

МИКРОВОЛНОВОЕ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩЕЕ ФИЛЬТРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПРОВОДЯЩИХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Н.Г. МАРГАРЯН*, Г.А. ОГАНЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: narek.margaryan@ysu.am

(Поступила в редакцию 29 августа 2025 г.)

В работе представлено экспериментальное исследование новой архитектуры микроволнового полосно-пропускающего фильтра, выполненного на взаимодействующих проводящих кольцевых резонаторах. Используя внутреннее резонансное поведение медных колец, конструкция формирует несколько узких полос пропускания в диапазоне частот 1–12 ГГц. Путем систематического изменения как расстояния между резонаторами, так и количества колец, определена оптимальная конфигурация. В частности, при расстоянии между кольцами 6.75 мм имеет место максимальная добротность и амплитуда пропускания. Экспериментальные результаты показывают отчетливые резонансы на частотах 2.2, 4.2, 6.6, 8.6 и 11.2 ± 0.2 ГГц, соответствующих основной и высшим гармоническим модам. Продемонстрированный механизм фильтрации, характеризующийся компактным размером оборудования, настраиваемой частотной характеристикой и низкими вносимыми потерями, предлагает масштабируемое решение для современных систем беспроводной связи. Результаты указывают на значительный потенциал для интеграции в сети 5G нового поколения и в перспективе сети 6G, обеспечивая экономически эффективную альтернативу традиционным конструкциям фильтров.

1. Введение

Экспоненциальный рост беспроводных технологий, вызванный 5G и ожидаемым 6G, усилил спрос на микроволновые фильтры с высокой эффективностью, низкими потерями и компактностью [1, 2]. Традиционные методы на сосредоточенных элементах и распределенных линиях десятилетиями доминировали в проектировании [3], но с ростом частот и интеграции они сталкиваются с проблемами масштаба, потерь и настраиваемости.

Для преодоления этого используются метаматериалы — искусственные структуры с уникальными свойствами [4], обеспечивающие контроль волн для фильтров с крутыми спадами и селективностью. Резонаторные элементы, такие как SRR и CSRR, демонстрируют потенциал миниатюризации и ограничения энергии [5]. Оптические исследования плазмонных цепочек с нанометровыми зазорами реализовали SSH-аналоги, показав ультрасильную связь и топологические состояния [6]. Это иллюстрирует роль геометрического контроля связи в

коллективном отклике и вдохновляет на изучение связанных резонаторов на микроволновых частотах, предлагая простой масштабируемый подход [7]. Резонанс зависит от размеров кольца, связь — от расстояния, оптимизируемого для фильтрации.

Предыдущие работы по кольцевым резонаторам подтвердили применимость в многополосных 5G/6G [8]. Резонансные техники подчеркивают баланс миниатюризации и производительности. Недавние исследования фокусируются на эволюции фильтров для динамичных сетей [9] и многополосных конфигурациях для 6G с акцентом на адаптивность.

В работе изучена архитектура фильтра на медных кольцевых резонаторах. Варьирование расстояния и количества проясняет механизмы связи, оптимизируя добротность и амплитуду. Анализ расширяет понимание взаимодействий и интеграцию в будущие системы. Феномен волны Зоммерфельда описывает распространение вдоль изогнутых структур. Поверхностные волны формируют локализованные моды с минимальными потерями, улучшая добротность и эффективность в резонаторах.

2. Материалы и методы

Настоящее исследование представляет собой всестороннюю экспериментальную основу, разработанную для изучения производительности микроволновых полосно-пропускающих фильтров, использующих взаимодействующие проводящие кольцевые резонаторы. Методология охватывает четыре основных компонента: изготовление резонаторов, модульная сборка и выбор межрезонаторного расстояния, экспериментальная установка и протокол измерений, а также анализ данных.

Резонаторы были тщательно изготовлены из меди высокой чистоты, чтобы обеспечить однородные электрические и механические свойства. Каждый резонатор был сформирован в виде круглой петли с внутренним диаметром 36 мм и толщиной стенки 1.75 мм, что привело к общей длине провода приблизительно 125 мм. Эта конкретная конфигурация была выбрана для достижения основной резонансной частоты около 2.4 ГГц, что соответствует стандартным частотам микроволновой связи. Геометрические параметры резонаторов были точно контролированы, чтобы обеспечить точную корреляцию между их размерами и результирующей частотной характеристикой, тем самым позволяя осуществлять точную настройку частоты.

Для систематического изучения влияния межрезонаторной связи на производительность фильтра была разработана модульная система сборки с использованием 3D-печатных пластиковых компонентов (рис.1). Были изготовлены специально разработанные рельсы (рис.1b) для обеспечения точного и повторяемого позиционирования резонаторов. Каждая рейка имела пазы шириной $l_1=1.75$ мм, соответствующей диаметру медной проволоки, и межпазовые расстояния $l_2=2.5$ мм. Такая конструкция позволяла контролируемо варьировать межрезонаторное расстояние, рассчитываемое по арифметической прогрессии: $Ln = l_2 + (n-1)d$, где $d = l_1 + l_2$.

Эта конфигурация давала конкретные межрезонаторные расстояния 2.5, 6.75, 11, 15.25 и 19.5 мм, что облегчало систематическое исследование эффектов

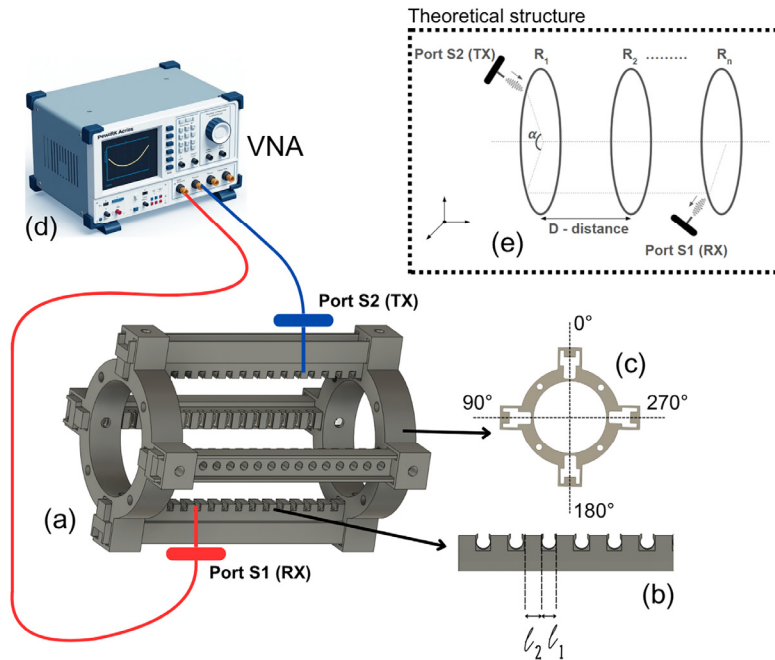


Рис.1. Общая экспериментальная схема: (a) полная собранная модель; (b) рельсы, используемые в модели, где l_1 — ширина паза (отверстия), l_2 — ширина разделительной секции между пазами; (c) крепление, используемое для закрепления рельсов и фиксации их угловых положений; (d) векторный анализатор цепей (VNA) с портами; (e) теоретическая структура системы, где R_x обозначает x -е кольцо, D — расстояние между соседними кольцами, α — угол, образуемый портами S1 и S2 относительно линии, соединяющей центры колец.

связи между резонаторами. Точность модульной сборки обеспечивала последовательное и воспроизводимое расстояние, что является критическим для анализа влияния межрезонаторных расстояний на характеристики фильтра.

Эксперимент проводился с использованием высокоточного векторного анализатора цепей Rohde & Schwarz ZNB20 (VNA) (рис.1d), в широком диапазоне частот. В каждой экспериментальной конфигурации один резонатор функционировал как передатчик (TX), подключенный к порту S2 VNA, а другой служил приемником (RX), подключенным к порту S1. Параметр передачи S21 измерялся в диапазоне частот от 1 до 12 ГГц для полного охвата характеристики фильтра. Теоретическая структура системы представлена на рис. 1e. Оценка приборной неопределённости: статическая точность частоты $\approx \pm 12$ кГц при 2.2 ГГц для 4-летнего прибора; системный динамический диапазон для ZNB20 ≥ 125 дБ, типично ~ 135 дБ в 0.1–9 ГГц; дрейф амплитуды < 0.01 дБ/°C.

В исследуемой конструкции доминируют радиационные потери: при отклонении межрезонаторного расстояния D от оптимального усиливается излучение и снижается добротность Q . Проводниковые потери (скин-эффект, шероховатость меди) и диэлектрические потери ($\tan \delta$ подложки/окружающей среды) дают дополнительный вклад, который возрастает с частотой.

Было проведено два различных набора экспериментов. 1) Переменное меж-

резонаторное расстояние. В конфигурации, состоящей из трех резонаторов. Расстояние между соседними кольцами систематически варьировалось с использованием дискретных значений, предоставляемых модульной сборкой. Были исследованы все возможные комбинации размещения TX и RX, с угловыми конфигурациями, установленными на 90° и 180° относительно линии, соединяющей центры резонаторов. Этот подход позволил провести детальный анализ того, как межрезонаторное расстояние влияет на характеристики передачи фильтра. 2) Переменное количество резонаторов. Во второй серии экспериментов межрезонаторное расстояние фиксировалось на 2.5 мм, в то время как общее количество резонаторов постепенно увеличивалось с трех до четырех, а затем до пяти. Эта методология была направлена на оценку влияния количества резонаторов на характеристики передачи и амплитуды резонансов, предоставляя представление о масштабируемости конструкции фильтра.

Для обеспечения ясности и воспроизводимости была принята систематическая маркировка для каждой измерительной конфигурации. Формат следующий: $N_R_i_R_j_ \alpha_ D$, где: N — общее количество колец в системе; R_i — индекс кольца, используемого в качестве приемника (RX); R_j — индекс кольца, используемого в качестве передатчика (TX); α — угол (в градусах) между передающим (S2) и принимающим (S1) портами относительно центра кольца; D — расстояние между соседними кольцами (в миллиметрах).

Например, обозначение 5_2_4_180_2.5 указывает на конфигурацию из пяти резонаторов, где второе кольцо является приемником, четвертое кольцо — передатчиком, угловое смещение 180° , а межрезонаторное расстояние 2.5 мм. Эта система маркировки способствовала организованному сбору и анализу данных в различных экспериментальных установках.

Сравнительные анализы проводились в различных конфигурациях для определения оптимального межрезонаторного расстояния и прояснения влияния количества резонаторов на производительность фильтра.

3. Результаты и их обсуждение

На начальном этапе исследования была рассмотрена система из трех резонаторов для оценки общего структурного поведения при систематическом изменении расстояния между кольцами. Резонаторы размещались с дискретными межкольцевыми расстояниями 2.5, 6.75, 11, 15.25 мм и 19.5 мм. Для каждой конфигурации возбуждение подавалось через порт S1 векторного анализатора цепей (VNA), обозначаемый как передающий порт (TX), в то время как принимающий порт (RX) (S1) регистрировал результирующий сигнал. Всесторонние измерения проводились для всех возможных комбинаций пар TX и RX колец с учетом угловых ориентаций 90° и 180° относительно оси, соединяющей центры колец. В общей сложности было получено 90 уникальных измерительных образцов, охватывающих все перестановки пар передатчик—приемник, межкольцевые расстояния и угловые конфигурации.

Распределения зарядов, показанные на рис.2, даны для однофазного отключения (мгновенного). Резонанс в кольце обусловлен формированием стоячих волн при выполнении условия $\beta L_{\text{eff}} \approx 2\pi m$ (где m — целое число, β — постоянная распространения в кольцевой линии, L_{eff} — эффективная длина пути по

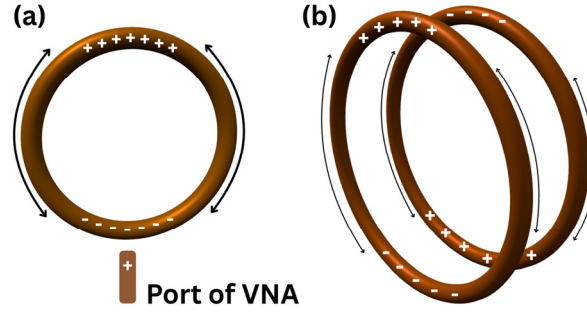


Рис.2. Показано мгновенное распределение (snapshot): при частотном обзоре VNA фаза возбуждения и направляемая длина волны λ_g меняются; знаки зарядов приведены для одного фазового среза. (a) Кольцевой резонатор при ~ 2.2 ГГц: стоящее распределение зарядов и направление токов. (b) Два кольца: связь через кулоновское взаимодействие.

периметру за один оборот). В диапазоне около 2.2 ± 0.2 ГГц выполняется $L_{\text{eff}} \approx \lambda_g$ (мода $m=1$), поэтому в кольце формируется распределение зарядов и токов. Перенос энергии вдоль проводящего кольца осуществляется поверхностной волной Зоммерфельда, локализованной у поверхности проводника; токи текут вдоль периметра. В этих условиях доминирует электрическая связь между кольцами. На рис.2а показано, что порт VNA, подведенный к сегменту кольца, создает локальный положительный потенциал/заряд. В ближайшем участке кольца индуцируется противоположный (отрицательный) заряд, а на диаметрально противоположной стороне — одноименный. Стрелками обозначены токи, поддерживающие стоячую волну. На рис.2б показаны два соседних кольца, где взаимное влияние реализуется через кулоновское взаимодействие зарядов: на сближенных участках накапливаются противоположные знаки, что эквивалентно взаимной емкости C_m . Взаимодействие ближайших колец удобно описывать теорией связанных мод: вводится коэффициент связи k , связанный с взаимной индуктивностью $M = k\sqrt{L_1 L_2}$. При слабой связи резонансы расщепляются $f_{\pm} \approx f_0\sqrt{1 \pm k}$. Экспериментально k убывает с увеличением межрезонаторного расстояния D , что адекватно аппроксимируется $k(D) \approx k_0 e^{(-D/\delta)}$ (где k_0 — связь при $D \rightarrow 0$, δ — характерная длина затухания) и объясняет наблюдаемые сдвиги частот и изменения амплитуд при варьировании D .

Передача энергии вдоль проводящего кольца поддерживается поверхностной волной (волной Зоммерфельда): поле сконцентрировано у поверхности проводника, фаза изменяется вдоль периметра, а кривизна и несоответствие оптимальному D приводят к излучательным потерям, которые в нашей конструкции являются преобладающими. Именно стоячее распределение зарядов в кольце делает магнитную составляющую связи слабой по сравнению с электрической.

Данные измерений показывают, что при угловом смещении между портами, равном 180° , система последовательно демонстрирует пять отчетливых резонансных полос, независимо от межрезонаторного расстояния. Эти резонансы наблюдаются примерно на частотах 2.2 (первая гармоника), 4.2 (вторая гармоника), 6.6 (третья гармоника), 8.6 (четвертая гармоника) и 11.2 ГГц (пятая гармоника), как показано на рис.3а. Напротив, в конфигурации с углом 90° система демонстрирует выраженную активность на четных гармониках, в частности

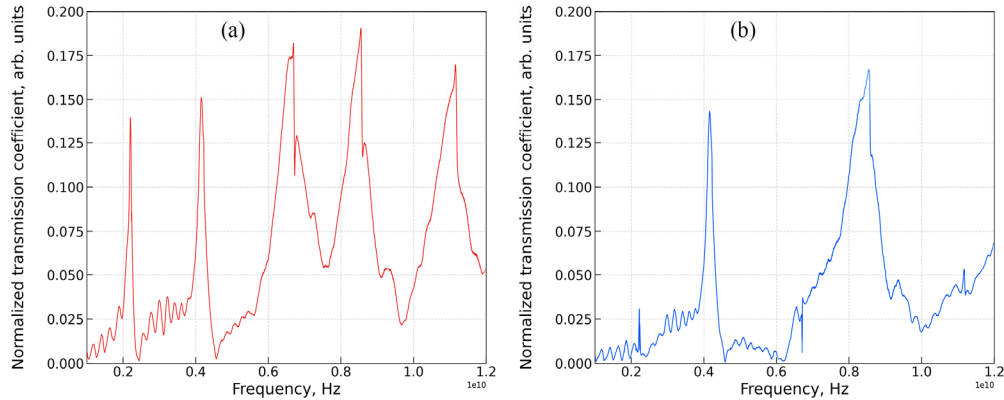


Рис.3. Зависимость нормированного коэффициента передачи от частоты для системы из трёх взаимодействующих проводящих кольцевых резонаторов (маркировка 3_1_3_90/180_2.5 мм): расстояние между соседними кольцами 2.5 мм, передающее — кольцо номер 3 (TX), принимающее — кольцо номер 1 (RX); (a) угловое смещение $\alpha = 180^\circ$, (b) угловое смещение $\alpha = 90^\circ$.

около 4.2 и 8.6 ГГц, как показано на рис.3b. Это явление указывает на формирование стоячих волн в структуре кольца, где повышенная активность соответствует выравниванию узлов или антиузлов с сегментами $\pi/4$ окружности кольца.

Из общего спектра передачи очевидно, что в диапазоне резонансных частот добротность (Q-factor) уменьшается с увеличением частоты. Это наблюдение подчеркивает тенденцию к расширению резонансных пиков и снижению их селективности на более высоких частотах.

Для представительной количественной оценки рассмотрим конфигурацию из трех колец, где возбуждение (TX) подается на третье кольцо, а принимаемый сигнал (RX) регистрируется с первого кольца. В этой конфигурации угловое расстояние между передающим и принимающим портами относительно оси, соединяющей центры колец, фиксировано на уровне 180° . Согласно принятой маркировки, эта конфигурация обозначается как: 3_1_3_180_x, где «x» указывает на одно из дискретных межкольцевых расстояний, доступных в экспериментальной модели (т.е. 2.5, 6.75, 11, 15.25 мм или 19.5 мм).

Поведение одиночного кольцевого резонатора можно аппроксимировать эквивалентной последовательной RLC-схемой с резонансной частотой $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ и добротностью $Q \approx \omega_0 L/R$. Связь между резонаторами с коэффициентом k вызывает расщепление частот f_+ , f_- и влияет на ширину полосы пропускания.

Наблюдаемое отклонение частоты от предсказанных резонансных значений можно в первую очередь отнести к сложному взаимодействию резонансных полей между соседними резонаторами. Когда резонаторы расположены близко друг к другу, их электромагнитные поля перекрываются, что приводит к взаимному возмущению, изменяющему эффективные условия резонанса. Это взаимодействие, регулируемое теорией связанных мод, приводит к расщеплению или сдвигу резонансных частот, поскольку суперпозиция полей создает гибридные моды, отличающиеся от мод изолированных резонаторов. В наших эксперимен-

тах степень отклонения частоты оказалась чувствительной как к пространственному расположению, так и к силе связи между резонаторами, что указывает на критическую роль межрезонаторного расстояния и выравнивания в определении общего отклика системы. Эти выводы подчеркивают важность учета взаимодействий полей при проектировании и оптимизации резонансных структур для высокопроизводительных приложений микроволновой фильтрации.

Рис.4 иллюстрирует характеристику передачи S21 для конфигурации из трех колец с межрезонаторным расстоянием 6.75 мм. Возбуждение подается на третье кольцо (TX), первое кольцо служит приемником (RX), порты ориентированы с угловым разделением 180°. Для количественной оценки производительности этой конфигурации добротность (Q-factor) определяется путем измерения ширины полосы (Δf) на уровнях -3 дБ вокруг резонансного пика. Для резонанса около 2.2 ГГц были получены следующие значения: $\Delta f = 0.011$, $f_{CF} = 2.2441$ ГГц и $Q_{6.75\text{mm}} = \frac{f_{CF}}{\Delta f} \approx 204$.

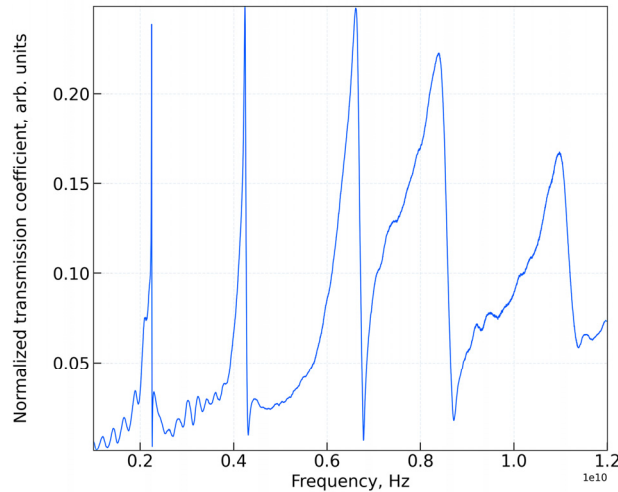


Рис.4. Зависимость нормированного коэффициента передачи от частоты для конфигурации системы из трёх взаимодействующих проводящих кольцевых резонаторов с межкольцевым расстоянием 6.75 мм (маркировка 3_1_3_180_6.75 мм). График иллюстрирует характеристику передачи S21, передающее — кольцо номер 3 (TX) и принимающее — кольцо номер 1 (RX).

Сводные значения добротности при резонансе ~2.2 ГГц приведены в табл. 1 для конфигурации 3_1_3_180_x и сопоставимых вариантов (3_1_3_90, 3_3_1_180, 3_3_1_90). Максимальная добротность стабильно достигается при межрезонаторном расстоянии $D = 6.75$ мм; при меньших и больших расстояниях Q снижается. Эта тенденция воспроизводится при изменении индексов TX/RX и для углов 180°/90°, что указывает на оптимальность $D = 6.75$ мм для рассматриваемой структуры.

Для количественной оценки характеристик передачи на резонансе ~2.2 ГГц рассмотрим конфигурации 3_1_3 и 3_3_1 с угловым расположением портов 180° и 90°. Использовались реальные межрезонаторные расстояния 2.5, 6.75, 11, 15.25 и 19.5 мм. Добротность (Q-factor) рассчитывалась по ширине полосы на уровне

Табл.1. Добротность (Q) на резонансе ~2.2 ГГц для конфигураций 3_1_3 и 3_3_1 при 180° и 90°

Конфигурация	2.5 мм	6.75 мм	11 мм	15.25 мм	19.5 мм
3 1 3 180	39.96	204.01	169.76	101.55	59.24
3 1 3 90	126.19	341.35	256.14	146.01	113.12
3 3 1 180	38.44	204.01	169.76	101.55	55.97
3 3 1 90	112.12	255.89	256.14	146.15	78.39

–3 дБ вокруг пика $|S_{21}|$. В табл.1 приведены значения Q для этих четырех конфигураций.

В дополнение к анализу добротности были исследованы амплитуды резонансных пиков для дальнейшей оценки производительности системы. Для этой цели рассматривалась конфигурация 3_1_2_180_x, в которой сигнал передается со второго кольца (TX) и принимается на первом кольце (RX) с угловым смещением 180°. Пиковые амплитуды на пяти основных резонансных частотах были измерены и впоследствии нанесены на график в зависимости от межрезонаторного расстояния, как показано на рис.5.

Рис.5 иллюстрирует зависимость амплитуд резонансных пиков на пяти различных резонансных частотах от межрезонаторного расстояния. Анализ графика ясно показывает, что максимальные амплитуды передачи достигаются при межкольцевых расстояниях 6.75 и 11 мм. Когда эти наблюдения интегрируются с предыдущим анализом добротности (Q-factor), очевидно, что система демонстрирует оптимальную производительность при межрезонаторном расстоянии 6.75 мм. При этом расстоянии система не только обеспечивает высокую добротность — показатель острых и селективных резонансных пиков, — но и демонстрирует устойчивые амплитуды передачи, что устанавливает 6.75 мм как наиболее эффективный режим работы для исследованных конфигураций.

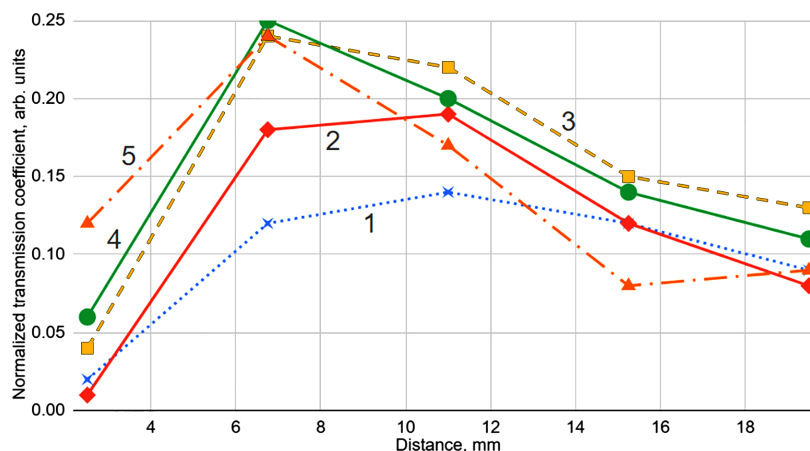


Рис.5. Зависимость амплитуд резонансных пиков (на пяти резонансных частотах) от расстояния между соседними кольцами в системе: 1 — диапазон ~2.2, 2 — диапазон ~4.2, 3 — диапазон ~6.6, 4 — диапазон ~8.6 и 5 — диапазон ~11.2 ГГц.

В последующем экспериментальном направлении исследование изучало поведение системы при увеличении числа резонаторных колец при фиксированном

межрезонаторном расстоянии 2.5 мм. В этом наборе экспериментов общее количество колец увеличивалось с трех до четырех, а затем до пяти. Из полного спектра исследованных конфигураций рассматривается представительная подгруппа, характеризующаяся маркировкой $x_3_2_180_2.5$. Здесь «х» обозначает общее количество колец в системе (т.е. 3, 4 или 5), «3» указывает на принимающее кольцо (RX), «2» соответствует передающему кольцу (TX), а угловое разделение между портами поддерживается на уровне 180° .

В этой экспериментальной установке изменялось общее количество колец при сохранении всех остальных параметров постоянными, что позволило исследовать влияние увеличения числа резонаторов на общую производительность передачи фильтра.

Графики передачи, представленные на рис.6, выявляют отчетливые тенденции в различных частотных режимах. В нижних резонансных частотных полосах конфигурация с пятью кольцами демонстрирует значительно более высокий коэффициент передачи по сравнению с системами из трех и четырех колец. Эта улучшенная производительность на низких частотах может быть объяснена увеличенной связью, обеспечиваемой дополнительным резонатором, который эффективно облегчает передачу энергии и приводит к более выраженной характеристике передачи.

Примерно на частоте 6.6 ГГц наблюдается конвергенция производительности: коэффициенты передачи для конфигураций с четырьмя и пятью кольцами становятся почти эквивалентными. Это явление предполагает, что на этой конкретной частоте дополнительный резонатор в системе с пятью кольцами не дает значительного преимущества перед конфигурацией с четырьмя кольцами с точки зрения эффективности связи или усиления резонанса.

После 6.6 ГГц поведение систем расходится. Конфигурация с четырьмя

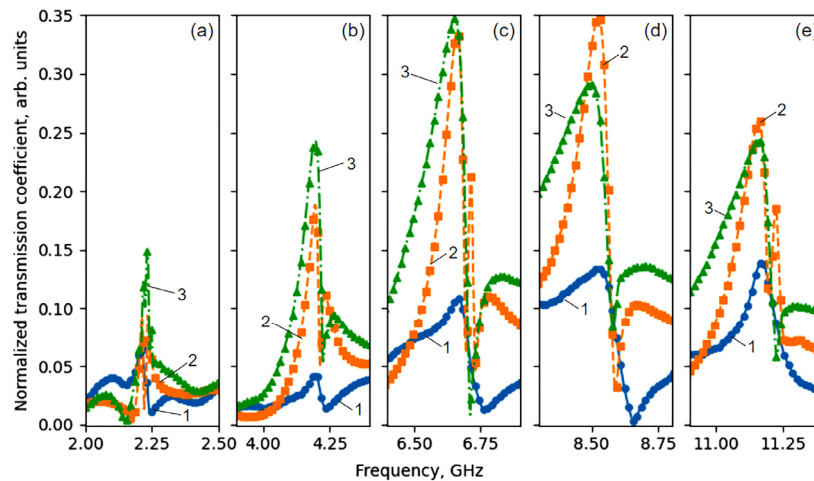


Рис.6. Зависимость нормированного коэффициента передачи от частоты для конфигураций системы сборки из трёх, четырёх и пяти взаимодействующих проводящих кольцевых резонаторов, где передающее кольцо (TX) — второе, а принимающее (RX) — третье; межрезонаторное расстояние 2.5 мм. Показаны участки в частотных диапазонах: (a) 2–2.5, (b) 3.9–4.4, (c) 6.4–6.9, (d) 8.3–8.8 и (e) 10.9–11.4 ГГц. Здесь 1 — система из 3 колец ($3_3_2_180_2.5$ мм); 2 — система из 4 колец ($4_3_2_180_2.5$ мм); 3 — система из 5 колец ($5_3_2_180_2.5$ мм).

кольцами превосходит систему с пятью кольцами, демонстрируя более высокие коэффициенты передачи в более высоких резонансных частотных полосах. Это изменение в производительности может указывать на дополнительные потери или паразитные эффекты, которые становятся более выраженными с увеличением сложности конфигурации с пятью кольцами. Вероятно, дополнительный резонатор в системе с пятью кольцами вносит дополнительные потери связи или эффекты расстройки на этих более высоких частотах, что отрицательно влияет на общую эффективность передачи.

Интересно, что конфигурация с тремя кольцами демонстрирует повышенный коэффициент передачи на более высоких резонансных частотах по сравнению с ее производительностью в нижнем частотном диапазоне. Это открытие подразумевает, что, хотя добавление дополнительных резонаторов может улучшить производительность в определенных частотных полосах, оно также может одновременно вызывать неблагоприятные эффекты связи на повышенных частотах. Такие явления, вероятно, возникают из-за сложного взаимодействия между резонаторами, при котором чрезмерная связь или несоосность электромагнитных полей приводит к увеличению вносимых потерь и ухудшению качества резонанса.

В итоге анализ характеристик передачи для различных конфигураций колец (как показано на рис.6) подчеркивает сложные компромиссы, присущие проектированию микроволновых фильтров на основе резонаторов. Экспериментальные результаты предполагают, что хотя увеличение числа резонаторов может улучшить производительность в определенных частотных полосах, оно также может вызывать дополнительные потери и осложнения в связях на других частотах. Такое нюансированное поведение подчеркивает необходимость тщательной оптимизации количества резонаторов для достижения сбалансированного и эффективного решения фильтрации, адаптированного к желаемому диапазону рабочих частот.

По сравнению с фильтрами на основе интегрированных волноводов в подложке (SIW), наша конструкция обеспечивает сопоставимые добротности при меньших габаритах и более простой реализации без многослойной подложки и решёток переходных отверстий. Микрополосковые фильтры технологически просты и тонки, но на высоких частотах более чувствительны к излучательным потерям и обычно уступают по многополосности. В представленных кольцевых резонаторах доминируют именно радиационные утечки, которые во многих конфигурациях превосходят проводниковые (джоулевы) потери; это определяет наблюдаемое снижение Q на верхних полосах. Фильтры на диэлектрических резонаторах демонстрируют максимально высокий Q и низкие вставочные потери, но, как правило, крупнее, дороже и менее удобны для интеграции в компактные многополосные фронтенды. Таким образом, предложенное решение занимает нишу компактных многополосных фильтров для сенсорных и IoT-приложений при умеренных потерях.

Масштабируемость на более высокие частоты. Хотя испытания проводились в диапазоне 1–12 ГГц, данная конструкция масштабируется на частоты 5G (например, 28 ГГц) и 6G (например, 100 ГГц) за счет пропорционального уменьшения размера кольца — уменьшение диаметра вдвое удваивает резонансные частоты, сохраняя многополосное поведение. Эта масштабируемость уменьшает необходимость в нескольких однополосных каналах, поскольку наш многополосный фильтр объединяет частотное покрытие, повышая эффективность для передовых систем беспроводной связи.

4. Заключение

В настоящем исследовании экспериментально изучено влияние межрезонаторного расстояния и количества резонаторов на производительность микроволновых полосно-пропускающих фильтров, использующих взаимодействующие проводящие кольцевые резонаторы. Результаты показывают, что межрезонаторное расстояние 6.75 мм оптимально балансирует сильную электромагнитную связь с минимальными паразитными потерями, что приводит к улучшенному качеству резонанса и амплитуде передачи. Кроме того, хотя увеличение числа резонаторов улучшает передачу на низких резонансных частотах, оно может вызывать сложные взаимодействия связи, которые отрицательно сказываются на более высоких частотах. Эти выводы способствуют разработке настраиваемых высокопроизводительных микроволновых фильтров для передовых систем беспроводной связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Z. Hou, C. Liu, B. Zhang, R. Song, Z. Wu, J. Zhang, D. He.** Electronics, **9**, 205 (2020).
2. **I. Stamatopoulos, I. Koutzoglou, D.I. Karatzidis, Z.D. Zaharis, P.I. Lazaridis, N.V. Kantartzis.** Sensors, **23**, 9825 (2023).
3. **G.L. Matthaei, L. Young, E.M.T. Jones.** Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures. North Bergen, 1985.
4. **D.R. Smith, W.J. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, S. Schultz.** Phys. Rev. Lett., **84**, 4184 (2000).
5. **W.-C. Chen, J.J. Mock, D.R. Smith, T. Akalin, W.J. Padilla.** Phys. Rev. X, **1**, 021016 (2011).
6. **B. Schurr, M. Hensen, L. Brenneis, P. Kessler, J. Qin, V. Lisinetskii, R. Thomale, T. Brixner, B. Hecht.** arXiv, 2504.02603 (2025).
7. **N.G. Margaryan.** Proceedings of the Yerevan State University, Physical and Mathematical Sciences, **58**, 66 (2024).
8. **R. Ding, W. Xuan, S. Dong, B. Zhang, F. Gao, G. Liu, Z. Zhang, H. Jin, J. Luo.** Nanomaterials, **12**, 3082 (2022).
9. **Y.I.A. Al-Yasir, N. Ojaroudi Parchin, R.A. Abd-Alhameed, A.M. Abdulkhaleq, J.M. Noras.** Electronics, **8**, 114 (2019).

ՄԻԿՐՈՍԿՈՓԱՅԻՆ ԱՆՑՄԱՆ ԶՏԻՉ ՓՈԽԱԶԴՈՂ ՀԱՂՈՐԴԻՉ
ՕՂԱԿԱԶԵԻ ՌԵԶՈՆԱՏՈՐՆԵՐԻ ՄԻՋՈՑՈՎ

Ն.Գ. ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ, Գ.Ա. ՕՀԱՆՅԱՆ

Աշխատանքը ներկայացնում է փորձնական հետազոտություն՝ նոր միկրոհալային զտիչի ճարտարապետության վրա՝ հիմնված փոխազդող հաղորդիչ՝ օղակաձև ռեզոնատորների վրա: Օգտվելով պղնձե օղակների բնորոշ ռեզոնանսային վարքագծից՝ աշխատանքում առաջարկվող մոդելը ապահովում է մի քանի նեղ անցման շերտ 1–12 ԳՀց հաճախության տիրույթում: Փոփոխելով ինչպես ռեզոնատորների միջև գտնվող հեռավորությունը, այնպես էլ օղակների թվաքանակը, ուսումնասիրության ընթացքում հայտնաբերվեց օպտիմալ կոնֆիգուրացիան: Բարորակության գործակցը (Q) և փոխանցման ամպլիտուդը հասնում են առավելագույն արժեքի երբ օղակների միջօղակային հեռավորությունը կազմում է 6.75 մմ: Փորձնական արդյունքները ցուցադրում են տարբերակված ռեզոնանսներ՝ 2.2, 4.2, 6.6, 8.6 և 11.2 ± 0.2 ԳՀց-ում, որոնք համապատասխանում են հիմնական և ավելի բարձր կարգի հարմոնիկ ռեժիմներին: Ցուցադրված զտման մեխանիզմը՝ առանձնանալով կոմպակտ չափսով, կարգավորվող հաճախականական արձագանքով և ցածր ներդրման կորուստով, առաջարկում է պարզ լուծում ժամանակակից անլար հաղորդակցության համակարգերի համար: Այս արդյունքները ցույց են տալիս նշանակալի ներուժ հաջորդ սերնդի 5G և առաջացող 6G ցանցերի մեջ ինտեգրման նպատակով՝ տրամադրելով ծախսարդյունավետ այլընտրանք ավանդական զտիչային լուծումներին:

MICROWAVE BAND-PASS FILTERING USING INTERACTING
CONDUCTING RING RESONATORS

N. MARGARYAN, G. OHANYAN

This work presents an experimental investigation into a novel microwave band-pass filter architecture based on interacting conducting ring resonators. Leveraging the inherent resonant behavior of copper rings, the design achieves multiple narrow passbands within the 1–12 GHz frequency range. By systematically varying both the inter-resonator spacing and the number of rings, the study identifies an optimal configuration—particularly at an inter-ring distance of 6.75 mm—that maximizes the quality factor and transmission amplitude. Experimental results reveal distinct resonances at 2.2, 4.2, 6.6, 8.6, and 11.2 ± 0.2 GHz, corresponding to the fundamental and higher-order harmonic modes. The demonstrated filtering mechanism, characterized by compact size, tunable frequency response, and low insertion loss, offers a scalable solution for modern wireless communication systems. These findings indicate significant potential for integration into next generation 5G and emerging 6G networks, providing a cost-effective alternative to conventional filter designs.