

Разработка полосовых фильтров на основе интегрированного волновода для оборудования 5G

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

ООО «Радио Гигабит»

Аннотация: Данная работа посвящена разработке полосовых фильтров на основе интегрированного волновода (SIW-фильтров), выполненных на печатной плате (ПП). Такие фильтры необходимы для систем 5G верхнего диапазона FR2 (24.25–53 ГГц) и могут быть интегрированы в СВЧ модуль вместе с приемопередатчиком и антенной, на единой ПП. Для минимизации уровня вносимых фильтром потерь было проведено экспериментальное исследование двух материалов ПП: Rogers RT/Duroid 5880 и Nelco 9220. Результаты моделирования и лабораторных измерений фильтров показали хорошее соответствие и подтвердили выполнение исходно поставленных требований к фильтрам.

Ключевые слова: интегрированный в подложку волновод, SIW, полосовой фильтр, 5G

1. Введение

Интегрированный в подложку волновод (substrate integrated waveguide, SIW) образован смежными слоями металлизации ПП, а его боковыми стенками служат ряды переходных металлизированных отверстий (via), шаг между которыми выбран определенным образом [1]. SIW можно характеризовать как эквивалентный ПрМВ с диэлектрическим заполнением, но выполненный с помощью стандартного техпроцесса производства ПП на органических подложках. Это обуславливает технологичность применения SIW в системах мм-диапазона, особенно в радиомодулях 5G с высокой степенью интеграции компонентов. Так, например, антенна, полосовой РЧ-фильтр и модуль приемопередатчика могут быть выполнены на одной ПП.

Основа рассматриваемых SIW-фильтров – это резонаторы, которые образованы из участков SIW добавлением дополнительных стенок из via. Как правило, используются резонаторы главной моды TE_{101} , однако, для формирования дополнительных нулей передачи может быть использован и резонатор высшей моды TE_{102} [2]. Положительная связь между резонаторами осуществляется через индуктивные апертуры в боковых стенках. При увеличении порядка фильтра уровень изоляции в соседней полосе увеличивается, однако, растут вносимые фильтром потери из-за относительно низкой добротности резонаторов ($Q < 800$). Поэтому актуально использование диэлектриков с низким тангенсом диэлектрических потерь, порядка $1e-4$. Кроме того, добиться требуемого уровня изоляции в соседней полосе без существенного увеличения порядка фильтра можно путем добавления перекрестных связей в фильтр, благодаря которым удается синтезировать дополнительные нули передачи (TZ) и повысить крутизну ската АЧХ фильтра. Так, для регуляторного соответствия рассматриваемой 5G системы требуется полоса запираания 0.48 ГГц (1.6%) по уровню –25 дБ.

В работе [3] приведены результаты исследований SIW-фильтра 4 порядка с центральной частотой 28 ГГц и полосой 0.6 ГГц (2.1%), имеющего 1 диагональную связь между первым и третьим резонаторами. Этот фильтр выполнен на материале Rogers 5880 толщиной 0.508 мм и имеет уровень вносимых потерь 2.7 дБ, а уровень коэффициента отражения не превышает –15 дБ. Полоса запираания по уровню –40 дБ составляет 0.7 ГГц (2.5%). Основными недостатками такого фильтра являются недостаточный уровень изоляции, а также наличие паразитной гармоники вблизи полосы запираания.

В работе [4] приведены результаты исследований SIW-фильтра 4 порядка с центральной частотой 10 ГГц и полосой 0.2 ГГц (2%), имеющего 1 перекрестную связь

между первым и четвертым резонаторами, реализованную с помощью дополнительной микрополосковой линии. Этот фильтр имеет уровень вносимых потерь 2.6 дБ, а уровень коэффициента отражения не превышает -14 дБ. Полоса запираания по уровню -30 дБ составляет 0.1 ГГц (1%). Основными недостатками данного фильтра являются недостаточный уровень изоляции и использование участка открытой микрополосковой линии, подверженной внешним влияниям.

В работе [2] приведены результаты исследований SIW-фильтра 4 порядка с центральной частотой 35 ГГц и полосой 1.3 ГГц (3.7%), имеющего дополнительную перекрестную связь. Этот SIW-фильтр выполнен на материале Rogers 6002 толщиной 0.508 мм и имеет уровень вносимых потерь 1.25 дБ, а уровень коэффициента отражения не превышает -15 дБ. Полоса запираания по уровню -30 дБ составляет 0.35 ГГц (1%). Данный фильтр, потенциально соответствующий требованиям системы, был выбран в качестве аналога для исследования. Среди всех рассмотренных, он наиболее высокочастотный, обладает наибольшим уровнем изоляции (за счет двух диагональных связей), а также наименьшим уровнем вносимых потерь.

2. Постановка требований и оптимизация модели SIW фильтров

Основные технические требования к разрабатываемым SIW-фильтрам приведены в таблице 1.

Таблица 1 Требования к разрабатываемым SIW-фильтрам

Рабочие полосы частот, ГГц	#1: 27.54...28.08 ГГц #2: 28.55...29.08 ГГц
Вносимые / обратные потери в полосе	< 2 дБ / > 15 дБ
Изоляция в соседнем канале	не менее 25 дБ
Ширина полосы запираания между полосами	0.48 ГГц (1.6%);

Материалы Rogers 5880 [5] и Nelco 9220 [6] являются фактически чистыми политетрафторэтиленами (PTFE), благодаря чему они обеспечивают минимальные диэлектрические потери в СВЧ схемах, реализованных на печатных платах ($D_k = 2.2$ $D_f = 0.0009$).

Топология разработанного полосового SIW-фильтра #1 и граф связей представлены на Рис. 1а. Фильтр #2 отличается только размерами резонаторов и не показан на рисунке. АЧХ фильтров #1 и #2 асимметричные и имеют один нуль передачи по правую и левую стороны от полосы пропускания соответственно. Первый, третий и четвертый резонаторы фильтра #1 настроены на первую моду TE_{101} , а связи между ними осуществляются через индуктивные апертуры (“положительная” связь). Второй резонатор фильтра #1 настроен на высшую моду TE_{102} . Благодаря этому, в сигнальном пути 1-3-4 появляется отрицательная связь при определенной настройке резонансной частоты резонатора 2, за счет которой и появляется действительный нуль передачи справа от полосы пропускания [2].

Используя значения матрицы коэффициентов связи между резонаторами и физические реализации топологий, были синтезированы АЧХ и определены начальные геометрические размеры топологии фильтров #1 и #2, удовлетворяющие заданным требованиям. Финальная настройка каждого фильтра проводилась с помощью числовой оптимизации по целевым функциям.

Несмотря на значительное количество неизвестных переменных (около 8), оптимизация не занимает существенного времени. Происходит это благодаря ускорению расчетов путем адаптации сетки к каждой итерации параметров, когда при изменении геометрических размеров фильтра, его числовая электромагнитная модель

не создается заново, а синтезируется из предыдущей, что позволяет в разы уменьшить затрачиваемое на каждую итерацию расчетное время.

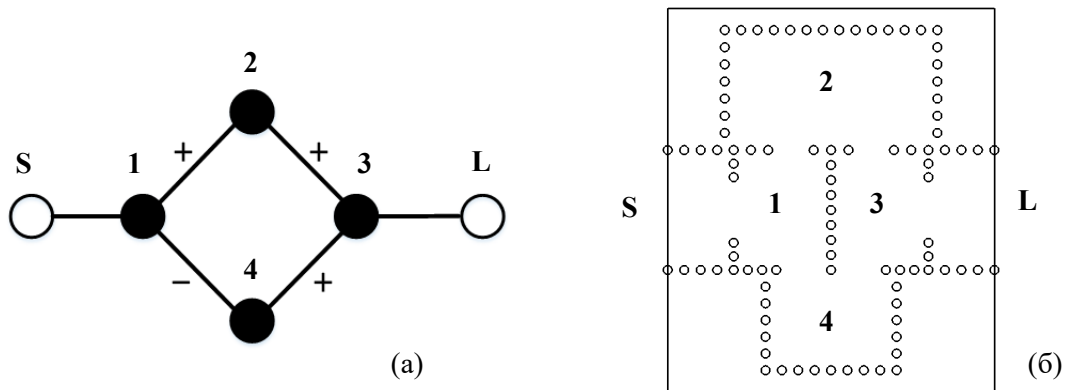


Рисунок 1. Граф связей между резонаторами (а) и топология (б) разработанного SIW-фильтра #1

Результаты моделирования частотных характеристик SIW-фильтров #1 и #2 представлены на Рис.2. Согласно результатам моделирования минимальный уровень вносимых фильтрами потерь в полосе пропускания составляет всего 0.8 дБ, а максимальный уровень достигает 1.1 дБ на краю полосы пропускания. Коэффициент отражения по входу обоих фильтров не выше -20 дБ во всей полосе пропускания. Уровень подавления в соседней полосе каждого фильтра не хуже 25 дБ в полосе изоляции и даже превышает его в остальной полосе, составляющей более 5 ГГц, что, например, позволяет подавлять паразитные спектральные компоненты передатчика.

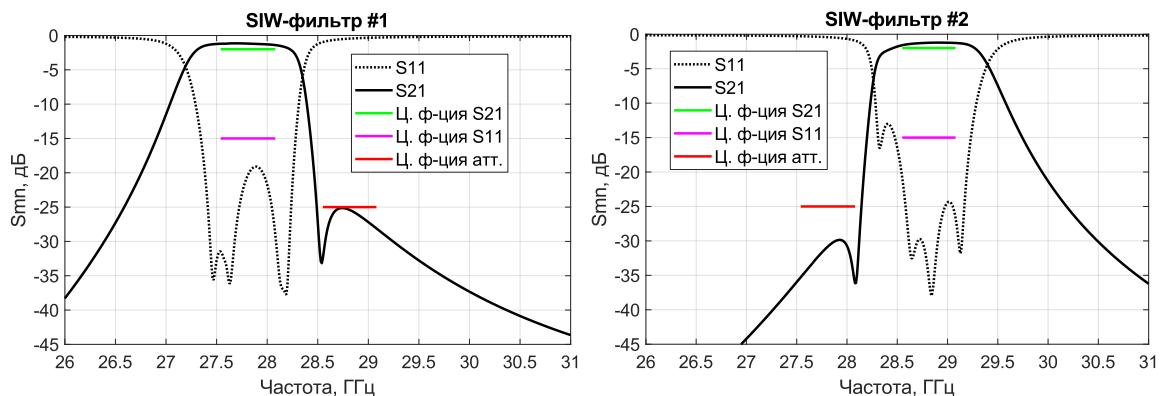


Рисунок 2. Результаты моделирования SIW-фильтр поддиапазонов #1 (слева) и #2 (справа)

3. Анализ производственных отклонений

Для разработанных SIW-фильтров существует по крайней мере два источника производственных отклонений геометрических размеров от номинальных, которые могут существенно повлиять на характеристики устройства: допуски технологии изготовления печатных плат и допуски изготовления ламината для печатных плат.

Было проведено дополнительное электродинамическое моделирование фильтров с учетом произвольной вариации указанных параметров в диапазоне предельных отклонений. Основные числовые оценки результатов моделирования устойчивости разработанных фильтров к производственным допускам показывают, что SIW-фильтры устойчивы к заявленным производителем вариациям диэлектрической проницаемости материала RT5880 (± 0.1), а допуск на позицию центра и внешний

диаметр металлизированных переходных отверстий не должен превышать ± 20 мкм для выполнения требований техзадания.

4. Прототипы и результаты измерений SIW-фильтров

Лабораторные измерения были проведены для пяти образцов SIW-фильтров #1 и #2. На Рис.3 представлены фотографии изготовленных структур для измерений фильтров с переходами от SIW к волноводу WR28. На фотографии справа показаны разработанные переходы зондового типа, фланцы которых непосредственно подключаются к измерительному оборудованию (ВАЦ Keysight PNA N5224).

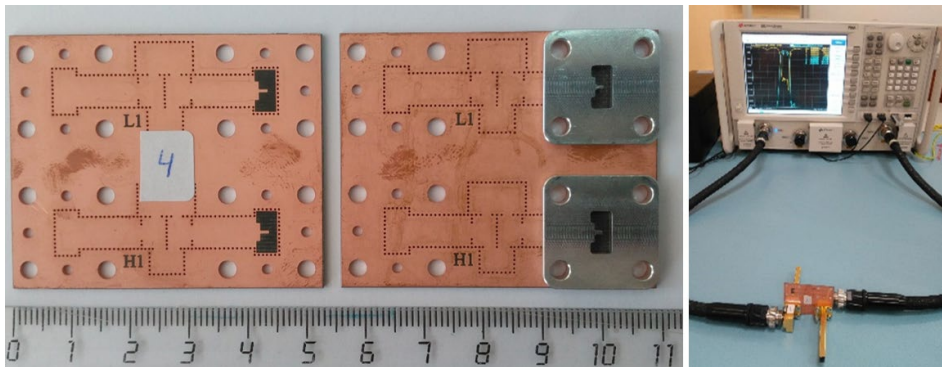


Рисунок 3. Прототипы SIW-фильтров с переходами зондового типа (а) и измерительный стенд (б)

Результаты лабораторных измерений прототипов SIW-фильтров, изготовленных на материале Rogers 5880 представлены на Рис.4. Характеристики SIW-фильтров сохраняются от образца к образцу и хорошо коррелируют с результатами моделирования на протяжении широкой полосы частот и в широком динамическом диапазоне.

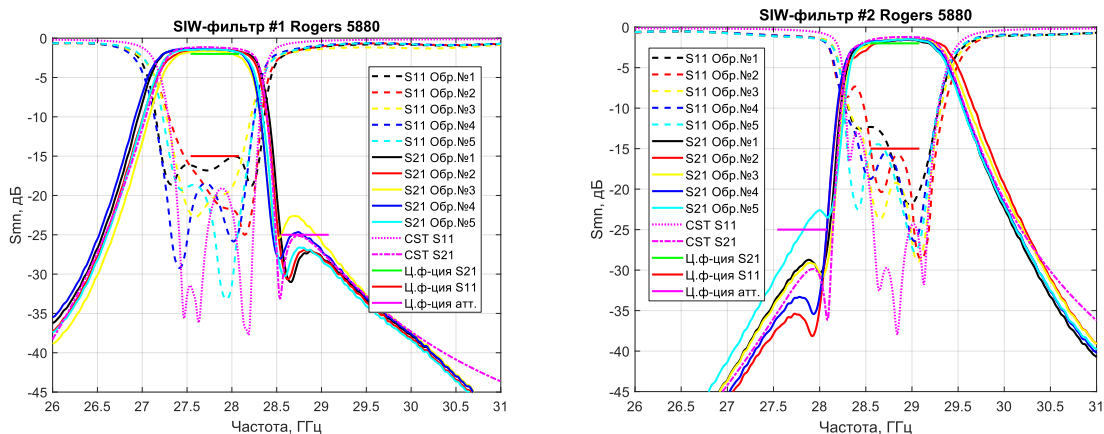


Рисунок 4. Результаты измерений SIW-фильтров #1(а) и #2 (б) изготовленных на материале Rogers 5880

Разработанные SIW-фильтры были дополнительно изготовлены на материале Nelco 9220 – аналоге Rogers 5880, заявленные спецификацией электрические характеристики которого полностью совпадают с приведенными выше характеристиками Rogers 5880. Исключение составляет лишь высота подложки, которая в данном случае равна 0.762 мм. Согласно результатам электромагнитного моделирования, подобное изменение высоты волновода не влияет на АЧХ фильтра.

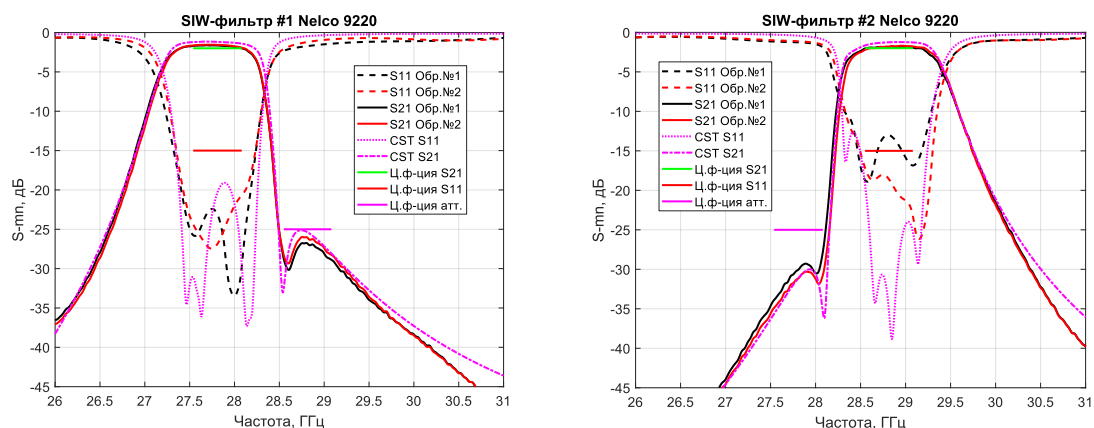


Рисунок 5. Результаты измерений SIW-фильтров #1 (а) и #2 (б) на материале Nelco

Результаты лабораторных измерений SIW-фильтров #1, #2 разработанных на материале Nelco 9220 представлены на Рис.5. Характерный уровень вносимых потерь в рабочей полосе фильтров составляет 1.5...2 дБ для фильтров, выполненных на материале Rogers 5880 и 1.7...2.2 дБ для фильтров, выполненных на материале Nelco 9220. Увеличение уровня вносимых потерь в материале Nelco без видимого сдвига полосы фильтра относительно характеристик фильтров на Rogers может быть вызвано более высокой шероховатостью медной фольги ламината Nelco.

5. Заключение

В работе показаны результаты разработки и экспериментального исследования полосовых SIW-фильтров, предназначенных для интеграции в модули 5G диапазона FR2. Фильтры выполнены на ПП с одним слоем диэлектрической подложки и были изготовлены на двух материалах Roger RT/Duroid 5880 и Nelco 9220. Согласно результатам измерений, разработанные SIW-фильтры могут быть выполнены на обоих материалах, при этом АЧХ фильтров сохраняются, за исключением вносимых в полосу пропускания потерь, которые возрастают на величину порядка 0.2 дБ для Nelco. Было проведено исследование по устойчивости фильтров к неточностям изготовления и производственным допускам, по результатам которого показана высокая чувствительность фильтров к допуску производителя ПП на позицию и наружный диаметр сквозного металлизированного отверстия, который должен быть специфицирован в диапазоне ± 20 мкм (drill diameter).

Список литературы

1. M. Kirillova, et al., "A Novel Technique for Operational Band Extension of SIW-Based Resonant Slot Array Antennas for 5G," 2023 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 26-30
2. X. Chen, Ke Wu. Self-Packaged Millimeter-Wave Substrate Integrated Waveguide Filter With Asymmetric Frequency Response. IEEE Transactions On Components, Packaging And Manufacturing Technology, Vol. 2, No. 5, May 2012
3. L. Ma, J. Zhuang, J. Zhou. A Cross-Coupled Substrate Integrated Waveguide Filter for 28 GHz Millimeter Wave Communications. IEEE Proceedings. 2016.
4. X. Chen, W. Hong, T. Cui, Z. Hao, and K. Wu, "Substrate integrated waveguide elliptic filter with transmission line inserted inverter," Electron Lett, vol. 41, pp. 851-852, 2005
5. Электронный ресурс URL: <http://www.rogerscorp.com/acs/products/32/RT-duroid-5880-Laminates.aspx>
6. Электронный ресурс URL: <https://parkelectro.com/rfmicrowave-printed-circuit-materials/>