

Коаксиальные полосовые фильтры GSM диапазона для базовых станций сотовой связи

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

ООО «Радио Гигабит»

Аннотация: В данной работе представлена разработка и лабораторные измерения прототипов коаксиальных полосовых фильтров диапазона GSM-900 для применения в базовых станциях (БС) сотовой связи. Зачастую в подобных фильтрах для компенсации производственных допусков используются регулировочные элементы и, соответственно, дополнительная операция настройки фильтра при постобработке. Для повышения технологичности конструкции и снижения себестоимости изготовления была предложена конструкция фильтра без регулировочных винтов. Проведен анализ устойчивости двух вариантов такого фильтра к производственным допускам, обеспечиваемым современной технологией изготовления. Представлены результаты моделирования и лабораторных измерений изготовленных прототипов фильтров 4-го и 5-го порядков с различными топологиями межрезонаторных связей. Полученные результаты подтверждают применимость концепции коаксиального фильтра (КФ) без подстроечных элементов, не требующего калибровки после изготовления.

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

1. Введение

Полосовые фильтры играют важную роль в современных системах сотовой связи. Радиочастотный спектр в диапазонах частот GSM, LTE, 5G перегружен, поэтому требуется высокий уровень изоляции рабочей полосы частот приемопередатчика от нежелательных соседних сигналов и помех. Для используемых полосовых фильтров определены строгие требования не только к селективности, но и к подавлению внеполосных помех вплоть до 3-й гармоники. Применение КФ с высокой добротностью обусловлено требованиями высокого уровня подводимой пиковой мощности (сотни ватт), малыми вносимыми потерями и высокой крутизной ската амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра. Среди существующих видов резонаторов [1] был выбран коаксиальный тип резонатора без подстроечного винта, т.к. он обеспечивает простоту изготовления, поскольку весь резонатор фрезеруется как единое целое.

Известные из литературы, а также, коммерческие модели КФ [2] используют дополнительные подстроечные элементы для компенсации влияния допусков изготовления при постобработке. Как правило, это регулировочные винты внутри коаксиальных резонаторов и волноводных апертур между ними. Глубина погружения винтов изменяет резонансные частоты резонаторов и коэффициенты связей между ними. Процесс настройки (калибровки) такого фильтра является сложной и трудоемкой процедурой, требующей применения полуавтоматических программно-аппаратных измерительных комплексов для анализа АЧХ ненастроенного фильтра в реальном времени. Это приводит к существенному усложнению технологии и удорожанию стоимости изготовления КФ.

В данной статье представлены конструкции полосовых фильтров БС диапазона GSM-900 с центральной частотой $f_0=880$ МГц, в которых нет подстроечных элементов, а требуемые характеристики достигаются путем точного электромагнитного

моделирования и анализа влияния производственных допусков в рассматриваемом частотном диапазоне. Дополнительно, были предложены модификации конструкции фильтра в части возбуждения резонаторов, дополнительных гребней для усиления связи между резонаторами и контура герметизации, которые существенно повышают технологичность КФ и упрощают их сборку. Для проверки предложенного подхода проведен анализ устойчивости АЧХ фильтра к допускам фрезерования на современном обрабатывающем центре с ЧПУ. Были изготовлены прототипы полосовых фильтров 5-го и 4-го порядка, выполненных в разных топологиях: последовательной и с одной перекрестной связью (квадруплет).

К разрабатываемому фильтру предъявляются следующие требования: полоса пропускания 854.5–904.6 МГц, обратные потери в которой должны быть выше 19 дБ ($K_{СВН} < 1.25$), вносимые потери с учетом коаксиальных разъемов (4.3-10) не должны превышать 1 дБ. По обе стороны от полосы пропускания есть две полосы заграждения 813.5–821 МГц и 940–949.6 МГц с требованием ослабления сигнала > 25 дБ.

2. Конструкция фильтров и экспериментальные результаты

Как правило, для подключения центрального контакта коаксиального разъема к входному резонатору используется дополнительная деталь с соединением винтом либо пайкой [2]. Для повышения технологичности конструкции фильтра разработано подключение коаксиального разъема с удлиненной жилой (вылет 36 мм) к резонатору с помощью фиксации винтом с потайной головкой внутри коаксиальной стойки резонатора фильтра (рисунок 1).

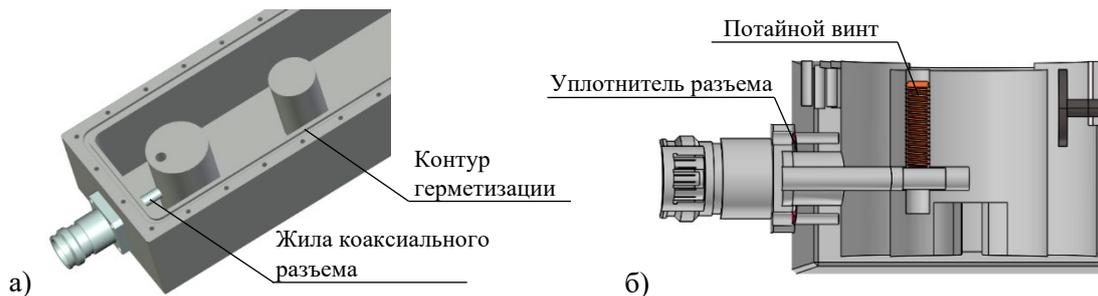


Рисунок 1. Конструкция подачи питания резонатора: а – вид сверху; б – вид поперечного сечения.

Условия эксплуатации устройства предусматривают возможность размещения фильтра вне корпуса радиочастотного блока, т.е. на открытом воздухе. Благодаря отсутствию подстроечных винтов удалось расположить контур герметизации непосредственно в плоскости прижима крышки. Герметизация места монтажа коаксиального разъема обеспечивается уплотнителем, предусмотренным конструкцией разъема.

Для анализа устойчивости отклика фильтра к допускам изготовления в рассматриваемом частотном диапазоне рассмотрим основные размеры используемого коаксиального резонатора (рисунок 2): высоту коаксиальной стойки (H), диаметр стойки (d), диаметр резонатора (D) и зазор между стойкой и крышкой (g). С помощью электромагнитного моделирования собственных частот такого резонатора были получены зависимости резонансной частоты $f_{рез}$ от отклонения размеров в диапазоне $[-0.03 \ 0.03]$ мм. По результатам видно, что допуск ± 0.02 мм наиболее критичного параметра зазора g приводит к максимальному отклонению $f_{рез}$ на ± 3 МГц.

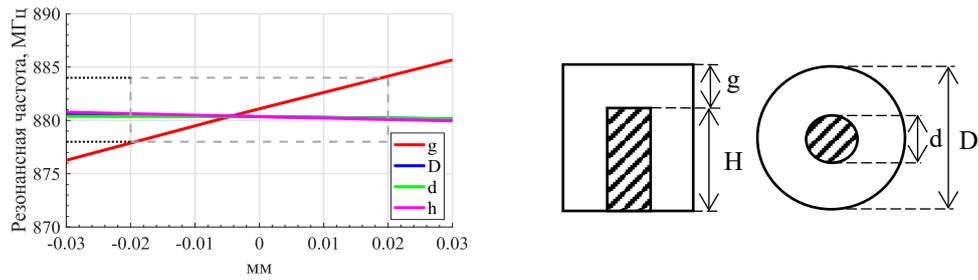


Рисунок 2. Результаты моделирования вариации резонансной частоты от изменения параметров в диапазоне $\pm 0,03$ мм (слева) и эскиз резонатора с основными размерами (справа).

Для выполнения требований на АЧХ фильтра был проведен анализ известных полосовых фильтров и выполнен синтез топологий 4-го и 5-го порядков. Фильтр 5-го порядка выполнен последовательным, а фильтр 4-го порядка имеет емкостную связь для реализации двух нулей передачи, повышающих крутизну АЧХ [3]. На рисунке 3 изображена топология фильтров и синтезированные матрицы коэффициентов связи M_{ij} .

Конструкции разработанных фильтров показаны на рисунке 4 со следующими размерами: расстояния между коаксиальными стойками $R_1=30$; $R_2=65,58$; $R_3=70,91$; $R_4=70,97$; $R_5=65,92$; $r_1=60$; $r_2=65$; диаметры стоек $D_1=30,85$; $D_2=23,15$; $D_3=22,99$; $D_4=23,14$; $D_5=31,1$; $d_1=36,8$; $d_2=32,5$; их высоты $h_1=38$; $h_2=43,7$ мм. В предлагаемых фильтрах резонансные частоты каждого резонатора настроены путем подбора диаметров D , d и высот h , а коэффициенты связи между резонаторами зависят от расстояний R и высот дополнительных гребней в случае фильтра 4-го порядка.

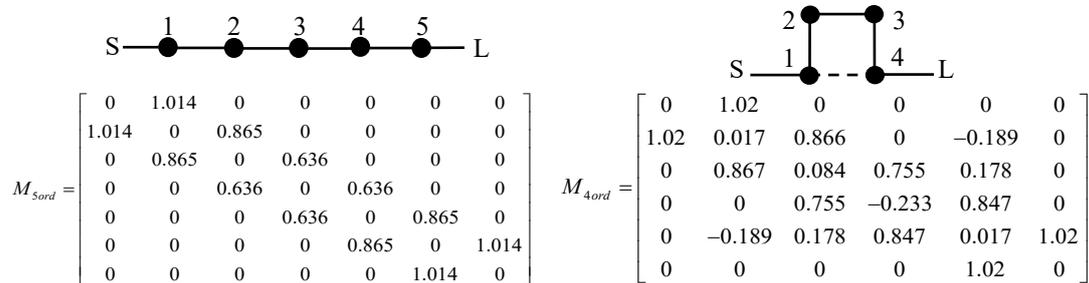


Рисунок 3. Топологии и матрицы связей фильтров 5-го (слева) и 4-го порядка (справа).

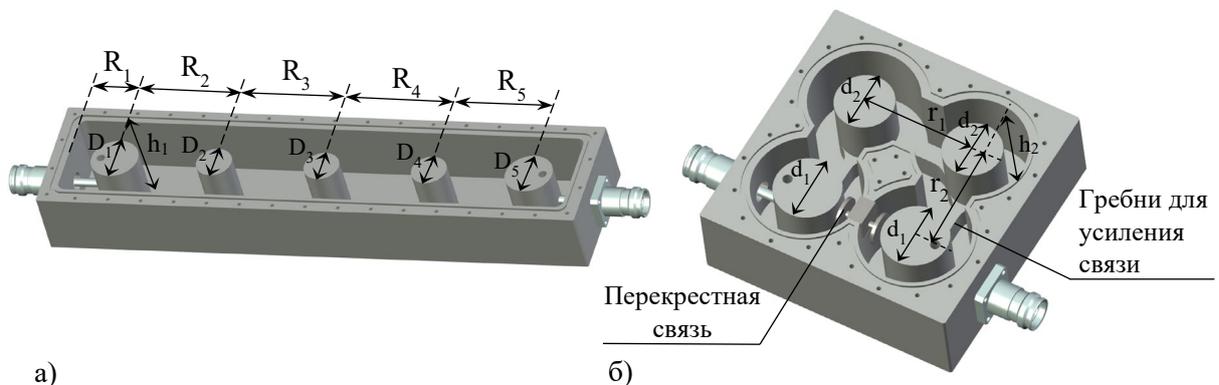


Рисунок 4. Конструкции КФ 5-го порядка (а), 4-го порядка (б). Крышки не показаны.

Перекрёстную емкостную связь обеспечивает проводящий штырь с дисками, зафиксированный в диэлектрической вставке. Коэффициент связи M_{14} настраивается путем подбора диаметра дисков и длиной штыря [4].

Детализированные трехмерные модели фильтров были параметризированы в САПР CST Microwave Studio. Предварительно размеры резонаторов и связей между ними были подобраны с помощью методики, описанной в [4]. Тонкая настройка фильтра была выполнена путем оптимизации полной модели. Итоговые АЧХ фильтров представлены на рисунке 6 (черные кривые).

Анализ устойчивости АЧХ разработанных фильтров к характерным производственным допускам изготовления был выполнен моделированием максимального отклонения геометрических параметров фильтров ± 25 мкм. Расчетные вариации АЧХ фильтров показаны серыми кривыми. Видно, что оба фильтра, в целом, соответствуют требованиям к АЧХ даже в случае предельных отклонений размеров.

Прототипы фильтров, изготовленные из алюминиевого сплава В95 без дополнительного покрытия, показаны на рисунке 7. Измерения трех образцов каждого из фильтров, представленные на рисунке 8, выполнены на векторном анализаторе цепей Keysight PNA N5224A.

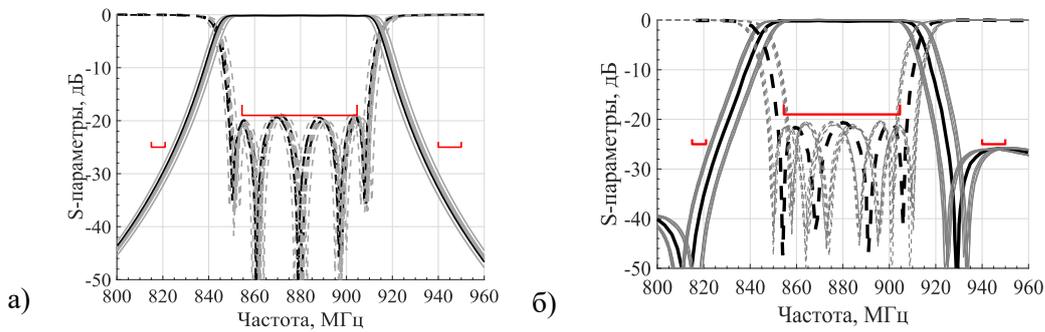


Рисунок 6. Расчетные АЧХ КФ с данными анализа производственных допусков: фильтр 5-го (а) и 4-го (б) порядка.

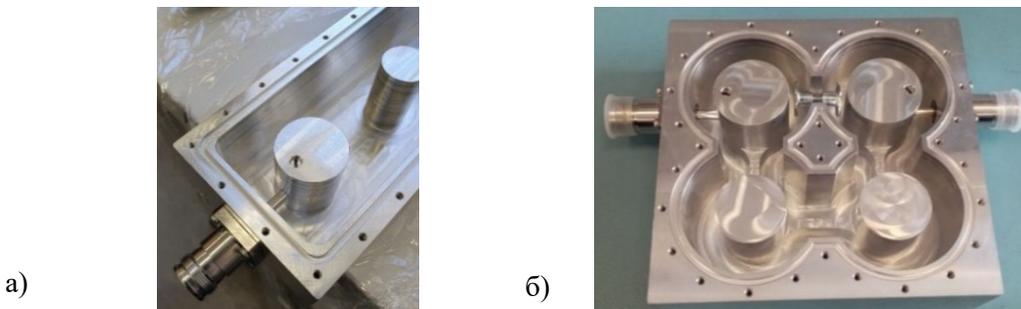


Рисунок 7. Изготовленные прототипы КФ 5-го (а) и 4-го (б) порядка. Крышки не показаны.

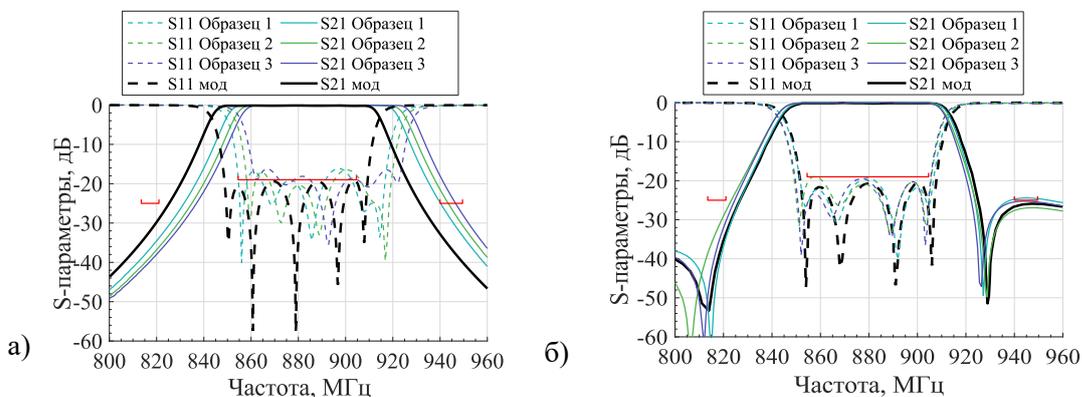


Рисунок 8. Результаты измерений S-параметров фильтров по трем образцам: фильтр 5-го порядка (а) и фильтр 4-го порядка (б).

Максимальный уровень вносимых потерь в рабочей полосе фильтров составляет 0,4 дБ (включая коаксиальные разъемы), а обратные потери выше 15 и 19 дБ для фильтров 5-го и 4-го порядка соответственно. Был обнаружен частотный сдвиг 5-10 МГц на АЧХ некоторых образцов фильтра 5-го порядка по причине отклонения фактической величины зазора g от номинального на +40 мкм, что превышает требуемый допуск (± 25 мкм).

Дополнительно были проведены измерения внеполосного подавления фильтров, в полосе частот до 3-й гармоники (рисунок 9). Примечательно, что ослабление фильтра 5-го порядка составляет 70–90 дБ на частотах $\sim 2,6 - 2,7$ ГГц, тогда как фильтр 4-го порядка демонстрирует более характерную для КФ, не содержащих дополнительного ФНЧ, меньшее ослабление. Эффект высокого внеполосного подавления может быть вызван особенностью конструкции фильтра 5-го порядка, и будет детальнее изучен в будущих исследованиях.

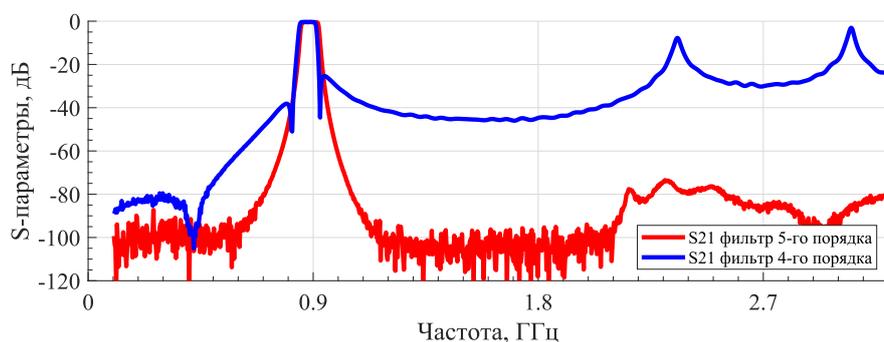


Рисунок 9. Результаты измерений внеполосного подавления КФ в широком диапазоне частот.

Также был проведен анализ фильтров на допустимую мощность, по результатам которого было подтверждено, что оба фильтра имеют достаточно большой запас мощности (порядка тысяч Вт) до наступления электрического пробоя.

3. Заключение

В данной работе представлены результаты разработки двух полосовых фильтров диапазона GSM-900, в которых, для повышения технологичности и снижения стоимости изготовления, не используются подстроечные элементы, а достижение заявленных АЧХ обеспечивается точным э/м моделированием детальной модели фильтра и точностью обработки современного оборудования с ЧПУ. Дополнительно, предложен безопасный способ подключения коаксиального разъема и оригинальный контур герметизации устройства. Результаты измерений прототипов двух вариантов КФ подтвердили возможность создания КФ без подстроечных элементов.

Список литературы

1. Sai Li. et al. Design of Compact Coaxial Cavity Bandpass Filter with High Selectivity // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2019. – С. 1-3.
2. Sabaté. D. Characterization and modelling of a coaxial cavity quadruplet based filter for mobile phone LTE-2 band // Master's thesis. – 2016. – С. 8-75.
3. Thomas. J. B. Cross-Coupling in Coaxial Cavity Filters—A Tutorial Overview // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2003. – Т. 51. – №4. – С. 1368-1376.
4. Hagensen. M. Narrowband Microwave and pass filter Design by Coupling Matrix Synthesis // Guided Wave Technology. – 2018. – С. 2-27.