

Полосовые LC-фильтры СВЧ диапазона

Т.С. Тимошенко, А.В. Шорохова, А.А. Тюменцева, А.И. Тюменцев, Ю.И. Егошин

АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения»

Аннотация: в работе рассмотрены варианты реализации полосовых высокоизбирательных СВЧ-фильтров. Проведено моделирование полосового узкополосного LC-фильтра СВЧ диапазона, приведены результаты измерений широкополосного СВЧ-фильтра и его конструкция. Полученные результаты показывают корректность предложенных схемных и конструктивных решений для реализации, как узкополосных, так и широкополосных высокоизбирательных полосовых фильтров СВЧ-диапазона.

Ключевые слова: СВЧ-фильтр, полосовой фильтр, LTCC, LC-фильтр

1. Введение

Как известно, за счет простоты реализации в производстве, широкого диапазона реализуемых полос пропускания, а также возможности работы с сигналами большого уровня LC-фильтры широко применяют в устройствах современных устройств связи. Однако, с ростом рабочей частоты, такие фильтры применяются все реже, в связи с возможностью физической реализации значений элементов схем в СВЧ-диапазоне. Количество схемных решений для реализации полосовых LC-фильтров СВЧ диапазона существенно ограничено и, в основном представляют собой схемы на связанных контурах, при этом конструкции фильтров также имеют ряд особенностей в связи с тем, что на частотах выше 1 ГГц значения элементов уже равны нескольким единицам пФ и нГн и уменьшаются с ростом частоты [1].

В данной работе авторами приведены некоторые схемные и конструктивные решения, позволяющие реализовать LC-фильтры СВЧ диапазона с различными полосами пропускания.

2. Подход к конструированию LC-фильтров СВЧ диапазона

При расчете фильтров с полосой пропускания до 40-50% [2], зачастую, применяют различные модификации схем на связанных контурах. Основным недостатком таких схем является асимметрия АЧХ, выраженная в ухудшении затухания слева, либо справа от полосы пропускания. Для широкополосных схем (полоса пропускания которых более 50%) используют схемы на основе каскадного включения ФНЧ и ФВЧ, несмотря на то, что такие схемы обладают избыточностью элементов по сравнению с классическими схемами на связанных контурах, позволяют реализовать высокий уровень избирательности и симметрию АЧХ.

В работе [3] была получена схема полосового LC-фильтра СВЧ диапазона с улучшенным подавлением в полосе задерживания по сравнению со схемами на связанных контурах. На рисунке 1а приведена схема, подходящая для реализации узкополосных фильтров в СВЧ диапазоне, которая обладает симметричностью АЧХ и высокой селективностью, а также ее расчетная АЧХ (рисунок 1б).

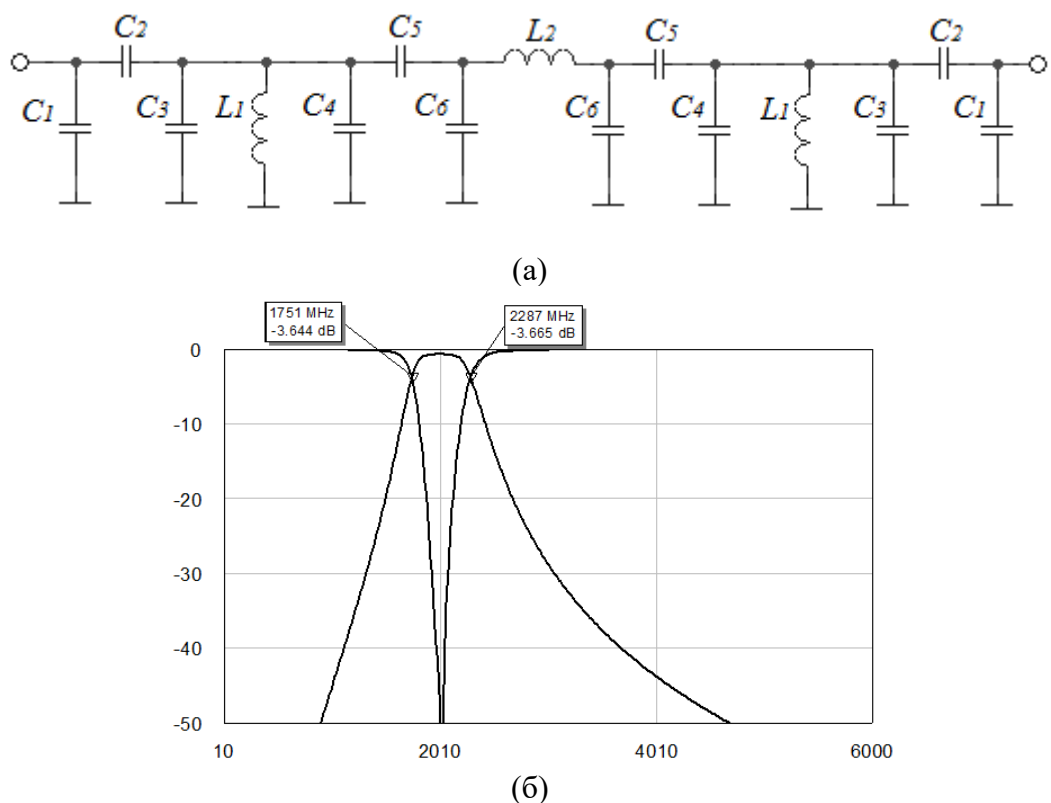


Рисунок 1. Схема LC-фильтра СВЧ диапазона (а), АЧХ (б)

Также существенным преимуществом такой схемы является небольшое количество индуктивностей, что существенно упрощает физическую реализацию таких фильтров.

На рисунке 2а приведена схема LC-фильтра на основе каскадного включения ФНЧ и ФВЧ, которая позволяет реализовать широкие полосы (более 50%) пропускания в СВЧ диапазоне.

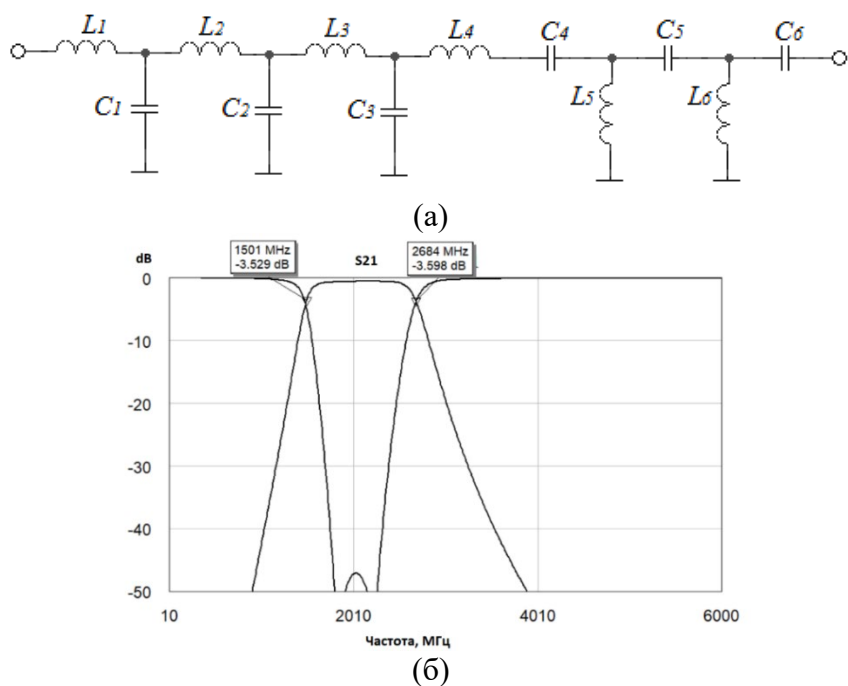


Рисунок 2. Схема LC-фильтра на основе каскадного включения ФНЧ и ФВЧ (а), АЧХ (б)

Из рисунка 2 б видно, что АЧХ такой схемы симметрична и обладает высоким уровнем затухания за полосой.

3. Варианты конструктивной реализации полосовых LC-фильтров

Как известно с ростом рабочей частоты увеличивается и влияние на АЧХ фильтра его конструкции, выбранных материалов, качество заземления. Как правило, зарубежными компаниями (KR Electronics, K&L, Spectrum Microwave) для реализации высокочастотных фильтров СВЧ-диапазона применяются конструкции во фрезерованных корпусах, в том числе и под поверхностный монтаж. На рисунке 3 приведены некоторые конструкции СВЧ фильтров.

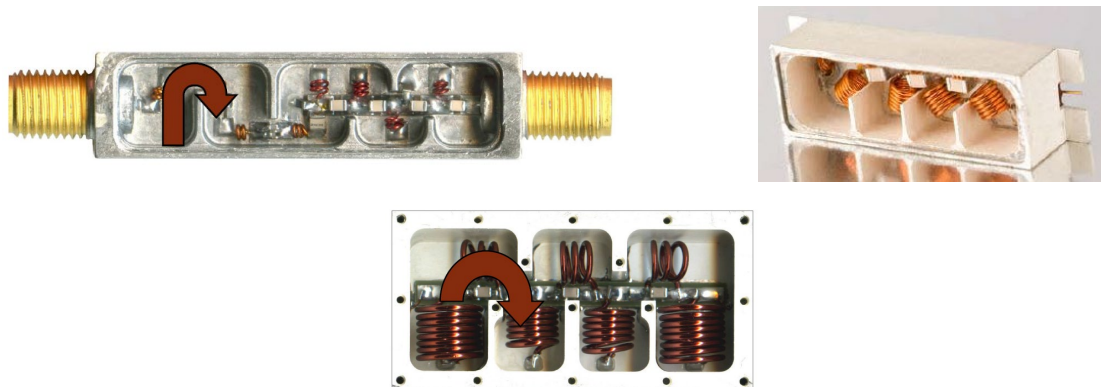


Рисунок 3. Варианты конструктивного исполнения СВЧ LC-фильтров

Такие решения позволяют улучшить затухание фильтров в дальней зоне и минимизировать влияние конструктивных реактивностей в СВЧ диапазоне, однако такой подход увеличивает габаритные размеры фильтров за счет применения высокочастотных разъемов и внешних SMD выводов. Также такие конструкции нетехнологичны из-за большого количества операций при изготовлении корпусов и большого отхода используемых материалов.

4. Экспериментальные результаты

Для проверки физической реализации предложенных схемных решений в качестве типовой конструкции LC-фильтров СВЧ диапазона был реализован фильтр на многослойной керамической плате. Для фильтра с центральной частотой $f_0=2000$ МГц и полосой пропускания 65% была выбрана схема на основе каскадного включения ФНЧ 7-ого порядка и ФВЧ 5-ого порядка (рисунок. 2а). Расчет схемы [4] показал, что номинальные значения конденсаторов не превышают значений 1-2 пФ, а катушек индуктивности 1-5 нГн. На рисунке 4а приведена конструкция макета такого полосового LC-фильтра. Конструктивно фильтр выполнен на многослойной керамической плате, которая также является основанием. После настройки фильтра плата соединяется с металлической крышкой токопроводящим клеем ТОК-2. Многослойная плата и конденсаторы ФНЧ выполнены из отечественной низкотемпературной керамики СКМ-025, Бескаркасные катушки индуктивности выполнены с воздушным зазором проводом ПЭТВ-2-0,45.

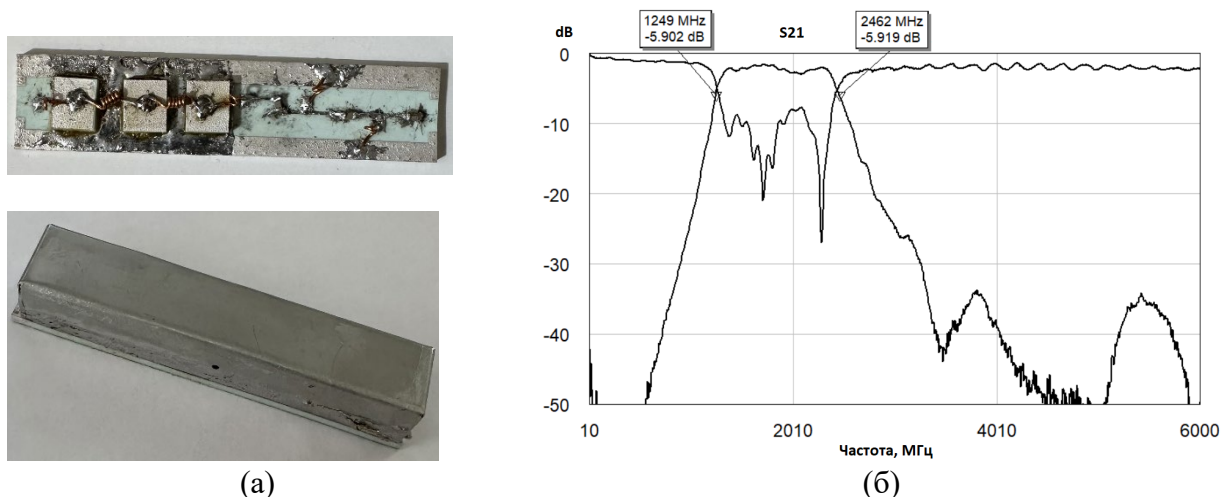


Рисунок 4. Макет LC-фильтра с центральной частотой 2000 МГц (а), АЧХ макета LC-фильтра (б)

На рисунке 4 б приведена АЧХ макета фильтра. Как видно, Характер АЧХ повторяет расчетный, а отличия обусловлены качеством заземления макета, наличием дополнительных монтажных реактивностей и метрологическими неточностями, которые будут устранены при дальнейшем изготовлении опытных образцов.

5. Заключение

В работе показана возможность реализации полосовых LC-фильтров в диапазоне частот до 2 ГГц, предложены варианты схемных решений, позволяющие реализовать как узкополосные (до 40-50%), так и широкополосные фильтры (до 50%) с высокой избирательностью (более 40 дБ), малыми вносимыми потерями (до 3 дБ). Предложена типовая конструкция фильтров СВЧ диапазона под поверхностный монтаж, которая позволяет улучшить технологичность изготовления фильтров и уменьшить их габаритные размеры. Приведены результаты схемотехнического моделирования и сравнение их с полученными экспериментальными данными, которые подтвердили возможность реализации выбранных схемных и конструктивных решений LC-фильтров на частотах до 2 ГГц.

Список литературы

1. Борейко Д. А., Егошин Ю. И. Варианты реализации интегральных подстроечных конденсаторов // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VII Международной научно-технической конференции (4–6 октября 2023 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2023. С. 192–194.
2. Handbook of Filter Synthesis. A.I. Zverev. 1967, 600 p.
3. Тюменцев А.И., Яковлев А.Н. Расчет полосового LC-фильтра СВЧ-диапазона // Техника радиосвязи– 2023. - № 1. – С. 91–97.
4. Босый Н.Д. Электрические фильтры. – К: Киев, 1959.