

На правах рукописи



Мартынов Михаил Игоревич

ИССЛЕДОВАНИЕ СПИН-ВОЛНОВЫХ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ  
КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ КАК СОГЛАСОВАННЫХ  
СВЧ-ФИЛЬТРОВ

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») на кафедре физической электроники и технологии.

Научный руководитель:

**Семенов Александр Анатольевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой физической  
электроники и технологии СПбГЭТУ  
«ЛЭТИ».

Официальные оппоненты:

**Балашов Виктор Михайлович**,  
доктор технических наук, профессор,  
Заместитель Генерального конструктора  
по программно-целевому развитию,  
директор Научно-образовательного  
комплекса АО "НПП "Радар ММС".  
г. Санкт-Петербург

**Калябин Дмитрий Владимирович**,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник ИРЭ  
Института радиотехники и электроники  
им. В. А. Котельникова РАН. г. Фрязино

Ведущая организация

**Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Вектор»**  
г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «24» декабря 2019 г. в 17:00 на заседании диссертационного совета Д 212.238.08 на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета [www.etu.ru](http://www.etu.ru) в разделе «Подготовки кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах»

Автореферат разослан «23» октября 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.238.08  
кандидат технических наук, доцент

Смирнов Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Согласованная обработка сигналов является одной из основных задач радиолокационных и зондирующих систем. Постановка такой задачи требует априорного знания о принимаемых помехах и поведении полезного сигнала в среде, в которой он распространяется. Зачастую синтез таких фильтров представляет собой нетривиальную задачу, особенно для сигналов с двойным типом модуляции. Современный уровень полупроводниковой электроники позволяет осуществлять цифровые способы обработки сигналов в области радиочастот (РЧ). В диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) согласованные фильтры реализуются средствами функциональной электроники, где преобразование сигнала обеспечивается свойствами волноведущих сред. В тех случаях, когда фильтр невозможно выполнить в виде отдельного устройства, обычно используют схемы понижения несущей частоты сигнала и последующую обработку в диапазоне РЧ и ниже.

Нишу согласованной фильтрации на частотах до 1 ГГц занимают устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Фундаментальным ограничением данного типа устройств является частотный диапазон, определяемый существующими материалами. На частотах выше 1 ГГц преобладают фильтры, выполненные на сосредоточенных элементах и микрополосковых линиях. Параллельно с такими фильтрами используют селективные устройства на спиновых волнах.

Спиновые волны позволяют производить частотную селекцию на частотах гораздо выше 1 ГГц и обеспечивают перестройку центральной частоты в широком диапазоне частот. Фильтры на спиновых волнах обладают большей прямоугольностью полосы пропускания, чем фильтры на ПАВ. Область применения спиновых волн довольно широка. В частности, были предложены линии задержки, фазовращатели, фильтры и ограничители СВЧ сигнала. Отличительной особенностью спиновых волн является наличие собственной дисперсии, которая позволяет обеспечивать квадратичные фазо-частотные характеристики. В силу этого спиновые волны можно применять для сжатия импульсов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), то есть в качестве согласованных фильтров.

Устройства на спиновых волнах используются в активных кольцевых резонаторах (АКР), где они применяются как частотоподающие или частотно-селективные элементы. Активные кольцевые резонаторы применяются в макетах малошумящих СВЧ-генераторов и генераторов хаотических сигналов.

Кольцевые схемы с положительной обратной связью обладают гребенчатой амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), что позволяет рассматривать их в качестве согласованных фильтров для сигналов с амплитудной модуляцией в диапазоне СВЧ.

Принцип согласованной фильтрации с помощью активных кольцевых резонаторов на спин-волновых элементах ранее не рассматривался.

**Целью диссертационной работы** являлось исследование согласованной обработки сигналов активными кольцевыми резонаторами, содержащими спин-волновую линию задержки (спин-волновой АКР) или комбинацию спин-волновой и оптической линий задержки (спин-волновой оптоэлектронный АКР), с учетом процесса возбуждения спиновых волн.

**Основными задачами исследования** являлись:

1. Исследование комплексных коэффициентов передачи спин-волнового активного кольцевого резонатора (СВ АКР) и спин-волнового оптоэлектронного активного кольцевого резонатора (СВОЭ АКР) с учетом возбуждения спиновых волн.
2. Определение параметров согласованного сигнала для СВ АКР и СВОЭ АКР.
3. Исследование временных откликов СВ АКР и СВОЭ АКР на согласованный сигнал.
4. Исследование и анализ динамического диапазона фильтрации СВ АКР и СВОЭ АКР.

**Научная новизна** заключается в следующем:

1. Построена теория комплексных коэффициентов передачи активных кольцевых резонаторов, содержащих спин-волновую линию задержки с учетом параметров возбуждения спиновых волн.
2. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования комплексных коэффициентов передачи СВ АКР и СВОЭ АКР с учетом параметров возбуждения спиновых волн.
3. Теоретически и экспериментально исследованы временные характеристики активных кольцевых резонаторов.
4. Проведена оценка динамического диапазона согласованной фильтрации СВ АКР и СВОЭ АКР.
5. Теоретически и экспериментально подтверждена способность активных кольцевых резонаторов выполнять согласованную фильтрацию амплитудно-модулированных сигналов.

**Практическая значимость** диссертационной работы состоит в следующем:

1. Предложена теоретическая модель активного кольцевого резонатора, содержащего как ферритовую линию задержки, так и комбинацию ферритовой и оптической линий задержки с учетом влияния микрополосковых антенн спиновых волн на комплексный коэффициент передачи.
2. Определены отношения конструктивных параметров, при которых коэффициенты передачи СВ АКР и СВОЭ АКР остаются неизменными. На основании этих соотношений заданные частотные характеристики могут быть выполнены в различных конфигурациях геометрических параметров.
3. Определен динамический диапазон согласованной фильтрации амплитудно-модулированных сигналов в активных кольцевых резонаторах, содержащих спин-волновую и оптоволоконную линию задержки.
4. Показано, что активные кольцевые резонаторы за счет линейчатого спектра собственных частот могут эффективно производить согласованную фильтрацию амплитудно-модулированных сигналов при малых входных отношениях «сигнал/шум».

**Объектом исследования** являются активные кольцевые резонаторы, содержащие как ферритовую линию задержки, так и комбинацию ферритовой и оптической линий задержки.

**Предметом исследования** являются частотные и временные характеристики активных кольцевых резонаторов с дисперсионными линиями задержки.

**Методы исследования**, применяемые в диссертации, заключаются в использовании общепринятых подходов радиофизики и математической физики. В частности, при получении полной формы комплексных коэффициентов передачи активных кольцевых резонаторов использован метод парциальных волн, при исследовании процессов фильтрации использовался метод дискретного Фурье-преобразования, а при исследовании и оценке динамических диапазонов фильтрации использовались методы линейной и согласованной фильтрации.

Новые результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, позволили сформулировать следующие **научные положения**:

1. Условие баланса фаз в оптоволоконной линии задержки, определяемое отношением длины оптоволоконной линии к радиусу её сердцевинки,

- умноженным на отношение коэффициентов преломления оболочки и сердцевины оптического волокна, совместно с условием баланса фаз в спин-волновом элементе обеспечивает идентичные комплексные коэффициенты передачи спин-волнового оптоэлектронного активного кольцевого при различных параметрах оптоволоконной линии задержки.
2. Равенство длительности одиночного импульса на входе АКР и периода следования боковых лепестков импульсной характеристики АКР обеспечивает максимальную длину последовательности импульсов на выходе АКР. При этом период следования боковых лепестков импульсной характеристики равен групповому времени задержки в области минимальных потерь коэффициента передачи АКР и подвержен влиянию дисперсии волноведущей среды, что выражается в искажении формы импульсов на выходе.
  3. Выходное отношение «сигнал/шум» и среднеквадратичная ошибка активного кольцевого резонатора, работающего в режиме согласованного фильтра, имеют область постоянных значений в заданном диапазоне входных отношений «сигнал/шум», определяемую степенью перекрытия спектра согласованного сигнала и коэффициента передачи.
  4. Учет дисперсионной деформации сигнала на выходе активного кольцевого резонатора ограничивает нижний предел динамического диапазона согласованной фильтрации, определенный по заданному значению среднеквадратичной ошибки равной 0.04, и значению «выигрыша», равному нулю на уровне минус 25-30 дБ входных значений «сигнал/шум». При этом сужение полосы пропускания спин-волнового элемента, то есть уменьшение количества резонансных частот, приводит к расширению динамического диапазона, причем максимальный диапазон достигается при ограничении фильтрации областью основного лепестка спектра полезного сигнала.

### **Апробация работы**

Результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на ряде конференций различного уровня, в частности на международной конференции по микроволновым устройствам, системам и технологиям «The European Microwave Conference» (Великобритания, Лондон, 2016 г.); на международной конференции «Physics Days» (Финляндия, Оулу 2016 г.); на всероссийской научно-технической конференции «Микроэлектроника СВЧ» (Россия, Санкт-Петербург, 2013, 2015, 2016 и 2018 гг.); на всероссийской

молодёжной конференции по физике и астрономии «ФизикА.СПб» (Россия, Санкт-Петербург, 2013, 2015, 2018 г.); на всероссийской конференции по нелинейным явлениям «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Россия, Саратов 2013).

**Публикации.** По теме диссертационной работы автором было опубликовано 13 печатных работ, в том числе 1 публикация в научных журналах, рекомендуемых ВАК, 3 статьи в научных журналах, индексируемых SCOPUS и Web of Science и тезисы к 9 докладам на научно-технических конференциях.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 124 наименования. Основной текст изложен на 157 страницах машинописного текста. Работа содержит 88 иллюстраций.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована цель и задачи, отмечены научная новизна и практическая значимость, а также сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** «Активные кольцевые резонаторы и СВЧ согласованные фильтры» содержит обзор литературы по теме диссертации. Первый параграф посвящен общим вопросам согласованной фильтрации, в частности, распространенному способу согласованной обработки – сжатию ЛЧМ сигналов. В параграфе рассмотрены способы физической реализации СВЧ согласованных фильтров при помощи гибридно-интегральной технологии, а также методами радиофотонной электроники.

Второй параграф посвящен краткому описанию активных кольцевых резонаторов, построенных на спин-волновых элементах. Рассмотрен основной теоретический подход к описанию комплексного коэффициента передачи таких цепей. Показано, что активные кольцевые резонаторы имеют многорезонансную структуру АЧХ, которая может удовлетворять требованиям согласованной фильтрации сигналов с амплитудной модуляцией. Отмечены работы, в которых предпринимались попытки исследования фильтрующих свойств АКР.

Третий параграф посвящен анализу механизма возбуждения поверхностных спиновых волн микрополосковыми антеннами. Рассмотрены частотные параметры возбуждающих элементов (микрополосковых антенн) в рамках теории длинных линий. Приведены основные выражения для расчета

сопротивления излучения, на основании которых формулируются комплексные коэффициенты передачи микрополосковых антенн спиновых волн. Проведен анализ частотных зависимостей сопротивления излучения одиночных микрополосковых антенн и антенн типа «меандр» в зависимости от геометрических параметров линий и слоя феррита. Отдельное внимание уделено геометрическими параметрами, при которых характеристики сопротивления излучения являются однозначными как для одиночных антенн, так и для антенн типа «меандр».

Анализ характеристик сопротивления излучения спин-волновых антенн привел к выводу, что параметры возбуждаемых волн зависят от отношений геометрических размеров микрополосковых антенн, а также от дисперсии спиновых волн, что позволяет обобщить конструкции спин-волновых элементов. При этом, выражая через обобщенные параметры антенн комплексные коэффициенты передачи АКР, можно установить взаимосвязь между частотными характеристиками АКР и параметрами спин-волнового элемента.

В целом, проведенный обзор литературы показывает, что несмотря на длительную историю теоретических и практических исследований согласованных фильтров и активных кольцевых резонаторов, а также большое разнообразие способов их реализации, к моменту начала диссертационной работы не предпринималось попыток проведения комплексных и обобщающих исследований согласованной фильтрации в активных кольцевых резонаторах. В частности, не были сформулированы коэффициенты передачи АКР, учитывающие способ возбуждения спиновых волн. Были крайне мало исследованы вопросы преобразования СВЧ-сигналов в АКР. Не были установлены параметры и критерии, при которых преобразование СВЧ-сигнала в АКР можно считать согласованной фильтрацией.

Вторая глава «Исследование комплексных коэффициентов передачи с учетом возбуждения спиновых волн» посвящена разработке и исследованию комплексных коэффициентов передачи и импульсных характеристик активных кольцевых резонаторов, содержащих спин-волновую линию задержки, с учетом характеристик возбуждения спиновых волн микрополосковыми антеннами. В главе исследованы как спин-волновой АКР, так и спин-волновой оптоэлектронный АКР, содержащий спин-волновой элемент и оптоволоконный тракт.

В первом параграфе представлена аналитическая теория пассивного спин-волнового устройства (типа фильтра и линии задержки), принимающая во внимание комплексный коэффициент передачи возбуждающей

микроросковой антенны. В предложенной модели учитывается «направленность» излучения поверхностных спиновых волн. Адекватность модели проверена путем сопоставления результатов численного расчета по предложенной аналитической теории с результатами моделирования в программном пакете ANSYS HFSS. Также представлены результаты моделирования распределения СВЧ магнитного поля в пленке феррита.

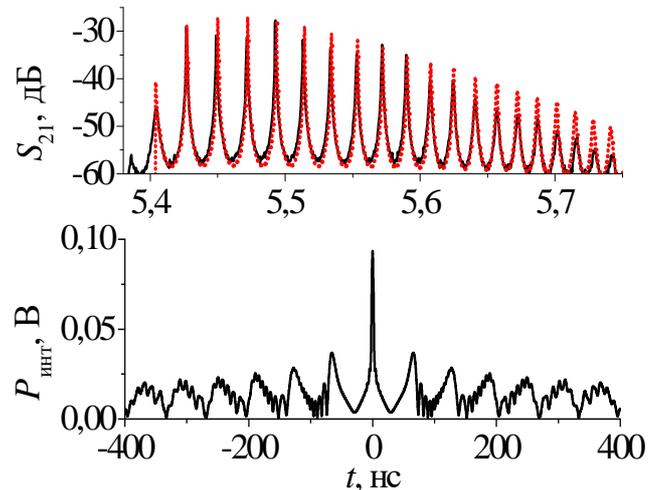
Второй параграф главы посвящен исследованию комплексных коэффициентов передачи СВ АКР и СВОЭ АКР с учетом возбуждения поверхностных спиновых волн. Параграф состоит из двух пунктов.

В первом пункте исследован комплексный коэффициент передачи спин-волнового АКР, состоящего из последовательно включенных СВЧ усилителя, переменного аттенюатора и спин-волнового частотоподающего элемента. Для полученного коэффициента передачи определен предел применимости, при котором теоретическое значение коэффициента усиления не превышает суммарные потери в цепи АКР. Такое ограничение обусловлено явлением автогенерации, возникающей в цепях с положительной обратной связью. Для проверки полученного выражения было проведено экспериментальное исследование частотных характеристик АКР на макете, содержащем «подвешенную» ферритовую пленку в качестве линии задержки. К пленке толщиной  $L = 13,6$  мкм и  $4\pi M_s = 1760$  Гс прикладывалось поле в 1220 Э, что обеспечивало рабочий диапазон частот 5,38–5,75 ГГц. Экспериментально полученные при различных коэффициентах усиления в цепи и различных длинах линии задержки (3, 6 и 9 мм) АЧХ сопоставлены с результатами численного моделирования, показавшего хорошее соответствие аналитической модели.

Во втором пункте теоретически исследован комплексный коэффициент передачи СВОЭ АКР. Основным отличием цепи являлось наличие оптического тракта, включенного в разрыв между входным ответвителем и спин-волновым элементом. Оптический тракт состоял из электрооптического модулятора, оптоволоконной линии задержки и фотодиода. Обнаружено наличие соотношения параметров оптоволоконной линии задержки, определяющее условие баланса фаз в оптическом тракте. Это соотношение определяется как отношение длины оптоволоконной линии к радиусу сердцевины оптического волокна, умноженному на отношение коэффициентов преломления сердцевины волокна и его оболочки. Совместно с условием баланса фаз СВЧ тракта, были получены одинаковые комплексные коэффициенты передачи оптоэлектронного АКР для пяти различных вариантов параметров оптоволоконной линии задержки.

В третьем параграфе исследованы импульсные характеристики СВ АКР и СВОЭ АКР, полученные на основе комплексных коэффициентов передачи. Импульсные характеристики АКР имеют квази-периодическую лепестковую структуру, которая зависит от типа дисперсии волноведущих элементов. Показано, что для спин-волнового АКР импульсная характеристика подвержена наибольшему искажению в силу нелинейного характера дисперсии

поверхностных спиновых волн. Такие искажения имеют вид паразитной высокочастотной модуляции, что приводит к значительной деформации, начиная со второго лепестка. СВОЭ АКР имеет более равномерную импульсную характеристику в силу линейности дисперсии оптического волокна. Показано, что импульсная характеристика является бесконечной; период следования боковых лепестков равен групповому времени



задержки (ГВЗ) в области потерь коэффициента передачи, а скорость затухания боковых лепестков зависит от коэффициента усиления в цепи АКР. Также установлено, что использование микрополосковых антенн типа «меандр» приводит к увеличению скорости затухания боковых лепестков.

Рисунок 1 – АЧХ и импульсная характеристика спин-волнового АКР

Третья глава «Исследование временных откликов АКР на согласованный сигнал в виде прямоугольного импульса» посвящена исследованию выходных сигналов АКР как откликов на согласованный сигнал в виде прямоугольного импульса, а также динамического диапазона согласованной фильтрации активных кольцевых резонаторов, содержащих спин-волновую линию задержки.

В первом параграфе рассмотрены выходные сигналы СВ АКР и СВОЭ АКР, получаемые при воздействии на них согласованным по длительности одиночным прямоугольным импульсом без помехи на входе. Длительность согласованного импульса выбиралась на основании группового времени задержки в области минимальных потерь, т.е. в области периода боковых лепестков импульсной характеристики. Основной лепесток спектра такого импульса захватывает три резонансных частоты АЧХ АКР. Путем численного моделирования показано, что выходным сигналом является последовательность импульсов с периодом, равным групповому времени задержки. Длительность таких последовательностей прямо пропорциональна коэффициенту усиления

АКР. При максимальной величине коэффициента усиления выходной сигнал подвержен паразитной низкочастотной модуляции. Такая модуляция обусловлена нелинейным характером дисперсии спиновых волн, за счет чего резонансы АКР располагаются неэквидистантно и в спектре выходного сигнала возникают гармоники, равные разности межрезонансных интервалов. Для спин-волнового АКР такое явление имеет явно выраженный характер, тогда как в СВОЭ АКР дисперсия более линейна и низкочастотная модуляция менее выражена. Также было установлено, что наибольшее уменьшение длительности выходной последовательности наблюдается при снижении нормированного коэффициента усиления со 100% до 95%

от суммы всех потерь в спин-волновом АКР и со 100% до 98% в спин-волновом оптоэлектронном АКР. Дальнейшее снижение усиления приводит к монотонному сокращению количества импульсов на выходе.

Установлено, что тип микрополосковых антенн не оказывает заметного влияния на выходную последовательность импульсов АКР,

так как согласованный по длительности импульс является узкополосным по отношению к спектру поверхностных спиновых волн.

Во втором параграфе численно исследован процесс фильтрации одиночного согласованного по длительности импульса на фоне помехи в виде белого гауссового шума. Входное отношение «сигнал/шум» рассчитывалось исходя из спектральной энергии импульса. Длительность входного импульса составляла 64 нс для СВ АКР и 191 нс для СВОЭ АКР. Для ограничения полосы пропускания были применены антенны типа «меандр» с параметрами  $W/L=10$ ,  $s/L=30$  и  $d/L=400$ , где  $W$  – ширина центрального проводника микрополосковой антенны,  $L$  – толщина пленки феррита,  $s$  – расстояние между проводниками в меандре, а  $d$  – расстояние между излучающей и приемной антеннами. Параметры оптоволоконной линии задержки определялись отношением

$$\frac{l_{opt}}{R_c} \cdot \frac{n_1}{n_2} = 3,125 \cdot 10^6 \times 1,0036, \text{ где } l_{opt} \text{ – длина оптоволоконной линии задержки, } R_c$$

– радиус сердцевинки оптического волокна,  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления сердцевинки и оболочки оптического волокна,

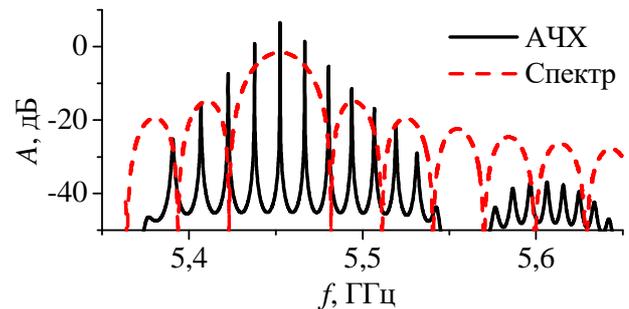


Рисунок 2 – АЧХ спин-волнового АКР и совмещенный амплитудный спектр согласованного по длительности импульса

соответственно. Установлено, что как спин-волновой, так и оптоэлектронный АКР способны выполнять согласованную фильтрацию одиночного импульса с отношением сигнал/шум на входе вплоть до минус 30 дБ. При высоких уровнях помехи на входе, на выходе АКР не формируется стационарных импульсов, вызванных спектральной энергией помехи, поскольку для помехи не выполняется баланс фаз на частотах, отличных от спектра собственных частот АКР.

Третий параграф содержит численное исследование характеристик СВ АКР и СВОЭ АКР, отвечающих за эффективность процесса фильтрации: среднеквадратичной ошибки (СКО), выходного отношения «сигнал/шум» и «выигрыша». В параграфе также содержится анализ динамических диапазонов АКР в зависимости от отношения «сигнал/шум» на их входах. Характеристики были рассчитаны при различных коэффициентах усиления в цепях кольцевых резонаторов и для двух типов микрополосковых антенн. Установлено, что кривые СКО и отношения «сигнал/шум» на входе АКР имеют область постоянного уровня, при котором эффективность фильтрации не зависит от уровня помехи на выходе. Ширина такого уровня прямо пропорциональна коэффициенту усиления и больше у СВ АКР, чем у СВОЭ АКР; это является прямым следствием воздействия дисперсии спиновых волн на входную помеху. По заданному значению СКО, равному 0,04, определен динамический диапазон, который показал, что учет дисперсионной деформации сигнала на выходе АКР ограничивает нижний предел на уровне минус 25-30 дБ входных значений «сигнал/шум». При этом сужение полосы пропускания спин-волнового элемента (уменьшение количества резонансных частот) приводит к расширению динамического диапазона. Максимальный диапазон достигается при ограничении фильтрации областью основного лепестка спектра полезного сигнала.

Четвертая глава «Экспериментальное исследование фильтрующих свойств АКР» посвящена изучению временных откликов активных кольцевых резонаторов, содержащих спин-волновую линию задержки, и согласованной фильтрации амплитудно-модулированных сигналов.

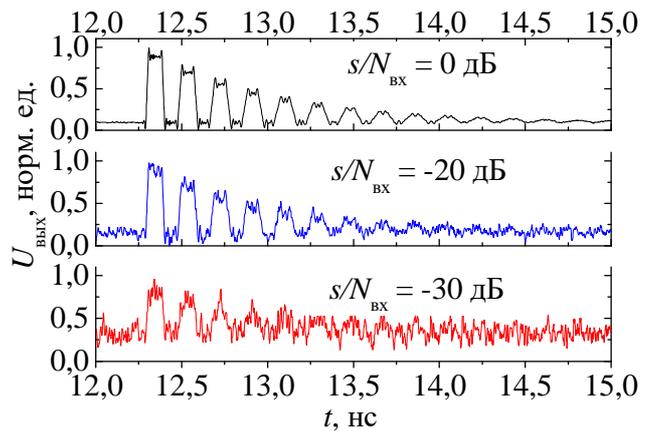


Рисунок 3 – Моделирование фильтрации единичного импульса длительностью 191 нс в оптоэлектронном АКР на фоне белого шума

В первом параграфе рассмотрены результаты экспериментального исследования преобразования амплитудно-модулированных сигналов различной структуры в оптоэлектронном АКР. Макет АКР содержал спин-волновую и оптоволоконную линии задержки. Спин-волновая линия задержки с полосой пропускания в 32 МГц была выполнена на монокристаллической пленке ЖИГ толщиной 6,18 мкм и намагниченностью насыщения равной 1115 Гс. Линия задержки была размещена в пространственно однородном магнитном поле напряженностью 1680 Э. Оптоволоконная линия задержки имела длину в 100 м и рабочую длину волны 1,55 мкм. Параграф состоит из двух пунктов.

В первом пункте рассмотрено преобразование периодического сигнала, согласованного по периоду с АКР. Показано, что выходная амплитуда сигнала с периодом 554 нс и скважностью 2 снижается более чем в два раза при отстройке несущей частоты на 100 кГц. При этом несущая частота составляла 6,208 ГГц.

Во втором пункте рассмотрено преобразование нерегулярных последовательностей импульсов

длительностью 275 нс. Установлено, что при низкой прямоугольности АЧХ АКР,

$K_p = \frac{\Delta f_{-3dB}}{\Delta f_{-20dB}} = 0,09$ , смещение несущей частоты на 50 МГц, приводит к

снижению длительности отклика АКР на единичный импульс на ~60%, а амплитуда первичного импульса на входе падает в 2 раза. На основании измеренных экспериментальных частотных характеристик была рассчитана импульсная характеристика АКР, в которой период следования боковых лепестков был равен ~550 нс, т.е. величине группового времени задержки. Анализ экспериментального отклика на входную последовательность из двух импульсов показал, что выходной сигнал является суперпозицией двух откликов на одиночный импульс, а отстройка несущей частоты в область межрезонансного подавления приводит к появлению единичного импульса выходе АКР с амплитудой, которая равна первичному отклику на единичный импульс. Экспериментально показано, что спектр такого сигнала преобразуется от квази-линейчатого к квази-непрерывному. Приведены результаты исследования, проведенного при увеличении длительности входного

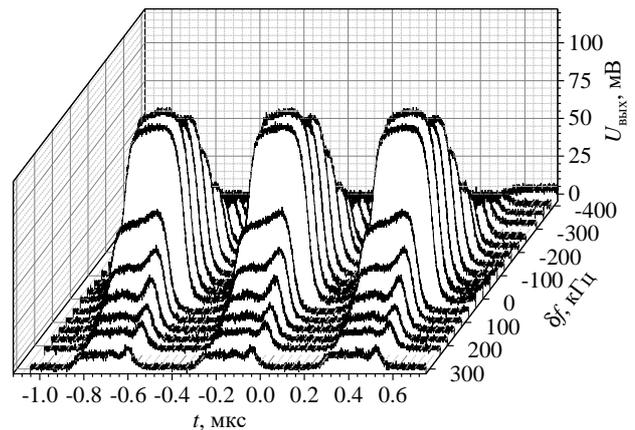


Рисунок 4 – Подавление периодического согласованного сигнала при отстройке несущей частоты

одиночного воздействия в кратное количество раз относительно ГВЗ. Установлено, что четная кратность длительности приводит к равномерному накоплению и спаду выходного сигнала, причем скорость спада зависит от коэффициента усиления в кольце, а АКР работает в режиме интегратора. Показано, что снижение скважности циклической выборки на входе АКР длительностью в 40 символов от 97,5% до 50% приводит к возрастанию амплитуды на выходе. Сначала это происходит за счет энергии отдельной выборки, а затем - за счет наложения входных сигналов в цепи АКР. При этом снижение скважности с 70% до 50% (переход к периодическому сигналу) приводит к скачку амплитуды на выходе более чем в 2 раза.

Второй параграф содержит результаты экспериментального исследования согласованной фильтрации прямоугольных импульсов в спин-волновом АКР. В качестве спин-волнового элемента использовался фильтр с полосой 80 МГц. Толщина пленки ЖИГ составляла 18 мкм,  $4\pi Ms$  была равна 780 Гс и  $\Delta H$  равнялась 0,65 Э. В качестве помехи использовался белый гауссов шум с тремя уровнями мощности относительно несущей частоты сигнала: минус 3, 7 и 10 дБ. Суммарная мощность выходного сигнала с генератора была ограничена 5 дБ. Полезным сигналом выступал одиночный импульс длительностью 47 нс. Сигнал подавался циклическими выборками длительностью 64 символа, 63 из которых составляли нули амплитуды. Вся последовательность смешивалась с шумом и образовывала шумоподобный сигнал. Выходной сигнал состоял из шумовой составляющей и единичного всплеска в области «нуля» времени.

Наблюдаемая амплитуда данного всплеска менялась во времени, однако никогда не опускалась до уровня шума. Установлено, что при фиксированной выходной мощности полезного сигнала с генератора, понижение отношения сигнал/шум на входе понижает парциальную энергию полезного входного воздействия и увеличивает общий выходной уровень сигнала. Для измеренных уровней характерно снижение среднего уровня шума по отношению к центральному всплеску при понижении отношения «сигнал/шум», что связано с выполнением баланса фаз для частот, разрешенных АЧХ АКР.

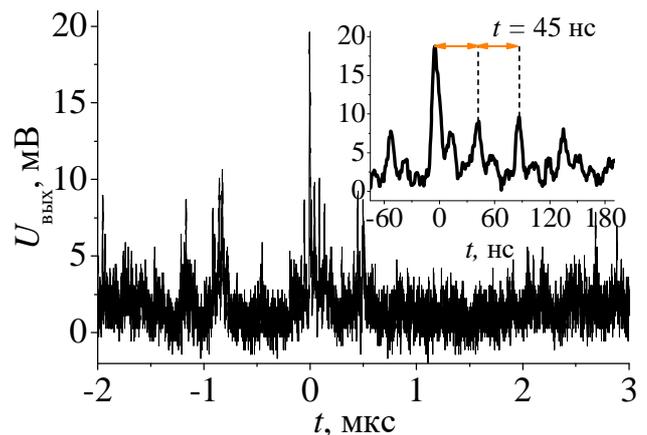


Рисунок 5 – Осциллограмма выходного сигнала при отношении «сигнал/шум» минус 10 дБ относительно несущей частоты, при фильтрации одиночного импульса длительностью 47 нс

Установлено, что спектр выходного сигнала является квази-линейчатым, причем гармоники основного лепестка расположены эквидистантно; это обусловлено подавляющим уровнем шума. Сплошное заполнение разрешенных частот приводит к «размазыванию» резонансных частот за счет низкой крутизны областей ФЧХ, расположенных слева и справа от резонансных скачков. Спектр выходного сигнала становится динамическим и вызывает усреднение фактического ГВЗ внутри АКР. Эквивалентные периоды данных частот соответствуют по величине периоду импульсной характеристики резонатора и периодам следования всплесков на выходе АКР.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы и научные результаты, полученные впервые:

1. Разработана теоретическая модель активного кольцевого резонатора, содержащего как ферритовую линию задержки, так и комбинацию ферритовой и оптической линий с учетом влияния микрополосковых антенн спиновых волн на комплексный коэффициент передачи.
2. Определено отношение параметров оптоволоконной линии задержки, отвечающее за однозначность фазового набега в оптоэлектронных кольцевых резонаторах.
3. Проведен анализ импульсных характеристик активных кольцевых резонаторов, содержащих спин-волновой элемент.
4. Определены критерии согласованных сигналов для активных кольцевых резонаторов.
5. Определен динамический диапазон согласованной фильтрации амплитудно-модулированных сигналов в активных кольцевых резонаторах, содержащих спин-волновую линию задержки.
6. Теоретически и экспериментально показано, что активные кольцевые резонаторы за счет линейчатого спектра собственных частот могут эффективно производить согласованную фильтрацию одиночных и периодических амплитудно-модулированных сигналов при малых входных отношениях «сигнал/шум».

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, индексируемых SCOPUS и Web Of Science и рекомендованных ВАК:

- [1]. Martynov, M. I. Microwave active ring resonator based on spin-wave delay line / M. I. Martynov, A. A. Nikitin, A. B. Ustinov, B. A. Kalinikos //2016 46th European Microwave Conference (EuMC). – IEEE, 2016. – P. 1043-1046.
- [2]. Martynov, M. I. Investigation of frequency response of microwave active ring resonator based on ferrite film / M. I. Martynov; A. A. Nikitin; A. B. Ustinov, B. A. Kalinikos, //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2016. – Vol. 769. – №. 1. – P. 012073.
- [3]. Мартынов, М. И. Исследование СВЧ свойств активной колебательной системы на основе ферритовой линии задержки / М. И. Мартынов, А. А. Никитин, А. Б. Устинов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2016. – №. 2. – С. 37-41.
- [4]. Martynov, M. I. Realization of matched filter on spin-wave delay line for amplitude modulated signals / M. I. Martynov, A. A. Semenov //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Vol. 1135. – №. 1. – P. 012017.

Другие статьи и материалы международных и всероссийских конференций:

- [5]. Мартынов, М. И. Исследование спин-волнового согласованного фильтра на пленке железо-иттриевого граната / М. И. Мартынов А. А. Никитин, А. Б. Устинов, Б. А. Калиникос, // Материалы конференции: Микроэлектроника СВЧ, СПб, Россия. – 2013.
- [6]. Мартынов, М. И. Исследование передаточных характеристик согласованного фильтра на пленке железо-иттриевого граната / М. И. Мартынов, А. А. Никитин, А. Б. Устинов, Б. А. Калиникос // Материалы конференции: Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика, Саратов, Россия. – 2013. – С. 156-157.
- [7]. Мартынов, М. И. Исследование передаточных характеристик согласованного фильтра на пленке железо-иттриевого граната / М. И. Мартынов, А. А. Никитин, А. Б. Устинов // Материалы конференции: Физика.СПб, СПб, Россия. – 2013. – С. 224-226.

- [8]. Мартынов, М. И. Спин-волновой согласованный фильтр на активном кольцевом резонаторе / М. И. Мартынов, А. А. Никитин, Б. А. Калиникос, А. Б. Устинов // Материалы конференции: Физика.СПб, СПб, Россия. – 2015.
- [9]. Мартынов, М. И. Исследование спин-волнового согласованного фильтра на пленке железо-иттриевого граната / М. И. Мартынов, А. А. Никитин, А. Б. Устинов, Б. А. Калиникос // Материалы конференции: Микроэлектроника СВЧ, СПб, Россия. – 2015. – С. 130–134.
- [10]. Martynov, M. I. Microwave active ring resonator based on spin-wave delay line / M. I. Martynov, A. A. Nikitin, A. B. Ustinov, B. A. Kalinikos, and E. Lähderanta // Physics Days 2016, Oulu, Finland. – 2016.
- [11]. Витько, В. В. Теоретическое исследование активного кольцевого резонатора, содержащего спин-волновую и волоконно-оптическую линии задержки / В. В. Витько, А. А. Никитин, М. И. Мартынов, А. Б. Устинов // Материалы конференции: Электроника и микроэлектроника СВЧ, СПб, Россия. – 2016. – С. 347–351.
- [12]. Мартынов, М.И. Спин-волновой согласованный фильтр для прямоугольных импульсов / М. И. Мартынов, А. Н. Кутищева, Г. А. Зарецкая // Сборник статей VII конференции Электроника и микроэлектроника СВЧ, СПб, Россия. – 2018. – С. 392-396.
- [13]. Мартынов, М. И. Спин-волновой согласованный фильтр для сигналов с амплитудной модуляцией / М. И. Мартынов, А. А. Никитин, А. А. Семенов, Б. А. Калиникос // Материалы конференции: Физика.СПб, СПб, Россия. – 2018 – С. 206–207.