

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ВНЕПОЛОСНОГО ПОДАВЛЕНИЯ КОМПАКТНЫХ ВХОДНЫХ ПОЛОСОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ И IoT-УСТРОЙСТВ

Марченко Т.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Мадвейко С.И. – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой ЭТТ

Аннотация. Рассмотрены основные методы повышения внеполосного подавления компактных входных полосовых фильтров, применяемых в беспроводных приёмниках и устройствах Интернета вещей. Пояснено назначение внеполосного подавления и кратко описаны методы, основанные на применении открытых шлейфов и нагруженных резонаторов, смешанной электрической и магнитной связи, многопутевых многослойных структур и дефектной структуры земли. Выполнено сравнительное сопоставление указанных подходов по уровню избирательности, сложности реализации и применимости в малогабаритных устройствах.

Ключевые слова: входной полосовой фильтр, внеполосное подавление, нули передачи, беспроводный приёмник, IoT, компактный фильтр.

Введение. Входной полосовой фильтр является одним из основных узлов приёмного тракта беспроводного устройства. Он предназначен для выделения полезной полосы частот и ослабления сигналов, расположенных вне неё. Такое ослабление называют внеполосным подавлением. Его наличие необходимо для уменьшения влияния соседних каналов, паразитных излучений и мощных внеполосных помех на последующие каскады приёмника, в первую очередь на малошумящий усилитель, смеситель и цепи обработки сигнала [1].

Актуальность повышения внеполосного подавления особенно велика для беспроводных приёмников и устройств Интернета вещей, поскольку такие устройства работают в условиях плотного спектрального окружения, а также предъявляют жёсткие требования к габаритам, стоимости и технологичности печатной реализации [2]. В этих условиях повышение избирательности фильтра без существенного увеличения размеров и усложнения конструкции становится важной инженерной задачей.

В данной статье рассмотрены основные методы повышения внеполосного подавления компактных входных полосовых фильтров, кратко пояснены принципы их действия, а также выполнено сравнительное сопоставление указанных методов с точки зрения их практического применения в малогабаритных беспроводных устройствах.

Основная часть. Внеполосное подавление полосового фильтра определяется тем, насколько эффективно он ослабляет сигналы за пределами рабочей полосы частот. Повышение этого параметра обычно достигается за счёт увеличения крутизны скатов амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и формирования дополнительных нулей передачи вблизи полосы пропускания. Чем ближе такие нули передачи расположены к рабочей полосе и чем точнее согласованы параметры резонансной структуры, тем выше избирательность фильтра и тем лучше подавляются мешающие сигналы [3]. Для компактных входных фильтров, применяемых в беспроводных приёмниках и устройствах Интернета вещей (IoT), наибольший интерес представляют методы, позволяющие повысить внеполосное подавление без существенного увеличения площади печатной платы. К таким методам относятся применение открытых шлейфов и нагруженных резонаторов, использование смешанной электрической и магнитной связи, построение многопутевых многослойных структур, а также введение дефектной структуры земли.

Метод открытых шлейфов и нагруженных резонаторов основан на введении в структуру фильтра дополнительных резонансных участков, которые создают нули передачи вблизи полосы пропускания. В качестве таких элементов могут использоваться открытые шлейфы, радиальные шлейфы, а также резонаторы с дополнительной ёмкостной или индуктивной

нагрузкой. При правильном выборе их длины и места подключения удаётся заметно увеличить крутизну скатов амплитудно-частотной характеристики и улучшить подавление сигналов за пределами рабочей полосы. Достоинством данного метода является относительная простота расчёта и реализации на печатной плате. К его недостаткам относятся чувствительность к геометрическим размерам проводников, зазорам и параметрам подложки. [4]. Пример реализации фильтра с использованием этого метода представлен на рисунке 1.

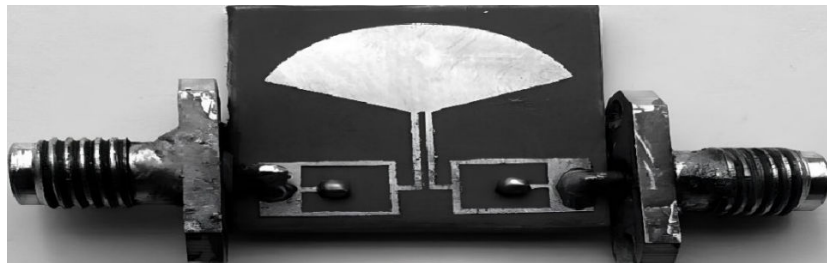


Рисунок 1 – Пример реализации метода открытых шлейфов и нагруженных резонаторов в полосовом фильтре [5]

Метод смешанной электрической и магнитной связи основан на управлении взаимодействием между соседними резонаторами. Если резонаторы расположены таким образом, что между ними одновременно возникают электрическая и магнитная составляющие связи, становится возможным целенаправленно изменять форму амплитудно-частотной характеристики и формировать дополнительные нули передачи. За счёт этого можно усилить подавление сигналов либо со стороны нижнего ската, либо со стороны верхнего ската полосы пропускания. Данный метод удобен тем, что позволяет повысить избирательность фильтра без существенного увеличения его размеров. Однако его реализация требует более точного выбора расстояний между резонаторами и более аккуратного моделирования, поскольку даже небольшие геометрические изменения заметно влияют на результат [6]. Пример реализации такого фильтра представлен на рисунке 2, электрическая связь в данном примере создаётся параллельными низкоомными участками резонаторов, а магнитическая связь – через металлизированное переходное отверстие между высокоомными частями резонаторов.

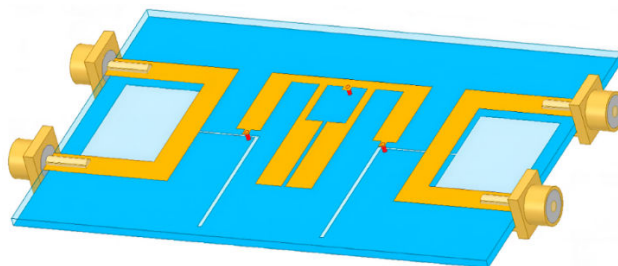


Рисунок 2 – Пример реализации метода смешанной электрической и магнитной связи в фильтре [7]

Метод многопутевых многослойных структур основан на создании нескольких путей прохождения сигнала с различными электрическими длинами и фазовыми задержками. При сложении сигналов, прошедших по этим путям, в отдельных участках частотного диапазона возникает взаимная компенсация, что приводит к образованию нулей передачи и росту внеполосного подавления. Данный подход позволяет получить высокую избирательность и расширенную полосу заграждения, однако обычно требует использования двухслойной или многослойной печатной платы, точного расчёта межслойных переходов и более сложного электромагнитного моделирования [6].

Ещё один способ связан с использованием дефектной структуры земли, то есть локальных вырезов или прорезей в проводнике заземления под фильтром. Такие дефекты изменяют распределение токов возврата и эквивалентные параметры линии, за счёт чего можно получить дополнительные резонансные эффекты и усилить подавление вне рабочей полосы. На практике этот подход часто сочетают с замедляющими структурами и многопроводниковыми резонаторами. Его преимуществом является высокая эффективность,

а ограничением – повышенная чувствительность к точным размерам топологии и к свойствам диэлектрика [8]. На рисунке 3 изображена нижняя сторона платы фильтра, изготовленного с использованием метода дефектной структуры земли.

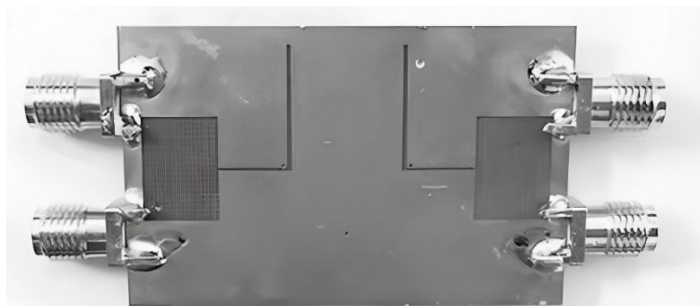


Рисунок 3 – Нижняя сторона платы фильтра, изготовленного с использованием метода дефектной структуры земли [8]

Для наглядного сравнения выявленные методы сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Сравнение методов повышения внеполосного подавления компактных фильтров

Метод	Механизм улучшения подавления	Преимущества	Ограничения
Открытые шлейфы и нагруженные резонаторы	Формирование нулей передачи за счёт дополнительных резонансных ветвей и ответвлений	Простая печатная реализация, хорошая селективность, малая площадь	Требуется аккуратная настройка размеров и связей
Смешанная электрическая и магнитная связь	Смещение нулей передачи к нижней или верхней стороне полосы пропускания	Гибкая настройка формы АЧХ без существенного увеличения габаритов	Повышенная чувствительность к геометрии связи
Многопутевые многослойные структуры	Получение нескольких нулей передачи за счёт интерференции сигналов и межслойных связей	Высокое подавление, расширенная полоса заграждения	Более сложное моделирование и изготовление
Дефектная структура земли	Изменение токов возврата и эквивалентных параметров линии с образованием дополнительных резонансных эффектов	Высокая эффективность подавления вне полосы	Чувствительность к размерам топологии и параметрам подложки

Сравнение рассмотренных методов показывает, что каждый из них обладает своими преимуществами и ограничениями. Открытые шлейфы и нагруженные резонаторы являются наиболее простыми в расчёте и реализации, поэтому хорошо подходят для компактных входных фильтров малогабаритных беспроводных устройств. Смешанная электрическая и магнитная связь позволяет более гибко управлять формой амплитудно-частотной характеристики и положением нулей передачи, однако предъявляет более высокие требования к точности геометрии. Многопутевые многослойные структуры обеспечивают высокий уровень внеполосного подавления и широкую полосу заграждения, но связаны с усложнением конструкции и технологии изготовления. Дефектная структура земли также позволяет существенно повысить подавление вне рабочей полосы, однако чувствительна к параметрам подложки и точности топологии.

На основании проведённого сопоставления можно сделать вывод, что для компактных входных фильтров беспроводных и IoT-устройств наиболее рациональными являются методы, основанные на использовании открытых шлейфов, нагруженных резонаторов и смешанной электрической и магнитной связи. Эти подходы обеспечивают хороший компромисс между уровнем внеполосного подавления, занимаемой площадью и сложностью реализации. Многопутевые многослойные структуры и дефектная структура земли более целесообразны в

тех случаях, когда приоритетом является достижение максимально высокой избирательности и допускается усложнение конструкции фильтра.

Заключение. Рассмотрены основные методы повышения внеполосного подавления компактных входных полосовых фильтров для беспроводных приёмников и IoT-устройств. Показано, что повышение селективности достигается за счёт формирования дополнительных нулей передачи, управления связью между резонаторами, применения многослойных структур и дефектов в проводнике земли. Для печатных устройств малого размера наиболее рациональны методы на основе открытых шлейфов, нагруженных резонаторов и смешанной связи, так как они обеспечивают хороший компромисс между уровнем подавления, занимаемой площадью и сложностью реализации.

Список литературы

1. Авгари, Ф.С.А. Микрополосковый эллиптический фильтр с реализацией на резонаторах одинаковой электрической длины / Ф.С.А. Авгари, А.Р. Кубалова, А.П. Максимов // Труды учебных заведений связи. – 2017. – Т. 3, № 4. – С. 5–15.
2. Фомин Д.Г. Моделирование полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной технологии / Д.Г. Фомин [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 77–87.
3. Семерня Р.Е. Разработка топологии компактных квазиэллиптических полосовых микрополосковых фильтров / Р.Е. Семерня [и др.] // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2018. – Т. 21, № 6. – С. 41–53.
4. Yang L. Miniaturized Broadband High Out-of-Band Rejection Bandpass Filter Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons with Defected Ground Structure / L. Yang [et al.] // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Art. 26722.
5. Singh, P. K. Design of Radial Microstrip Band Pass Filter with Wide Stop-Band Characteristics for GPS Application / P. K. Singh, A. K. Tiwary, N. Gupta // Progress In Electromagnetics Research C. – 2015. – Vol. 59. – P. 127–134.
6. Савишиников М.О. Миниатюрный полосно-пропускающий СВЧ-фильтр со сверхглубоким уровнем подавления в широкой полосе заграждения / М.О. Савишиников // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2019. – Т. 12, № 7. – С. 758–764.
7. Li, Q. Optimization and Design of Balanced BPF Based on Mixed Electric and Magnetic Couplings / Q. Li, J. Fang, W. Cao [et al.] // Electronics. – 2023. – Vol. 12, No. 9. – Art. 2125.
8. Бугров В.Н., Кудряшова О.Е., Козлов С.А. Оптимальное проектирование микрополосковых устройств: практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2022. – 34 с.

UDC 621.372.543.2

METHODS FOR IMPROVING OUT-OF-BAND SUPPRESSION OF COMPACT INPUT BANDPASS FILTERS FOR WIRELESS AND IoT DEVICES

Marchenko T.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Scientific supervisor: Madveyko S.I. – Cand. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Electronic Engineering and Technology

Annotation. The paper considers methods for improving the out-of-band suppression of compact input bandpass filters used in wireless receivers and IoT devices. The role of out-of-band suppression is explained, and it is shown that its improvement is achieved by generating additional transmission zeros, controlling the coupling between resonators, using multilayer structures, and introducing defects in the ground conductor. The considered approaches are compared in terms of selectivity, manufacturability, and implementation complexity on a printed circuit board. It is shown that open stubs, loaded resonators, and controllable cross-coupling are the most practical solutions for compact devices.

Keywords: input bandpass filter, out-of-band suppression, transmission zeros, wireless receiver, IoT, compact filter.