

ВЫСОКОИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ГРЕБЕНЧАТЫХ СТРУКТУР

Аринин Олег Вячеславович

*зав. лаборатории кафедры «Электроника» МТУСИ, Москва, Россия
bishounen99@gmail.com*

Ивичев Максим Павлович

*студент группы МРТ1901 кафедры «Электроника» МТУСИ, Москва, Россия
vlsmax@mail.ru*

Ключевые слова: микрополосковые фильтры, гребенчатая секция, многоступенчатые резонаторы, полюсы рабочего затухания, электромагнитные связи, кросс-связь

В данной работе исследуются механизмы формирования частотных характеристик высокоизбирательных 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.

Введение

Одно из направлений развития современной электроники — это уменьшение ее габаритов. Аналоговые части приемо-передающих трактов плохо поддаются миниатюризации, а среди них фильтры являются одними из самых больших устройств. Таким образом, уменьшение размеров фильтров при все более жестких требованиях к их селективным свойствам является важной задачей. По сравнению с другими видами структур гребенчатые структуры обладают наименьшими размерами [1,2, 6-8 и при этом позволяют получить высокие уровни рабочего затухания в полосе заграждения. В данной работе показано, что использование различных способов для формирования дополнительных полюсов рабочего затухания позволит повысить крутизну амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в гребенчатых структурах при сохранении размеров фильтров.

Четырехрезонаторные фильтры с одним скачком волнового сопротивления

Исследуем условия формирования полюсов рабочего затухания при различном их расположении относительно полосы пропускания. На рис. 1,а представлен четырехрезонаторный микрополосковый фильтр (МПФ) на основе гребенчатой структуры с одним скачком волновых сопротивлений резонаторов. В этом четырехрезонаторном (N) МПФ, как показано в работе [3], возможно формирование двух полюсов рабочего затухания (P) в области верхних частот ((P=N-2) (рис.1,б)). Формирование полюсов рабочего затухания обеспечивается взаимодействием второго и третьего резонатора на всех участках длины. Коэффициент связи в нижней части структуры позволяет управлять степенью расщепления двух полюсов рабочего затухания, а в верхней части определяет ширину полосы пропускания фильтра. МПФ реализован на подложке толщиной H=1 мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=10$. Минимальная ширина зазора между связанными микрополосковыми линиями (МПЛ) составляет $S_{\min}/H=0,2$, а максимальная $S_{\max}/H=1,12$ и размер структуры $A \times B=24,9 \times 11,27$ мм.

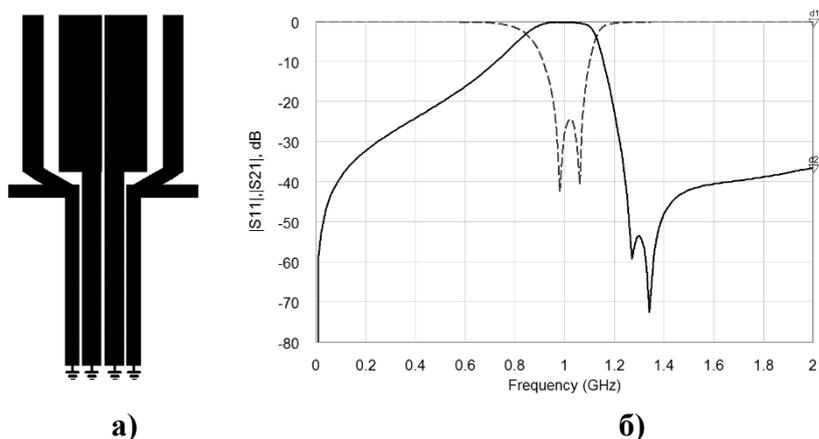


Рис.1. Структура МПФ с одним скачком волновых сопротивлений и ее частотная характеристика

На графике частотной зависимости полных сопротивлений при синфазном и противофазном возбуждении устройства (рис.2,а) видно преобладание магнитной связи – это следует из неравенства фазовых скоростей нормальных волн в микрополосковых линиях, что уже позволяет сформировать в гребенчатой секции полосно-пропускающую амплитудно-частотную характеристику. Однако формирование дополнительных полюсов рабочего затухания позволит повысить крутизну АЧХ фильтра. Это становится возможным при условии обеспечения разных коэффициентов связи на разных участках длин резонаторов или введении скачка их волновых сопротивлений.

На рис.2,б видно, что введение неоднородности баланса электромагнитных связей на разных участках длины резонаторов позволяет сформировать два полюса рабочего затухания в области верхних частот – на частотной оси в области 1,3 ГГц характеристика сопротивления связи эквивалентного четырехполюсника 2 раза пересекает ноль $Z_{12}(f)=0$. Таким образом, связь между входом и выходом четырехполюсника на этих частотах отсутствует.

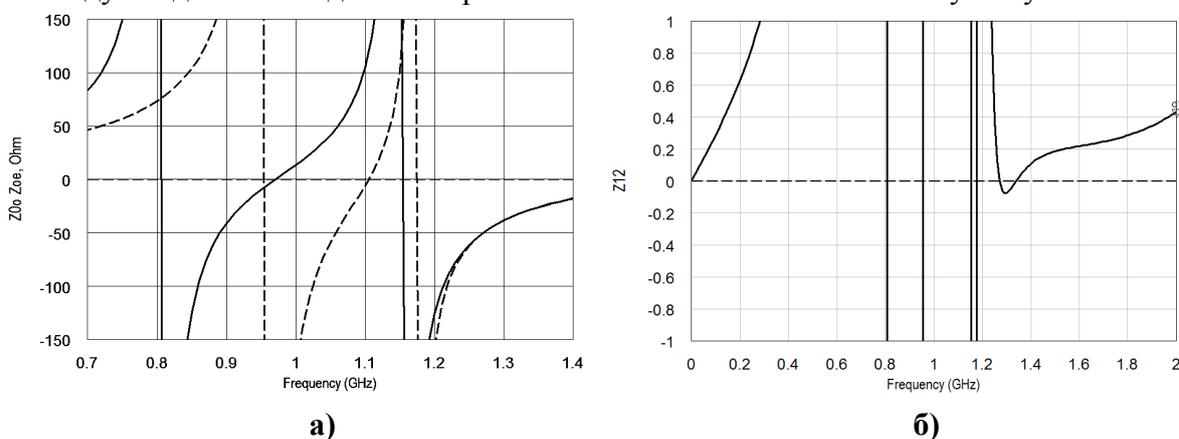


Рис. 2.а – Частотная зависимость полных сопротивлений при синфазном и противофазном возбуждении устройства; **б** – частотная зависимость сопротивления связи эквивалентного четырехполюсника с одним скачком волновых сопротивлений

Рассмотрим возможность иного расположения полюсов рабочего затухания на частотной оси. В представленной на рис.3,а структуре гребенчатого МПФ также формируется два полюса рабочего затухания ($P=N-2$). Один полюс в области нижних частот, другой в области верхних частот относительно полосы пропускания (рис.3,б). Такое их расположение достигается ослаблением магнитной связи между вторым и третьим резонатором и преобладанием емкостной связи между ними. Данный фильтр выполнен на подложке толщиной $H=1$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=10$. Минимальная ширина зазора между связанными микрополосковыми линиями составляет $S_{\min}/H=0,22$, а максимальная – $S_{\max}/H=2,88$. Размеры структуры $A \times B=26,4 \times 22,0$ мм

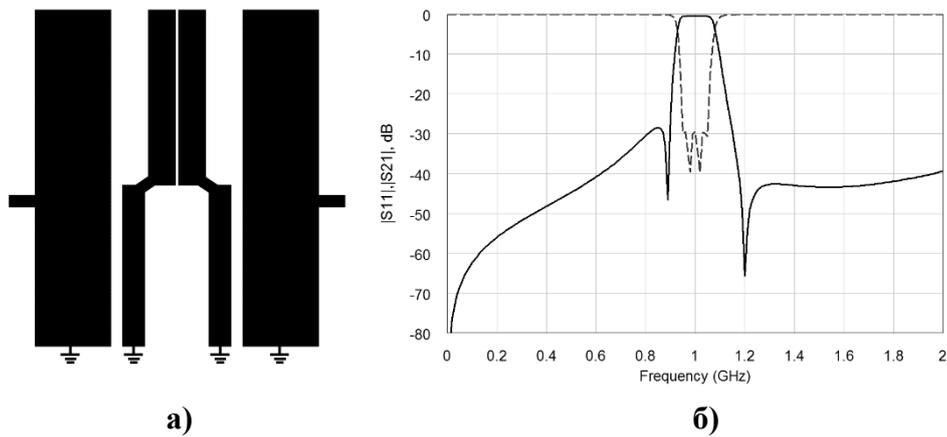


Рис. 3. Структура МПФ с квазисимметричной частотной характеристикой

На рис.4 видно, что характеристика Z_{12} пересекает частотную ось как в области нижних, так и в области верхних частот. Кроме того, в области верхних частот она имеет седловидную форму, близкую к нулю, что свидетельствует о возможности формирования в этой области частот еще двух полюсов рабочего затухания.

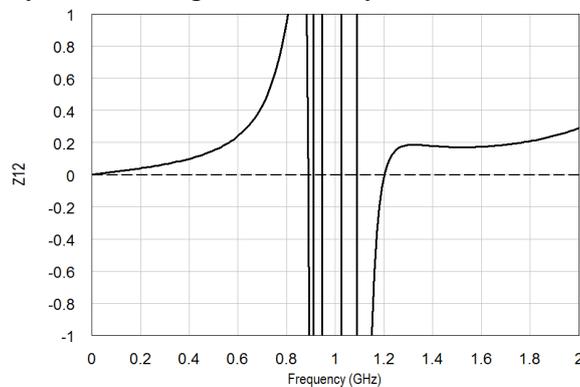


Рис. 4. Частотная зависимость сопротивления связи эквивалентного четырехполюсника фильтра с квазисимметричной АЧХ

Как показывают исследования добавление еще одного скачка волнового сопротивления резонаторов приводит к некоторому увеличению уровня затухания в области верхних частот, однако частотные характеристики существенно не изменяются и формирования дополнительных полюсов рабочего затухания не происходит. Это связано с тем, что неоднородность коэффициентов связи в данном случае является недостаточной для формирования дополнительных полюсов рабочего затухания.

Четырехрезонаторные фильтры с дополнительной связью

Введем дополнительную кросс-связь между несмежными резонаторами (рис.5,а, верхняя часть структуры). Это позволяет усилить электрическую связь и сформировать дополнительные полюсы рабочего затухания [4, 5], за счет расщепления четвертого и пятого полюсов в области верхних частот. В результате расширяется полоса заграждения до второй гармоники и повышается уровень затухания в ней (рис.5,б). Подобное расположение полюсов на частотной оси достигается за счет более четкого разделения областей, где каждая из связей - емкостная или магнитная является доминирующей, а также изменением коэффициентов связи в центральной секции структуры фильтра.

В представленной на рис.5,а четырехрезонаторной структуре между первым и вторым резонаторами, а также между третьим и четвертым преобладающей является электрическая связь, а между вторым и третьим – магнитная. В таком случае формируется пять ($P=N+1$) полюсов рабочего затухания, два из которых расположены в области слева от полосы

пропускания, обеспечивая высокую крутизну затухания в области нижних частот, и три справа – в области верхних частот.

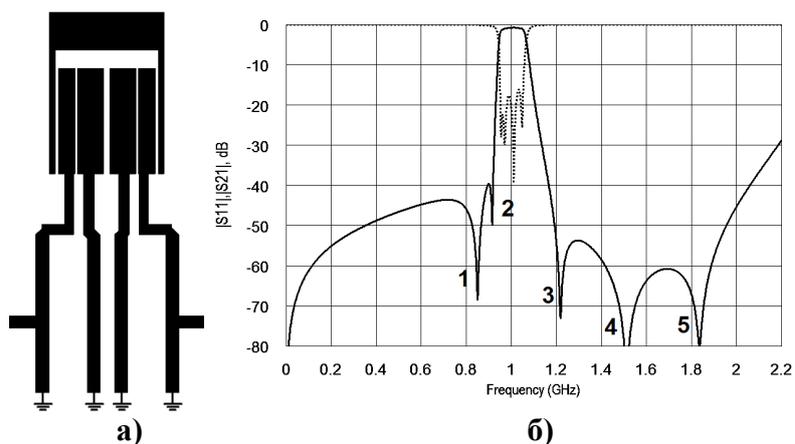


Рис. 5. Структура МПФ с дополнительной связью и ее частотная характеристика

Важно выбрать оптимальный уровень электрической связи между переключкой и верхней секцией резонаторов. На рис.6,а представлен пример частотной характеристики при недостаточной связи, т.е. когда расстояние между переключкой и резонаторами слишком велико. Видно, что при такой конфигурации микрополосковой структуры обеспечивается формирование только одного полюса рабочего затухания, а остальные полюсы вырождаются. В свою очередь чрезмерная связь приводит к тому, что два из трех полюсов в области верхних частот, образованных при оптимальной связи, вырождаются (рис.6,б). Стоит отметить, что МПФ реализован на подложке толщиной $H=1$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=10$. Минимальная ширина зазора между связанными МПЛ при оптимальной связи составляет $S_{\min}/H=0,17$, а размер структуры МПФ во всех случаях $A \times B=28,9 \times 10,8$ мм. При этом, недостаточная электрическая кросс-связь между несмежными резонаторами соответствует $S_{\min}/H > 0,28$, оптимальная связь – $S_{\min}/H=0,22$ и чрезмерная связь $S_{\min}/H < 0,18$.

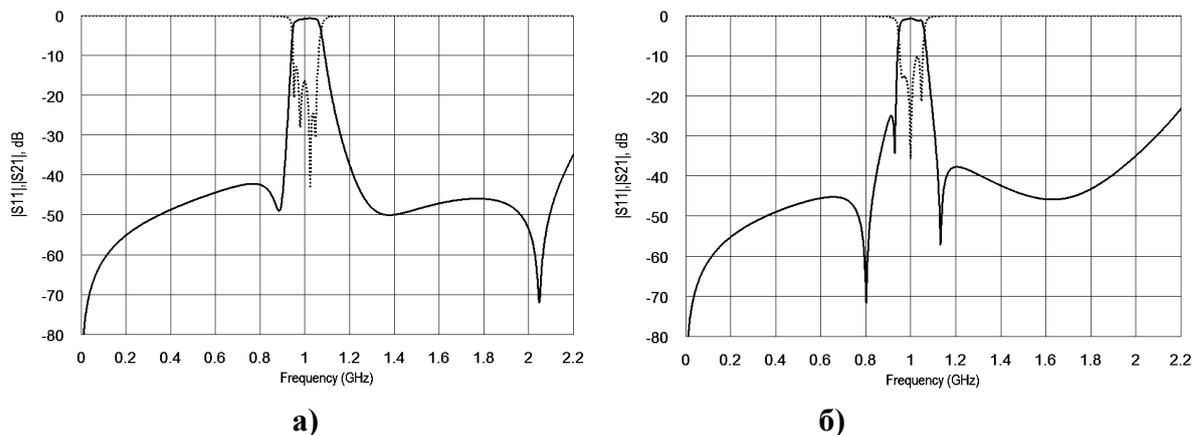


Рис. 6.а – АЧХ МПФ с недостаточной связью; **б** – АЧХ МПФ с чрезмерной связью

Более наглядно влияние связи между переключкой и резонаторами можно наблюдать на рис.7. Очевидно, что оптимально выбранное расстояние позволяет значительно улучшить избирательные свойства рассматриваемого микрополоскового фильтра, такие как уровень затухания в полосе заграждения или коэффициент прямоугольности рабочего затухания.

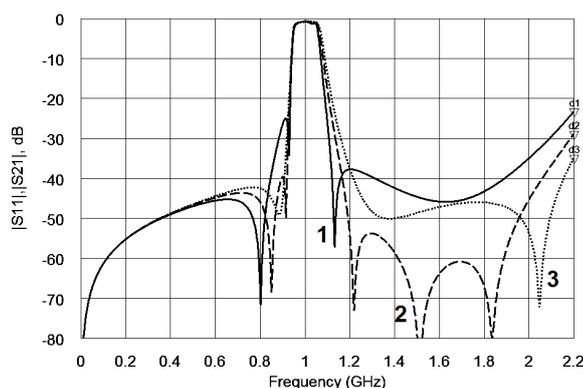


Рис. 7. Сравнительный график АЧХ фильтров с различной степенью дополнительной связи: 1 – чрезмерная связь; 2 – оптимальная связь; 3 – недостаточная связь

Заключение

В четырехрезонаторных гребенчатых структурах возможно формирование значительного числа полюсов рабочего затухания ($P=N+1$) при рациональном использовании нескольких способов управления электромагнитными связями. Формирование и грамотное расположение дополнительных полюсов рабочего затухания на частотной оси позволяет повысить уровни затухания в полосе заграждения и определяются выбором оптимальной связи на разных участках длины резонаторов.

Литература

1. *J. D. Rhodes*, "The stepped digital elliptic filter," *IEEE Trans. MTT*, 1969, Vol. MTT-17, №4, pp.178-184.
2. *M. Makimoto and S. Yamashita*, "Compact bandpass filters using stepped impedance resonators", *Proc. IEEE*, vol. 67, 1979, pp.16-19.
3. *G. M. Aristarkhov, O. V. Arinin and I. N. Kirillov*, "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>
4. *A.V. Zakharov, M.E. Il'chenko, I.V. Trubarov*, Planar three-resonator bandpass filters with cross coupling // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2017. Т. 62. № 2. pp. 185-193.
5. *O. V. Arinin, G. M. Aristarkhov*, "Microwave filters with increased frequency selectivity based on quarter-wave hairpin resonators," // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Minsk, Belarus, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456934 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8456934>
6. *Аристархов Г.М., Аринин О.В., Кириллов И.Н.* Селективные свойства двух- и трехрезонаторных многоступенчатых гребенчатых структур и высокоизбирательные фильтры на их основе // *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов*. 2019. Т. 10. № 4. С. 4-8.
7. *Аристархов Г.М., Аринин О.В., Кириллов И.Н.* Микрополосковые фильтры на основе встречно-гребенчатых структур с дополнительной гальванической связью // *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов*. 2018. Т. 9. № 4. С. 8-12.
8. *Аристархов Г.М., Звездинов Н.В.* Высокоизбирательные микроволновые фильтры на основе структур с предельно минимальным числом резонаторов // *REDS: Телекоммуникационные устройства и системы*. 2016. Т. 6. № 1. С. 6-8.

HIGHLY SELECTIVE MICROSTRIP FILTERS BASED ON MULTI-STEP COMB STRUCTURES

Oleg V. Arinin

*Head of laboratory of Electronics department MTUCI, Moscow, Russia
bishounen99gmail.com*

Maksim P. Ivichev

*student of group MRT1901 Electronics department MTUCI, Moscow, Russia
vlsmax@mail.ru*

Key words: *microstrip filters, comb section, stepped impedance resonators, attenuation poles, electromagnetic coupling, cross-coupling*

In this paper, the authors investigate the frequency characteristics formation mechanisms of the highly-selective four-resonator microstrip filters based on multi-step comb structures with additional electromagnetic cross-coupling between non-adjacent resonators. It is shown the effect of steps in the wave impedances in different areas of the resonators' length on the formation of the working attenuation poles and their location on the frequency axis. The possibilities of various control methods of the attenuation poles splitting degree and their location relative to the passband are demonstrated.