

Оптимизация коаксиальных волноводных фильтров для базовых станций

М. Муравьев, С. Чуркин, О. Журавлева, Е. Черепкова, М. Суворова, А. Можаровский

ООО «Радио Гигабит»

Аннотация: В данной работе описывается новый подход к процедуре оптимизации коаксиальных полостных фильтров, предназначенных для применения в базовых станциях сотовой связи. Подход основан на анализе требований к фильтру с целью поиска наименее критичных к допускам производства параметров фильтра, подстройку которых можно исключить для упрощения его структуры и снижения стоимости производства. Предлагаемая модификация включает уменьшение количества подстроечных винтов для облегчения ручной калибровки АЧХ без необходимости использования дорогостоящих автоматизированных стендов настройки. Разработанная методика была проверена на коаксиальном волноводном полосовом фильтре диапазона 4,8–5,0 ГГц (n79). В работе представлен анализ устойчивости фильтра к допускам производства и оценка ручной подстройки. Измерения изготовленного прототипа демонстрируют хорошее совпадение с моделированием и подтверждают предложенную концепцию.

Ключевые слова: полосовой фильтр, коаксиальный фильтр, настройка фильтра.

1. Введение

Полосовые фильтры являются неотъемлемой частью современных систем сотовой связи. РЧ-спектр вблизи до 6 ГГц плотно занят, поэтому требуются высокодобротные фильтры для изоляции полосы приемопередатчика от соседних каналов и побочных излучений. Коаксиальные волноводные фильтры (КФ) обладают несколькими важными преимуществами: малыми вносимыми потерями, высокой добротностью, высоким уровнем подводимой мощности и широким диапазоном температур эксплуатации.

Сложные топологии фильтров используются для уменьшения порядка фильтров, его габаритов и времени расчёта. Они основаны на связи между несмежными резонаторами (перекрёстная связь), которая обеспечивает действительные нули передачи вне полосы пропускания и, тем самым, делает отклик фильтра более резким [1]. Это имеет решающее значение для выполнения требований к АЧХ. Однако у этого подхода есть несколько недостатков. Во-первых, резонаторы должны быть организованы определенным образом, образуя тройки (триплеты) или четверки (квадруплеты), поэтому возникают ограничения на форму и габариты КФ. Кроме того, перекрёстная связь очень чувствительна к механическим допускам, поэтому требуются дополнительные подстроечные винты [2].

В работе такие конструктивные элементы как перекрёстная связь, количество подстроечных винтов, расположение резонаторов, наличие фильтра нижних частот для подавления высших гармоник и покрытие корпуса, были пересмотрены для упрощения конструкции КФ и устранения необходимости в дорогостоящих автоматизированных стендах для калибровки фильтров.

Для подтверждения концепции был изготовлен и испытан прототип КФ диапазона 4,8–5,0 ГГц.

2. Постановка требований и выбор конструкции резонатора

Требования к проектируемому КФ, представленные в таблице 1, были установлены на основании нормативных требований, анализа компоновки приемопередатчика, системного моделирования и конструкции радиоблока.

Таблица 1. Требования к полосовому фильтру базовой станции.

Частотный диапазон	4800 – 5000 МГц
Вносимые / обратные потери в полосе	< 1 dB / > 20 dB
Неравномерность АЧХ в полосе	< 0.5 dB
Подавление на отстройке от полосы	> 30 dB на 60 МГц отстройке
Подавление третьей гармоники	> 10 dB
Максимальная пиковая подводимая мощность	200 Вт
Размеры фильтра (L×W×H)	136×57.5×31 mm (2.2×1×0.5λ ₀)
Разъемы	4.3-10, SMP Max
Температурный диапазон эксплуатации	-40...+55°C

Для прототипа фильтра был использован цилиндрический коаксиальный резонатор. конструкции представленной на рисунке 1. Высота коаксиальной стойки H выбирается в диапазоне от $\lambda_0/8$ до $\lambda_0/4$, тогда как оптимальное отношение диаметра полости резонатора к диаметру коаксиальной стойки D/d составляет 3,6 для [3]. Настройка резонансной частоты F_p осуществляется погружением винта, установленного в крышке.

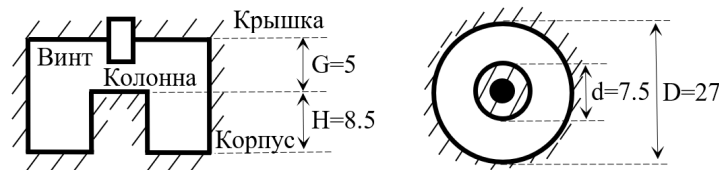


Рисунок 1. Конструкция резонатора: вид сбоку и вид сверху. Все размеры указаны в мм.

Для плавной подстройки инструментом следует использовать резьбу подстроечного винта с малым шагом. На практике, в этом диапазоне частот подходит винт М3 со стандартным шагом резьбы 0,5 мм. Согласно моделированию, один оборот винта из среднего положения меняет F_p на ~100 МГц (половина полосы пропускания КФ) по сравнению с ~220 МГц при использовании винта М5 (шаг резьбы 0,8 мм) [4].

3. Синтез топологии фильтра и его оптимизация

Несколько вариантов полосовых фильтров Чебышева, удовлетворяющих требованиям по АЧХ (показаны на рисунке 2), были синтезированы в ПО Matlab [5]. По результатам видно, что фильтр 6-го порядка удовлетворяет требованиям при использовании перекрёстной связи. Конструктивно она выполнена металлическими дисками на стержне, и зафиксирована в диэлектрическом зажиме. Стоит отметить, что такая конструкция весьма чувствительна к допускам производства. Поэтому конструкция фильтра 7-го порядка предлагается как компромисс между требуемой резкостью АЧХ и повышением технологичности КФ.

В известных КФ (например, [4]) связь между смежными резонаторами также контролируется подстроечными винтами, как показано на рисунке 3а. Однако, это удваивает количество элементов настройки, существенно усложняя процесс ручной подстройки. При этом размеры апертур между резонаторами, которые определяют эти связи, гораздо менее критичны к производственным отклонениям. Полноволновое моделирование показывает, что типичный допуск на фрезерование ± 50 мкм приводит к незначительным искажениям (<1,5%) в уровне этих связей. Таким образом, предлагаемая методика упрощения настройки (рис. 3б) основана на спецификации

допуска фрезерования корпуса фильтра и существенным уменьшении количества подстроечных элементов.

Модель фильтра представлена на рисунке 3в. Конструкция фильтра определена требуемыми габаритами и известными положениями антенного разъема (4.3–10) и разъема приемопередатчика (SMP-Max). Подключение выполнено с помощью паяных контактов, конструкции которых были оптимизированы в САПР CST для достижения требуемого уровня коэффициентов связи конечных резонаторов с разъемами [3].

Корпус КФ выполнен из алюминиевого сплава 2024 (проводимость $1,74e+7$ См/м) без дополнительного покрытия (серебрение). Добротность резонатора составляет $Q_u=3070$, а расчетные вносимые потери фильтра 7-го порядка не превышают 0,7 дБ. Требование по уровню вносимых потерь выполнено, поэтому покрытие серебром было исключено для повышения технологичности КФ. По результатам моделирования максимальный уровень подводимой мощности составляет 220 Вт, что соответствует требованию.

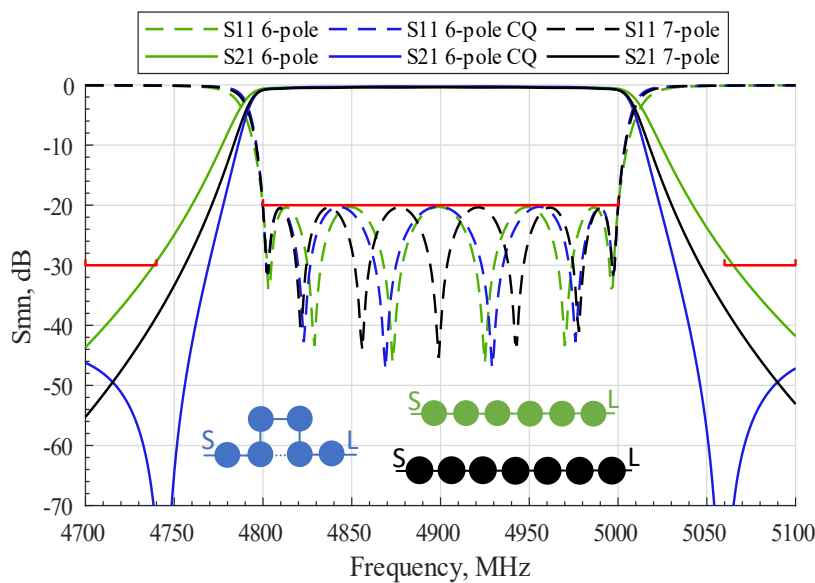


Рисунок 2. Расчетные отклики фильтров 6-го порядка (зелёный), 6-го порядка с перекрёстной связью (синий) и фильтра 7-го порядка (черный). Требования к АЧХ представлены красным цветом.

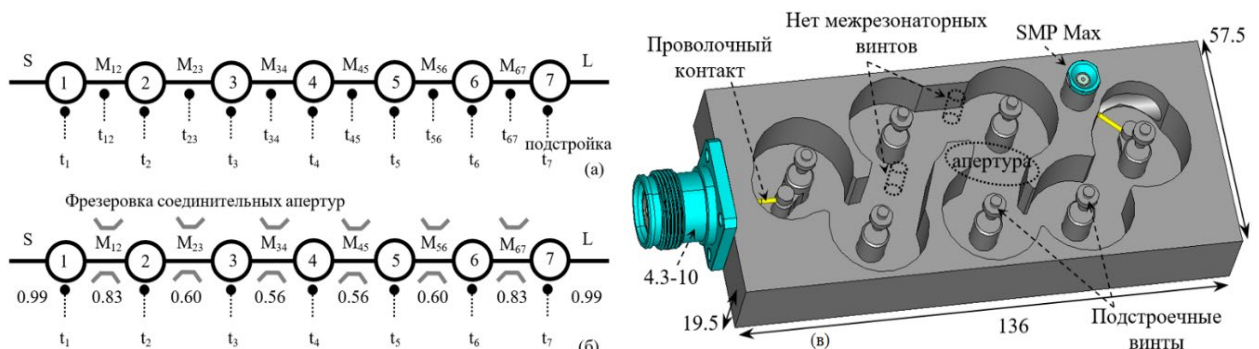


Рисунок 3. Методика оптимизации настройки КФ: характерная схема (а), оптимизированная структура, (б), предлагаемая модель фильтра (крышка скрыта) (в). Размеры указаны в мм.

Предлагаемый фильтр не содержит фильтра нижних частот (ФНЧ), характерного для фильтров БС. Такие ФНЧ выполнены в виде коаксиальной линии со ступенчатым изменением импеданса на центральной жиле. Она зафиксирована в диэлектрическом кожухе, который предотвращает короткое замыкание между жилой и корпусом. ФНЧ

содержит миниатюрные детали что усложняет конструкцию фильтра и увеличивает стоимость производства.

С другой стороны, относительно низкое подавление кратных гармоник (10 дБ), установленное в требованиях, может быть достигнуто за счет оптимизации топологии фильтра даже без использования дополнительного ФНЧ. Эффект дополнительного подавления кратных гармоник достигается разными электрическими длинами между индуктивными связями, которые конструктивно выполнены апертурами между резонаторами [6]. В разработанном фильтре это реализуется за счет неэквидистантного размещения резонаторов. Расстояние между центрами коаксиальных стоек составляет 24,8; 25,5; 28,8; 30,0; 29,2; 25,1 мм. Моделирование показывает, что аттенюация коэффициента передачи в полосе 3-й гармоники (14,4–15,0 ГГц) составляет >14 дБ для подобной компоновки фильтра, тогда как в фильтре с эквидистантными резонаторами наблюдается проникновение гармоник в этой полосе.

4. Анализ допустимых отклонений

На отклик фильтра влияют производственные допуски (фрезерование корпуса, сборка) и температурные отклонения. Влияние первого было изучено в электромагнитном моделировании, где геометрические параметры КФ были подвержены предельному отклонению ± 50 мкм. Максимальный сдвиг АЧХ составляет ± 15 МГц и может быть компенсирован при калибровке фильтра. Согласно моделированию, коррекция погружения винтов t_1 - t_7 составляет 0,11–0,17 мм (1/8–1/3 оборота винта) для компенсации допуска фрезерования корпуса.

Термический анализ РЧ блока БС показал, что диапазон рабочих температур фильтра составляет $-15...+65^\circ\text{C}$, что дает отклонение $\pm 40^\circ\text{C}$ от комнатной температуры ($+25^\circ\text{C}$), при которой происходит калибровка фильтра. С помощью коэффициента температурного расширения рассматриваемого сплава ($\alpha=22,9 \text{ ppm deg}^{-1}$) рассчитано максимальное смещение АЧХ КФ $\pm 4,5$ МГц [7]. В отличие от допуска на фрезерование, температурные отклонения возникают внутри уже установленного фильтра и не могут быть компенсированы на стадии калибровки. Поэтому по обеим сторонам от требуемой полосы пропускания были добавлены дополнительные защитные интервалы ~ 5 МГц.

5. Изготовленный прототип и результаты измерений

Корпус фильтра объединяет четыре одинаковых канала, описанных выше, и показан на рисунке 4б. Для измерения АЧХ КФ использован векторный анализатор цепей Keysight PNA N5224. Сравнение результатов моделирования, и измерений S-параметров показаны на рисунке 4а. Уровень вносимых потерь составляет 0,8 дБ и может быть уменьшен до 0,3 дБ за счет серебрения деталей корпуса КФ. Обратные потери составляют >19 дБ в полосе пропускания, затухание на отстройке 60 МГц >32 дБ. Измеренное подавление гармоник 3-го порядка составляет >14 дБ.

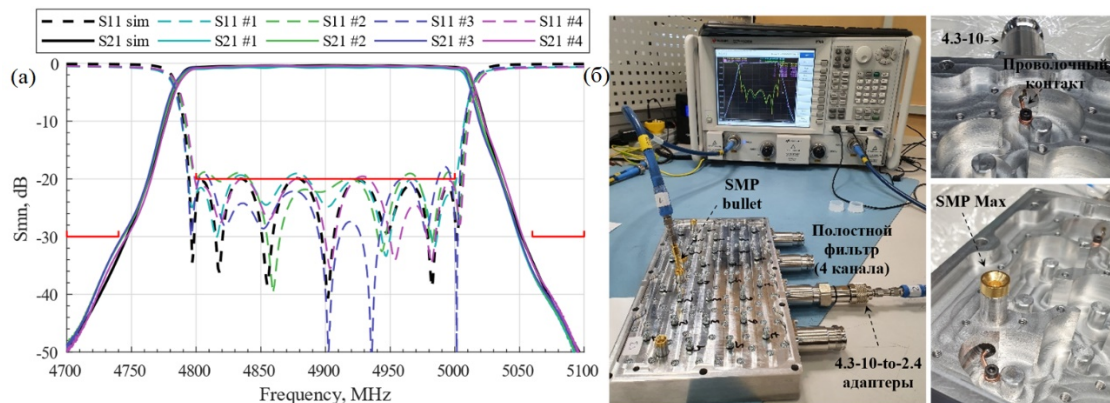


Рисунок 4. Сравнение результатов моделирования и измерения S-параметров разработанного фильтра для базовой станции 4,8–5,0 ГГц (а). Изготовленный прототип фильтра, сборка и измерительная установка (б).

6. Заключение

Данная работа посвящена оптимизации конструкции коаксиального волноводного фильтра, для базовых станций сотовой связи. Предложен новый механизм оптимизации топологии фильтра и схемы подстроечных связей, который основан на значительном сокращении количества подстроечных винтов, что упрощает процесс ручной калибровки. Для подавления кратных гармоник использована методика неэквидистантного размещения резонаторов, что позволяет исключить дополнительный ФНЧ в конструкции КФ. Наконец, корпус фильтра не имеет покрытия серебром для снижения себестоимости производства. Вышеупомянутые меры значительно повышают технологичность КФ, процессы сборки и настройки. Это снижает себестоимость прототипы и ускоряет получение коммерческих образцов для массового изготовления. Измерения изготовленного прототипа фильтра для диапазона 4800–5000 МГц подтвердили реализуемость предложенного подхода.

Список литературы

1. Thomas J. B. Cross-coupling in coaxial cavity filters - a tutorial overview // IEEE Trans. on Microw. Theory and Tech. – Т. 51 – №. 4. – С. 1-5 – 2003.
2. Chen Y., Ke-Li Wu An all-metal capacitive coupling structure for coaxial cavity filters // 2020 IEEE/MTT-S Int. Microwave Symposium. – С. 583-585 – 2020.
3. Hagensen M. Narrowband microwave bandpass filter design by coupling matrix synthesis // Microwave Journal. – Т. 53. – №4. – С. 218-226 – 2010.
4. ADBF 3900/200-A data sheet // ADMOTECH, [Online]. – Available: <http://www.admotech.com/>
5. Basavarajappa G. Coupling Matrix Synthesis for RF Filters // <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/72692-coupling-matrix-synthesis-for-rf-filters>. – 2021.
6. Lee I., Nam H., Yun T., Lee J. Spurious suppressed substrate integrated waveguide bandpass filter using stepped-impedance resonator // Jour. of the Korean inst. of electromag. eng. and science – Т. 10. – № 1. – 2010.
7. Ossorio J., Cogollos S., Boria V., Guglielmi M. Rectangular Waveguide Quadruplet Filter for Satellite Applications // 2019 IEEE/MTT-S Int. Microwave Symposium. – С. 1359-1362. – 2019.