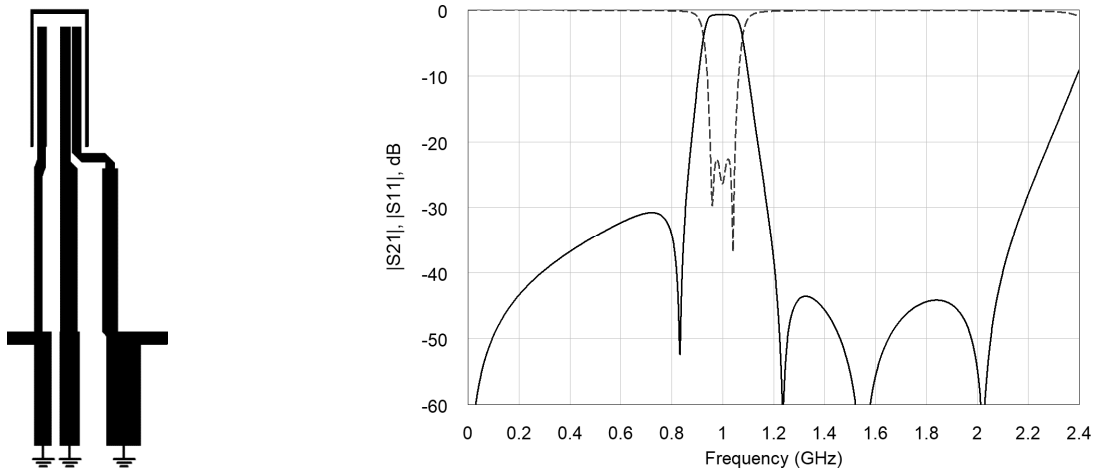


Рис. 2. Трехрезонаторный МПФ с несимметричным расположением полюсов затухания

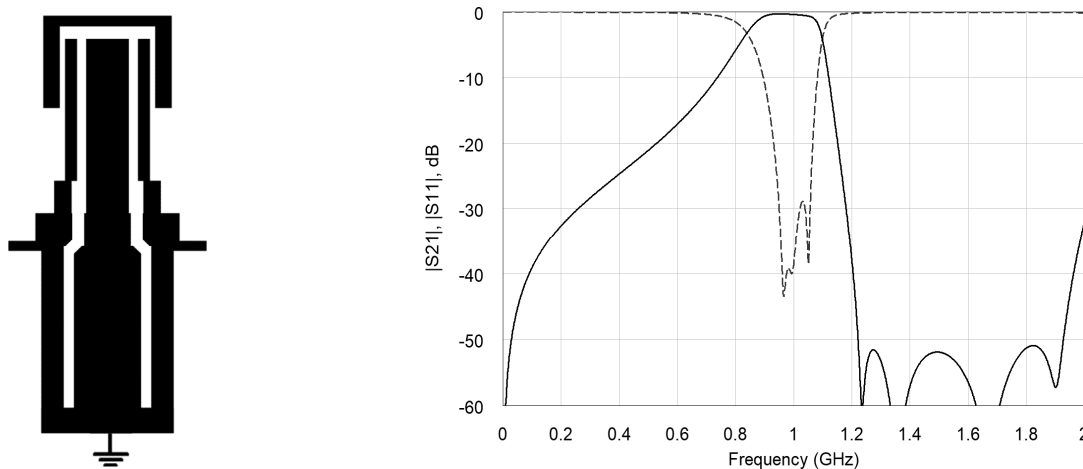


Рис. 3. Трехрезонаторный МПФ с повышенной частотной избирательностью в области верхних частот

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 $A \times B=30 \times 12$ мм², то есть $0,0268\lambda^2$, где λ 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 $A \times B=33 \times 9$ мм², 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 $A \times B=4 \times 12,62$ мм², 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 $A \times B=29 \times 11$ мм², 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 $A \times B=34 \times 16$ мм², 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 $A \times B=33 \times 13$ мм², 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.

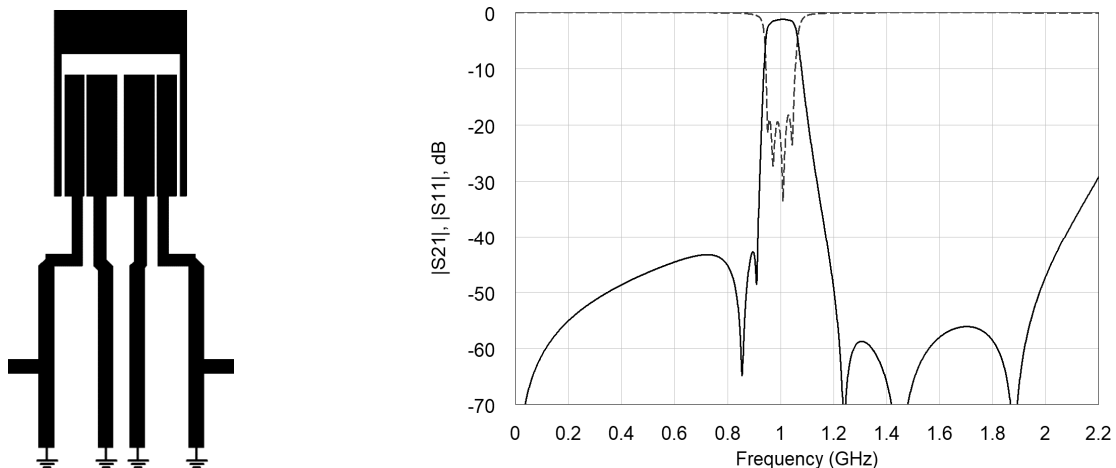


Рис. 4. МПФ с повышенной крутизной рабочего затухания в области нижних частот

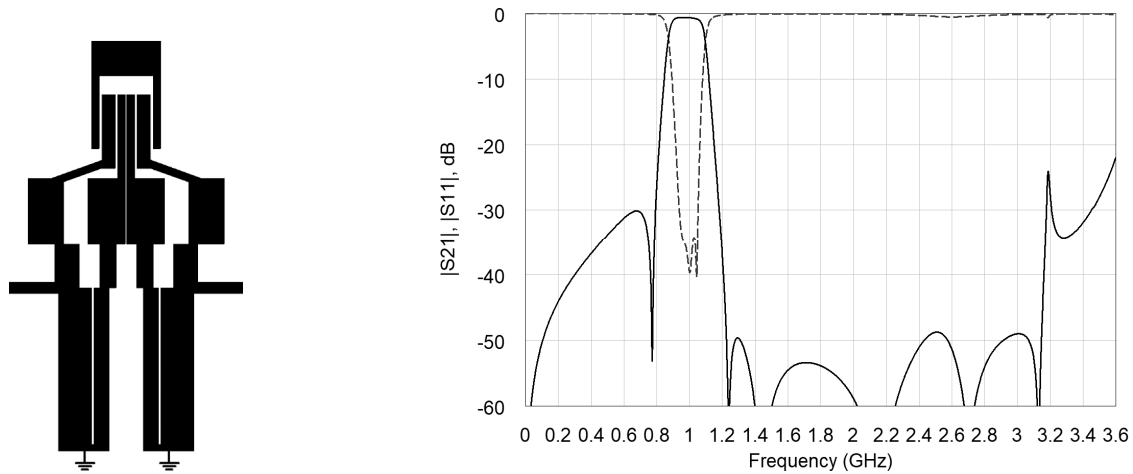


Рис. 5. МПФ с разрядкой спектра паразитных полос пропускания

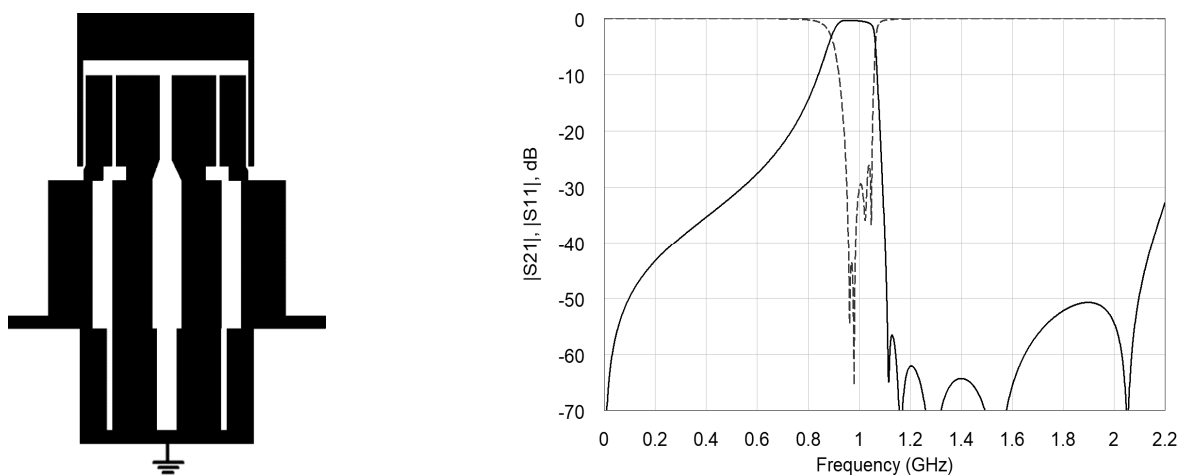


Рис. 6. МПФ с повышенной частотной избирательностью в области верхних частот

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>