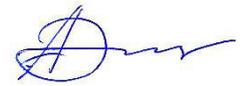


На правах рукописи



ЗАЙНУЛЛИН Айрат Радикович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ
СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНЫХ ФОТОННЫХ
ОПТОВОЛОКОННЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ ФИЛЬТРОВ**

**Специальность 05.12.13 –
Системы, сети и устройства телекоммуникаций**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2017

Работа выполнена на кафедре телекоммуникационных систем
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»

Научный руководитель: д-р техн. наук, профессор
Багманов Валерий Хусаинович,
профессор каф. телекоммуникационных
систем ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный авиационный технический
университет»

Официальны оппоненты: д-р техн. наук, доцент
Бурдин Антон Владимирович,
помощник ректора по инновациям,
профессор кафедры линии связи и
измерений в технике связи ФГБОУ ВО
«Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики»

к.т.н., доцент
Нуреев Ильнур Ильдарович,
доцент кафедры радиофотоники и
микроволновых технологий ФГБОУ ВО
«Казанский национальный
исследовательский технический университет
имени А.Н. Туполева-КАИ»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
университет телекоммуникаций и
информатики», г. Новосибирск**

Защита диссертации состоится 27 июня 2017 г. в 10 часов
на заседании диссертационного совета Д 212.288.07 на базе ФГБОУ ВО
«Уфимский государственный авиационный технический университет» по
адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО
«Уфимский государственный авиационный технический университет» и на
сайте www.ugatu.su

Автореферат разослан «___» _____ года

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, доцент



И.Л. Виноградова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В свете развивающихся и совершенствующихся систем наземной и космической связи актуальным становится вопрос о пропускной способности, быстродействии, масштабируемости, компактности и весовых характеристиках встраиваемых блоков и компонентов. Направленные на повышение скорости передачи данных во всех системах связи, всё большее применение находят гибридные технологии, совмещающие распространения сигнала в различных средах: оптическое волокно, воздушные и безвоздушные пространства. Это объясняет целесообразность использования преимуществ оптических систем связи, таких как высокая пропускная способность каналов передачи данных и помехозащищенность. И в связи с этим встают вопросы о минимизации размеров системы, быстродействии внутри системы, а также о качестве обработки информации.

К поиску новых решений как ранее существовавших задач, так и ныне появившихся в области проектирования и обработки сигналов направлена современная техническая наука.

Применение новых способов построения гибридных сетей, использование новых методов фильтрации СВЧ сигнала в оптической области – всё это ведет к повышению эффективности систем передачи и обработки информации в гибридных системах связи.

Технологии оптического формирования радиолуча, СВЧ оптических фильтров могут обеспечить решение вышеупомянутых задач.

В качестве эффективного технического решения совершенствования и оптимизации гибридных систем связи, представляющих собой системы доступа «Радио по волокну» (англ. Radio-over-Fiber), могут быть использованы оптические способы формирования радиосигналов на основе реальных временных задержек и СВЧ фотонные фильтры.

Степень разработанности темы. Опыт зарубежных и отечественных ученых в области формирования радиолуча излучающих систем оптическими методами на основе временных задержек, а также примеры разработок фотонных СВЧ фильтров в оптической области для формирования желаемого спектра сигнала был использован в рамках диссертационного исследования при решении указанных задач. Исследованиям в области оптических методов формирования радиолуча излучающих систем посвящены работы таких ученых как: Esman R.D., Frankel M.Y., Vidal B.R., Llorente R.S., Tong D., Wu M.C., Marti J., Matthews P.J., Chang C., Goldberg L., Yao J.P., и многих других. Анализ работ в данной области показал, что недостаточное внимание уделяется компактности реализации и не удовлетворяют требованиям по массо-габаритным показателям. Представленные работы слабо или вовсе не учитывают возможности реконфигурации оптических систем формирования радиолуча.

Теоретические и экспериментальные исследования в области фотонной СВЧ фильтрации были представлены такими учеными как: Campany J., Novak. D., Vidal B.R., Marti J., Wilner K., Moslehi B., Goodman J., Jackson K.P., Taylor H.F., Zmunda H., Minasian R.A., Yao J., Pastor D., Морозов О.Г., и многими другими. Результаты экспериментов демонстрируют наличие периодических спектральных полос пропускания или реализацию достаточно узких полос пропускания, но без возможности широкой настройки и отличающихся сложностью технической реализации.

Объектом исследования являются гибридные системы связи передачи информации, характеризующиеся наличием радио-модулирующего сигнала СВЧ диапазона.

Предметом исследования являются методы повышения эффективности гибридных систем связи.

Целью исследования являются способы повышения эффективности гибридных систем связи.

Задачи исследования:

1. Разработка метода подавления периодических спектральных полос пропускания фотонного некогерентного многоотводного КИХ-фильтра в гибридных системах связи, основанного на эффекте Верньера, обеспечивающего повышение спектральной эффективности гибридной системы связи.

2. Разработка структуры реконфигурируемого комбинированного фотонного СВЧ фильтра для повышения добротности системы.

3. Разработка метода управления фазой излучающей системы в гибридных системах связи на основе линейности фазо-частотной характеристики, позволяющего исключить дрожание фазы и сократить массо-габаритные показатели системы.

4. Разработка методики оценки дисбаланса мощности излучающей системы в гибридных системах связи с использованием многосердцевинного оптического волокна.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан метод подавления периодических спектральных полос пропускания фотонного некогерентного многоотводного КИХ-фильтра в гибридных системах связи основанный на эффекте Верньера, отличающийся последовательным включением когерентного оптического фильтра с некогерентным фильтром, что позволяет перестраивать частотную характеристику внутри рабочего диапазона частот пропускания на выходе фотонного СВЧ фильтра.

2. Разработана структура реконфигурируемого комбинированного СВЧ фильтра, основанная на фотонной технологии, отличающаяся использованием когерентного оптического Лайот фильтра второго порядка совместно с некогерентным многоотводным фотонным КИХ-фильтром, позволяющая повысить помехоустойчивость гибридной системы связи.

3. Разработан метод управления фазой излучающей системы в гибридных системах связи, основанный на линейности фазо-частотной характеристики оптических линий задержки, отличающийся использованием многосердцевинной дисперсионной матрицы, исключающей дрожание, что позволяет повысить помехоустойчивость и сократить массогабаритные показатели гибридной системы связи.

4. Разработана методика оценки дисбаланса мощности, приводящего к ограничению эффективности излучающей системы, отличающаяся учетом вносимых потерь многосердцевинной дисперсионной матрицы и перекрестных помех между жилами многосердцевинного волокна, позволяющая учитывать изменение оптической мощности в зависимости от структуры фильтра, формирующего дискретные отсчеты сигнала.

Теоретическая и практическая ценность работы. Разработанные методы позволяют повысить эффективность гибридных систем связи – увеличить спектральную эффективность, повысить помехоустойчивость и уменьшить массо-габаритные показатели. Применение новых разработок из области волоконно-оптических линий связи в виде многосердцевинного волокна позволяет модернизировать существующие системы связи, повысить их производительность, надежность и технологичность.

Данное исследование было выполнено при поддержке Стипендии Президента Российской Федерации на обучение за рубежом на 2015\16 г. (приказ № 558 от 03.06.2015) на базе лаборатории «Оптического доступа и сетей следующего поколения» Технологического Центра Нанопотоники Политехнического Университета Валенсии, г. Валенсия, Испания.

Методология и методы исследования. Результаты работы получены на основе использования основных положений теории электрической связи, теории цифровой обработки сигналов, численных методов, теории распространения радиоволн. Применены методы математического и компьютерного моделирования. На основе разработанных имитационных моделей проведены реальные экспериментальные исследования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод подавления периодических спектральных полос пропускания в гибридных системах связи, основанный на эффекте Верньера.

2. Структура реконфигурируемого комбинированного СВЧ фильтра.

3. Метод управления фазой излучающей системы в гибридных системах связи.

4. Методика оценки дисбаланса мощности излучающей системы, приводящего к ограничению эффективности излучающей системы, учитывающая вносимые потери многосердцевинной дисперсионной матрицы и перекрестные помехи между жилами многосердцевинного волокна.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации базируется на использовании известных теоретических положений и методов исследования. Корректность используемых математических моделей и их

адекватность реальным физическим процессам подтверждается данными проведенных численных и реальных экспериментов.

Апробация результатов. Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XII Международной научно-технической конференции «Оптические технологии в телекоммуникациях», г. Казань, 2014; научно-технических встречах в Технологическом Центре Нанопластики Политехнического Университета Валенсии (г. Валенсия, Испания), 2015-2016; XVI и XVII Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», г. Уфа, 2015, г. Самара, 2016; Международной научно-практической конференции «Молодой ученый: вызовы и перспективы», г. Москва, 2016; XVII Международной конференции по оптическим сетям «ICTON-2016», г. Тренто, Италия, 2016; Международной конференции SPIE «Photonic West OPTO – 2017», г. Сан-Франциско, США, 2017;

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 13 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 5 статей в зарубежных научных изданиях, входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus, 5 докладов в сборниках трудов международных и российских конференций.

Личный вклад. Постановка основных задач принадлежит научному руководителю. Основные результаты диссертации получены автором диссертации самостоятельно. Самостоятельно автором были разработаны предложенные методы повышения эффективности гибридных систем связи и имитационные модели, реализующие предложенные методы. Самостоятельно проведено имитационное моделирование, собрана экспериментальная установка и проведено экспериментальное исследование. Самостоятельно были обработаны результаты экспериментов. Научный руководитель принимал участие в обсуждении результатов, на основе чего опубликованы статьи в соавторстве.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка и приложений. Содержит 148 с. машинописного текста, 89 рисунков, библиографический список из 148 наименований, приложений на 2 с.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована основная цель работы и решаемые в ней задачи, научная новизна и практическая ценность выносимых на защиту результатов. Изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены такие понятия, как фотонные СВЧ технологии, гибридные системы связи и дискретная оптическая обработка сигналов. Выполнен подробный обзор оптических методов формирования и управления диаграммой направленности (ДН) излучающей системы, методов проектирования фотонных фильтров. Таким образом, была обоснована

актуальность темы исследования, выявлены существующие проблемы и сформулированы основные задачи.

Вторая глава посвящена разработке метода подавления периодических спектральных полос СВЧ фотонного фильтра в гибридных системах связи и структуры фотонного реконфигурируемого комбинированного СВЧ фильтра. Для решения этой задачи предлагается использовать комбинацию некогерентного КИХ-фильтра и когерентного Лайот-фильтра. Метод, разработанный в данном исследовании, основан на эффекте Верньера, суть которого представлена на рисунке 1. Прореживание спектра достигается из-за различного спектрального расстояния между гармониками, и поэтому полученное значение спектрального периода (FSR) будет больше исходного значения благодаря эффекту Верньера.

При условии точной настройки откликов обоих фильтров может быть достигнут ожидаемый эффект подавления нежелательных спектральных повторений, т.е. произойдет подавлением гармоник. Для реализации данного метода был выбран когерентный оптический Лайот-фильтр по причине простоты реализации, возможности реконфигурации и надежности, которая объясняется тем, что все оптические сигналы будут проходить по одному физическому каналу передачи.

Многоотводный КИХ-фильтр основан на использовании свойств фотоники для задержки, оценки и комбинирования набора повторений СВЧ сигнала. Как правило, задержка вносится дисперсной средой распространения для использования свойств параллелизма фотоники. Лайот-фильтр, как правило, состоит из набора двулучепреломляющих поляризующих пластин, толщина каждой следующей из которых в два раза меньше предыдущей. Поляризационная ось каждой из двулучепреломляющих пластин ориентирована под углом в 45 градусов по отношению к оси поляризатора. Двулучепреломляющие пластины были заменены устройствами DGD (групповая дифференциальная задержка), которое оказывает идентичный эффект на проходящее излучение, и является более универсальным. Возможность реконфигурации Лайот-фильтра возможно путем изменения величины DGD или изменения порядка фильтра путем добавления или удаления устройства задержки.

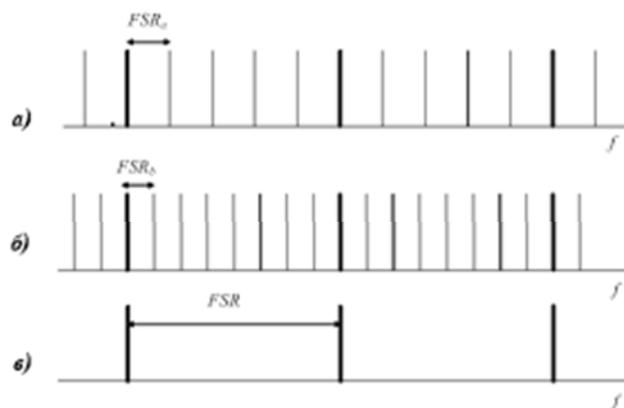


Рисунок 1 – Принцип эффекта Верньера:
 а) частотный отклик первого фильтра;
 б) частотный отклик второго фильтра;
 в) результирующий частотный отклик фильтра, основанный на эффекте Верньера

Передаточная характеристика некогерентного КИХ-фильтра описывается следующим выражением:

$$|H_{incoherent}(f)| = \left| \sum_{k=1}^N P_k e^{-j[2\pi f(k-1)\Delta\tau]} \right| \quad (1)$$

где P_k – импульсная характеристика фильтра, N – число отводов (в нашем случае число оптических несущих), $\Delta\tau$ – временная задержка между несущими, которая определяется по следующей формуле:

$$\Delta\tau = D \cdot L \cdot \Delta\lambda,$$

где D – показатель хроматической дисперсии среды распространения, L – длина дисперсионной среды и $\Delta\lambda$ – расстояние между оптическими несущими.

Передаточная характеристика Лайот фильтра выглядит следующим образом:

$$|H_{coherent}(f)| = \left| \cos^2 \left(\frac{\pi \cdot DGD \cdot f}{n} \right) \right| \quad (2)$$

где DGD – это величина дифференциальной групповой задержки и n – порядок Лайот фильтра.

Значения FSR обоих фильтров должны строго удовлетворять следующему условию:

$$FSR_{coherent} = m \cdot FSR_{incoherent} \quad (3)$$

где m – целое число.

Конечный частотный отклик разработанного фильтра имеет следующий вид:

$$|H(f)| = |H_{incoherent}(f)| \cdot |H_{coherent}(f)| \quad (4)$$

Структурная схема разработанного фильтра изображена на рисунке 2.

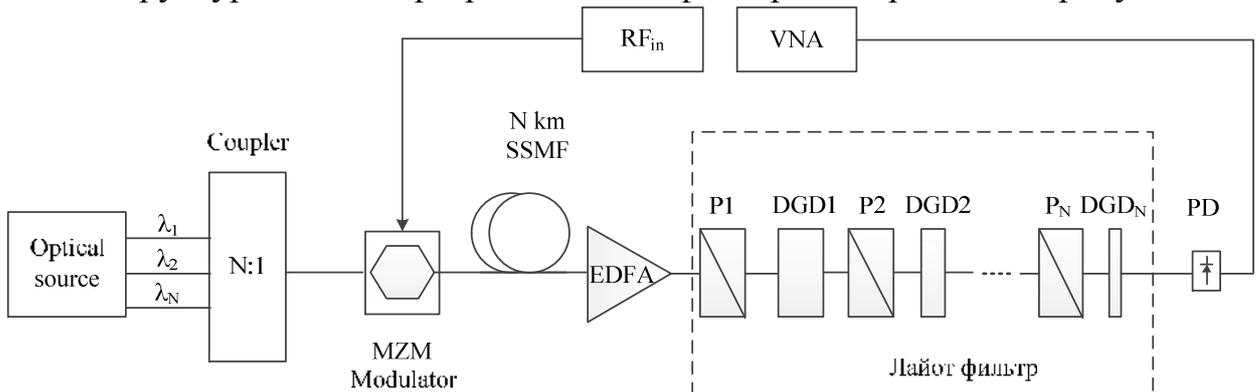


Рисунок 2 – Структурная схема комбинированного фотонного СВЧ фильтра

Было проведено имитационное моделирование, позволившее добиться очень узкой полосы пропускания КИХ-фильтра. В качестве исходных параметров для имитационного моделирования некогерентного КИХ-фильтра были выбраны: относительная мощность источников оптического излучения, их количество, расстояние между оптическими несущими, длина оптического волокна и величина дисперсии. Необходимым условием

получения желаемого отклика фотонного СВЧ КИХ-фильтра является одинаковая мощность всех источников излучения.

На рисунке 3 изображен спектральный отклик КИХ-фильтра 10-го порядка. Ширина полосы пропускания фильтра ($\Delta\Omega$) составляет 70 МГц, а значение FSR составляет 780 МГц.

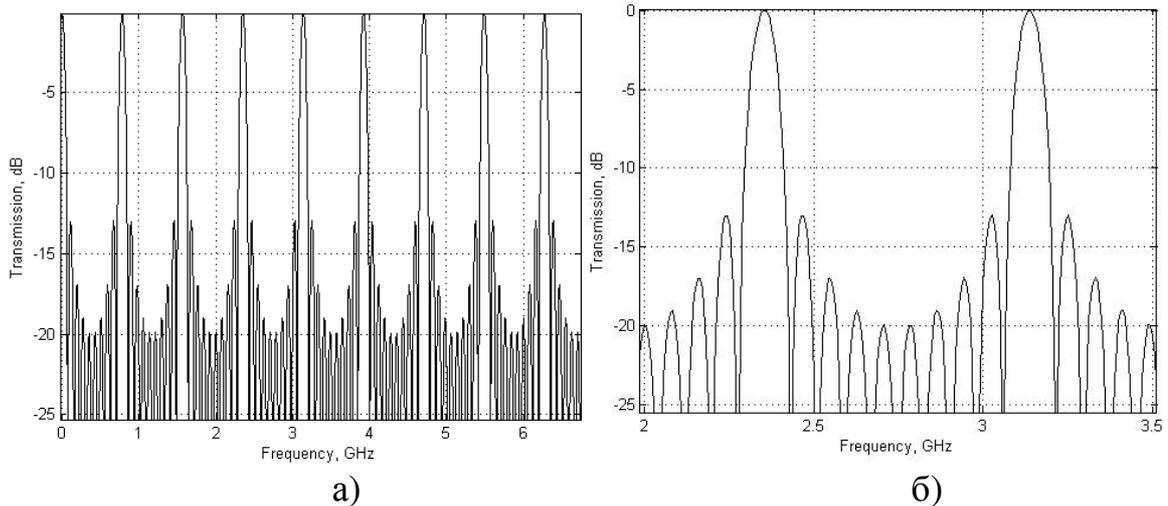


Рисунок 3 – Имитационное моделирование спектральной характеристики фотонного КИХ-фильтра: а) в диапазоне до 6,5 ГГц; б) в диапазоне от 2 до 3,5 ГГц

Данные показатели были получены при следующих условиях: количество источников оптического излучения – 10, $\Delta\lambda$ – 2.5 нм, длина оптического волокна – 30 км, и величина дисперсии 17 пс/нм·км.

В качестве исходного параметра для имитационного моделирования когерентного Лайот фильтра была выбрана величина DGD.

На рисунке 4 изображен спектральный отклик Лайот фильтра 4-го порядка. На рисунке 5 продемонстрирован спектральный отклик комбинированного фотонного СВЧ фильтра.

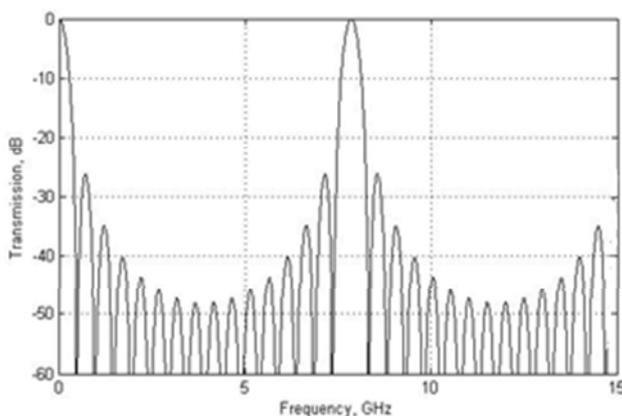


Рисунок 4 – Имитационное моделирование спектральной характеристики оптического Лайот фильтра

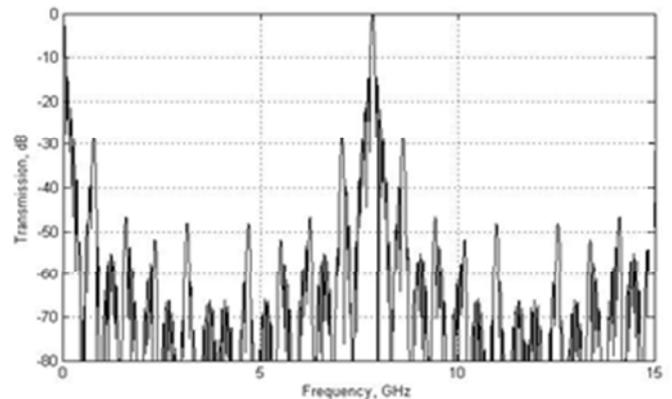


Рисунок 5 – Имитационное моделирование спектральной характеристики комбинированного фотонного СВЧ фильтра

Были проведены численные расчеты добротности фильтров. Рассчитанные данные продемонстрировали увеличение значения добротности комбинированного фотонного фильтра по сравнению с некогерентным и когерентным фотонными фильтрами.

Третья глава посвящена разработке метода формирования и управления диаграммой направленности излучающей системы в гибридных системах связи и методике оценки дисбаланса мощности излучающей системы, учитывающей вносимые потери многосердцевинной дисперсионной матрицы и перекрестные помехи между жилами многосердцевинного волокна.

Предложенная схема компактного оптического формирователя луча (рисунке 6, а) состоит из нескольких лазеров непрерывного излучения, сигнал которых промодулирован внешним электрооптическим модулятором Маха-Цендера. Затем, WDM матрица задержки на основе многосердцевинного волокна вносит относительную задержку между оптическими несущими, которая вызвана эффектом хроматической дисперсии. В заключении, WDM-сигналы демультиплексируются, попадают на фотодетектор и затем поступают на антенные излучатели. Многосердцевинная дисперсионная матрица (МДМ) состоит из N -жильных волоконно-оптических сегментов, где N – это количество независимых оптических волокон. Оптические сегменты длиной L соединены между собой оптическими коммутаторами, где идет выбор дальнейшего распространения сигнала: либо сигнал вновь поступает в следующий сегмент матрицы, либо поступает напрямую в следующий коммутатор. Общая длина дисперсионного волокна уменьшается на множитель N при использовании предложенной схемы. Для наглядности пути распространения сигнала в разработанной матрице изображена упрощенная схема распространения сигнала в МДМ (рисунке 6, б).

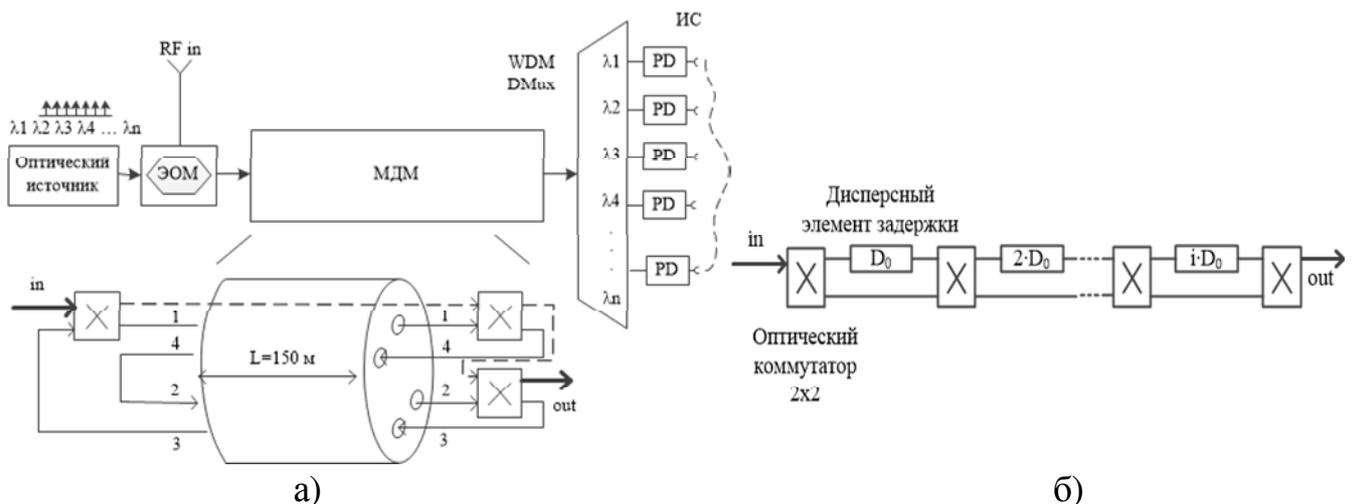


Рисунок 6 – Структурная схема фотонного фильтра формирования ДН, включая

В главе приведены теоретические расчеты временных задержек между излучающими элементами системы после прохождения оптического сигнала через дисперсионные элементы задержек.

Использование многосердцевинного оптического волокна (МСВ)

волокна влияет на ДН в двух случаях: более высокие вносимые потери по сравнению со стандартным одножильным волокном и искажения, вызванные перекрестными помехами между жилами (МПП). Применение теории связанных мощностей позволяет получить среднее значение перекрестных помех в каждом i -м сегменте, которое определяется выражением:

$$XT_i = \frac{P_{\text{отр } i}}{P_{\text{пол } i}} \quad (5)$$

где $P_{\text{отр } i}$ – выходная связанная мощность между смежными жилами, $P_{\text{пол } i}$ – выходная мощность в возбужденной жиле.

Уравнение баланса мощности связанных мод выглядит следующим образом:

$$\frac{dP_n(z)}{dz} = -\alpha P_n(z) + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^N h_{nm} [P_m(z) - P_n(z)], \quad (6)$$

где P_n – отрицательная мощность (связанная мощность от n -го волокна к волокну m), P_m – положительная мощность (мощность на выходе возбужденного волокна n), N – количество сегментов (жил) в волокне, α – коэффициент ослабления мощности, включающий вносимые потери от оптической 3D-муфты ввода\вывода.

Влияние МПП на оптический формирователь ДН может быть уменьшено за счет надлежащего выбора последовательности задействования жил. В качестве примера, в четырехжильном МСВ, МПП могут быть минимизированы путем соединения волокон в следующем порядке: с1, с4, с2, с3, как изображено на рисунках 7, а) и 7, б).

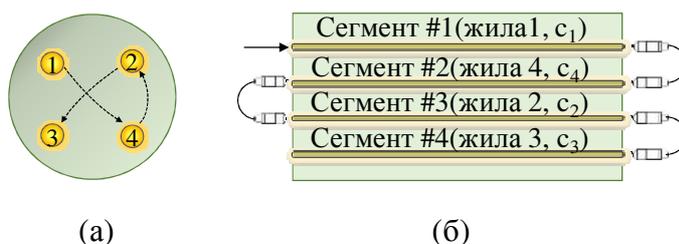


Рисунок 7 – а) Зона поперечного сечения 4х-жильного волокна;
б) оптимальное соединение МСВ волокон

Этот эффект в купе со вносимыми потерями оптического формирователя ДН сформирует верхнюю границу масштабируемости оптических многосердцевинных схем формирователей ДН с точки зрения количества углов перестроения.

Многосердцевинное волокно, как правило, обладает более высокими показателями вносимых потерь, чем стандартное волокно вследствие сложности прохождения света в местах соединения различных волокон. Это, в свою очередь, вносит дисбаланс амплитуд между углами перестроения, как показано на рисунке 8, где не учитывается дисбаланс в оптических коммутаторах.

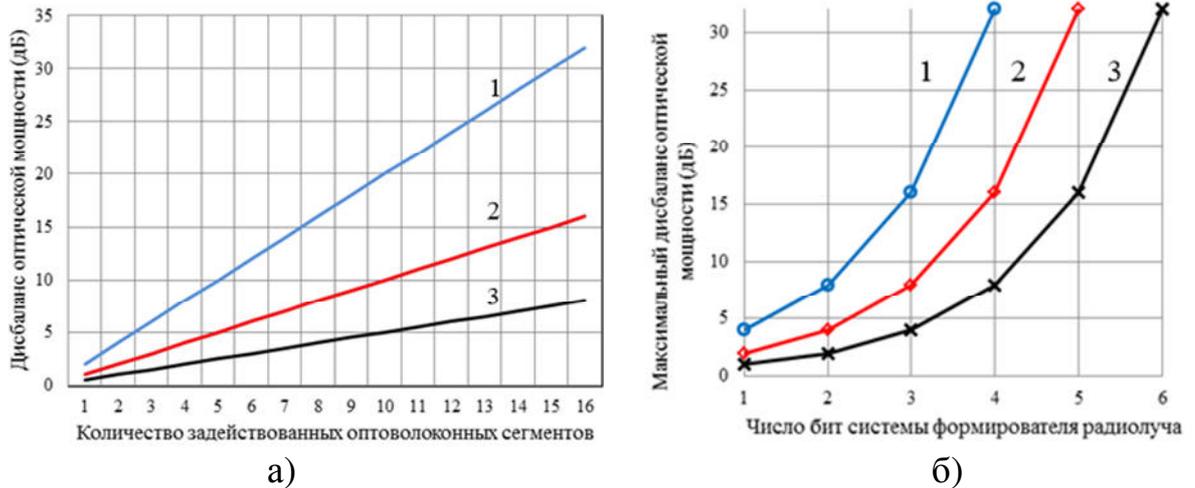


Рисунок 8 – а) Изменение оптической мощности в зависимости от положения угла поворота радиолуча для 4-битной оптической системы формирования луча для различных вносимых потерь МСВ;
 б) Максимальный дисбаланс оптической мощности в зависимости от числа углов поворота (число бит оптической системы формирования луча) для различных вносимых потерь МСВ
 (номер 1 – 2 дБ, номер 2 – 1 дБ, номер 3 – 0.5 дБ)

Анализ показывает, что основные ограничения в масштабируемости оптических формирователей ДН на основе МСВ обусловлены затуханиями на муфтовых соединениях (англ. *fan-in/fan-out*) и межканальными перекрестными помехами, оказывающих второстепенное влияние, что приводит к потерям, зависимым от числа задействованных волоконных сегментов, которые могут быть компенсированы с помощью фиксированных оптических аттенюаторов или за счет динамической регулировки амплитуды оптических несущих с помощью оптических усилителей, а также разработке оптических кабелей с большим числом волокон и уменьшенным значением МПП.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальной реализации разработанного метода управления фазой излучающей системы и структуры фотонного реконфигурируемого комбинированного СВЧ фильтра.

Эксперименты проводились на базе лаборатории «Оптического доступа и сетей следующего поколения» Технологического Центра Нанопотоники Политехнического Университета Валенсии, г. Валенсия, Испания.

Для демонстрации работоспособности разработанного метода управления ДН излучающей системы была организована экспериментальная установка, согласно структурной схеме, изображенной на рисунке 9.

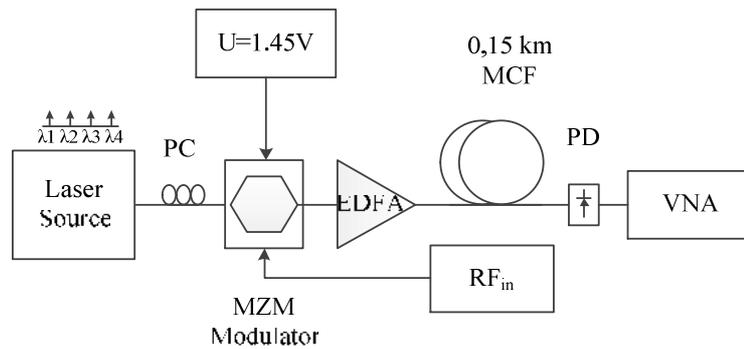
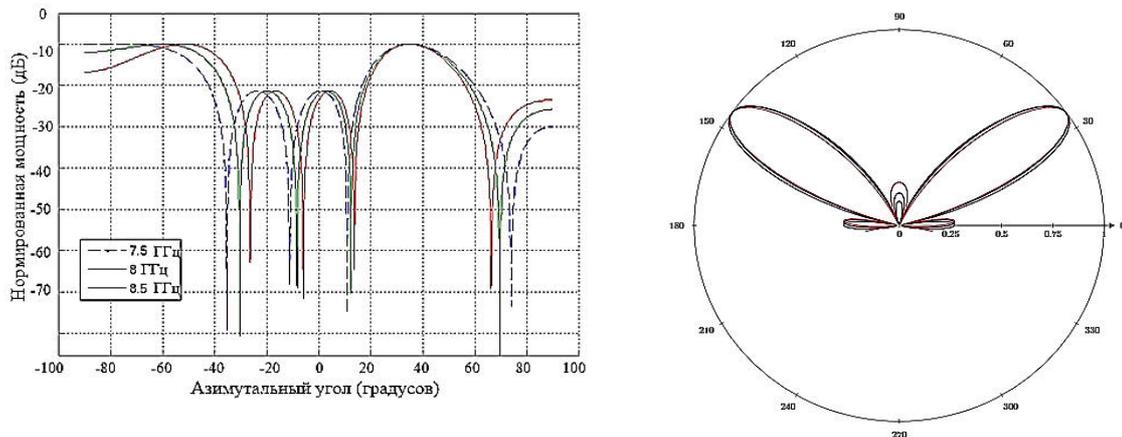


Рисунок 9 – Структурная схема экспериментальной установки оптического формирователя радиолуча на основе МДМ

В результате данного экспериментального исследования были получены значения относительного фазового сдвига между излучающими элементами для изменения направления диаграммы направленности излучающей системы, что позволило получить необходимые углы ДН. Также было продемонстрировано отсутствие дрожания фазы, что привело к



а)

б)

Рисунок 10 – Полученная ДН излучающей системы для частот 7.5, 8 и 8.5 ГГц, демонстрирующая отсутствие дрожания луча

а) в прямоугольной системе координат

б) в полярной системе координатах

неизменности направления ДН излучающей системы в зависимости от радиочастоты (рисунок 10). Полученный результат позволил повысить помехоустойчивость системы связи за счет постоянства величины принимаемой мощности, т.к. отклонение основного лепестка приводило к снижению уровня принимаемого сигнала. Показатель помехоустойчивости увеличился на 3 дБ по отношению к системам связи с дрожанием фазы.

Согласно полученным результатам измерений мощности на фотоприемнике, были получены значения дисбаланса оптической мощности, изображенные на рисунке 11.

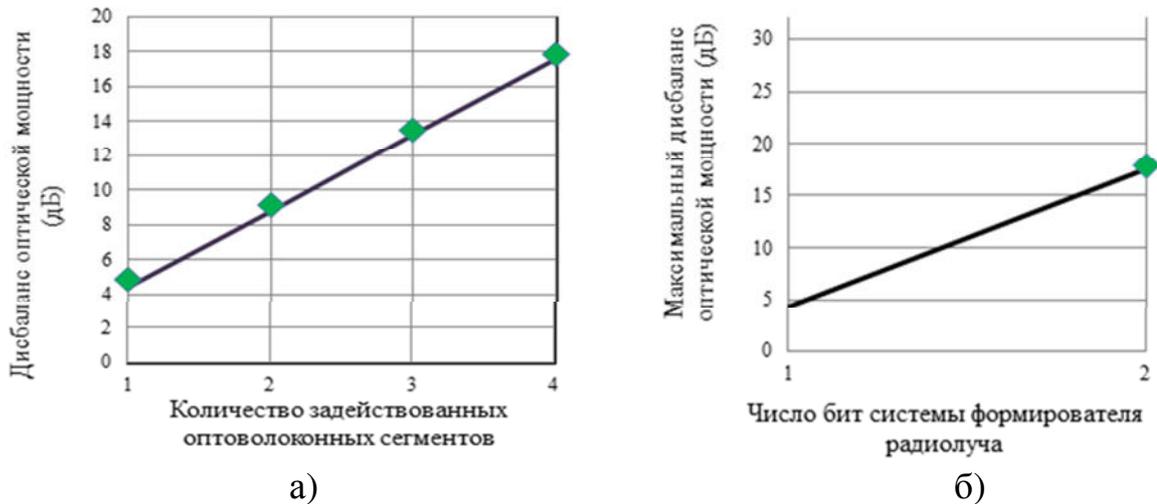


Рисунок 11 – Экспериментальные и симуляционные результаты дисбаланса оптической мощности в зависимости от: а) положения угла поворота радиолуча МДМ; б) числа углов поворота

На рисунке 12 демонстрируется численная оценка среднего значения МПП как функция от количества сегментов (жил, используемых для передачи информации) в 4х-жильном оптическом волокне (рисунке 7 б) при рассмотрении различных радиусов изгиба R_b .

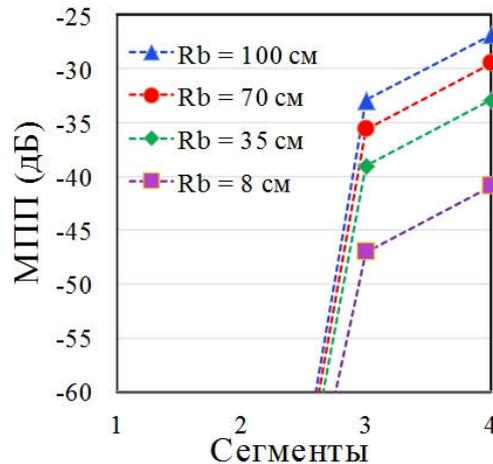


Рисунок 12 – Экспериментальная оценка МПП в МСВ волокне в зависимости от числа сегментов (подключенных жил)

Как можно видеть, перекрестные помехи возрастают, когда задействуется большее количество волоконных сегментов.

В главе приведен сравнительный анализ улучшения габаритных показателей разработанного фотонного фильтра на основе МДМ, который показал, что аналогичная структура фильтра на основе коммутирующих линий задержки требовала бы 1,5 км SMF-волокна, что в 10 раз превышает длину МСВ волокна, и примерно в 2 раза сократились габариты оптической системы формирователя радиолуча.

Экспериментальная установка фотонного реконфигурируемого комбинированного СВЧ фильтра для подавления периодических

спектральных полос пропускания была организована согласно структурной схеме, представленной на рисунке 13.

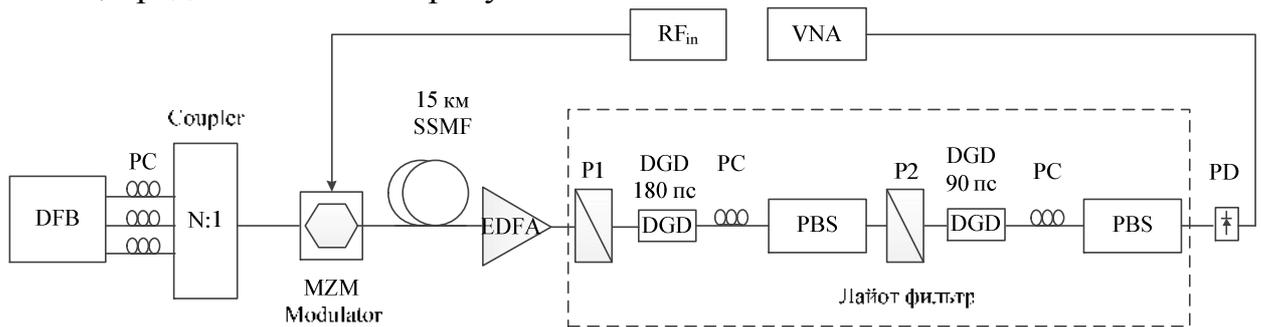


Рисунок 13 – Структурная схема экспериментальной установки фотонного реконфигурируемого комбинированного СВЧ фильтра

Избирательность фильтра оценивается Q -фактором или добротностью, которая представляет собой отношение FSR к ширине полосы главного лепестка по уровню -3 дБ, и определяется согласно следующему выражению:

$$Q = \frac{FSR}{\Delta\Omega}. \quad (7)$$

Спектральный отклик трехотводного некогерентного КИХ-фильтра изображен на рисунке 14, где теоретический спектральный отклик, полученный из выражения (1), совмещен с экспериментальным результатом. Величина FSR равна 2,7 ГГц, $\Delta\Omega$ составляет 700 МГц по уровню -3 дБ.

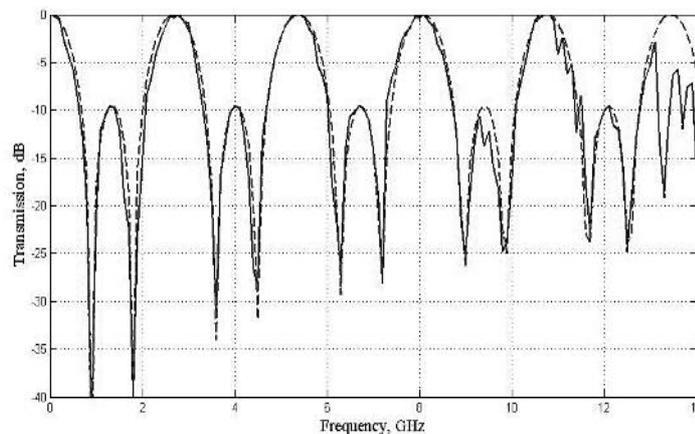


Рисунок 14 – Экспериментальный (сплошная линия) и теоретический (пунктирная линия) отклики трехотводного КИХ-фильтра

Согласно (7) величина добротности фотонного КИХ-фильтра равна 3,86.

Оптический Лайот фильтр второго порядка реализован на основе устройства перестраиваемой дифференциальной групповой задержки с временными задержками 180 и 90 пс. На рисунке 15 изображен отклик Лайот фильтра второго порядка. Величина FSR равна 10,75 ГГц, $\Delta\Omega$ составляет 2,8 ГГц по уровню -3 дБ.

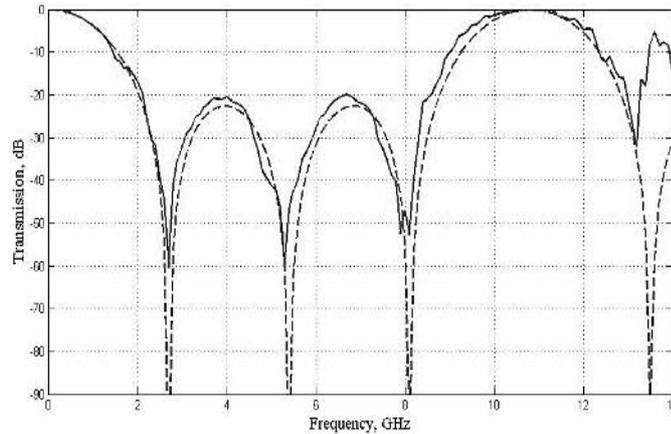


Рисунок 15 – Экспериментальный (сплошная линия) и теоретический (пунктирная линия) отклики Лайот фильтра второго порядка

Согласно (7) величина добротности Лайот фильтра второго порядка равна 3,84.

Спектральный отклик реконфигурируемого комбинированного фотонного СВЧ фильтра изображен на рисунке 16. Величина FSR равна 10,75 ГГц, $\Delta\Omega$ составляет 750 МГц по уровню -3 дБ.

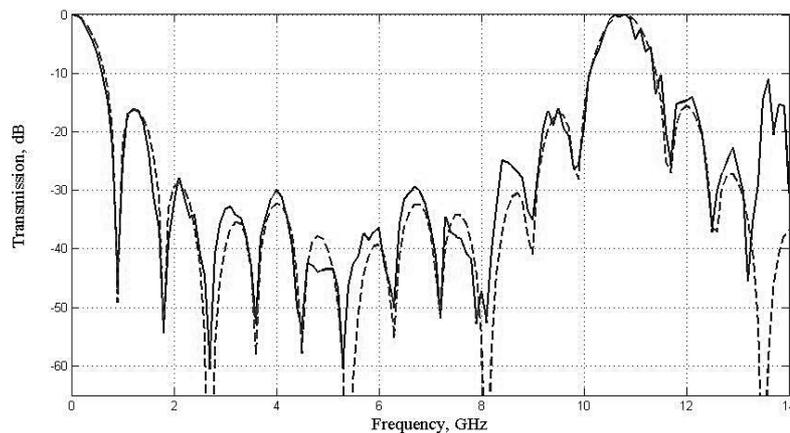


Рисунок 16 – Экспериментальный (сплошная линия) и теоретический (пунктирная линия) отклики полосового комбинированного фотонного СВЧ фильтра

Согласно (7) величина добротности комбинированного фотонного фильтра равна 14,33.

Полученные экспериментальные результаты исследования показали, что добротность разработанного комбинированного фотонного СВЧ фильтра увеличилась в 3-4 раза по сравнению с фотонным КИХ-фильтром. На основании этих данных было проанализировано изменение показателя спектральной эффективности системы, которая увеличилась в 6-8 раз.

Увеличение добротности комбинированного фильтра по отношению к оптическому Лайот фильтру второго порядка приводит к увеличению помехоустойчивости системы на 5 дБ согласно уменьшению вероятности битовой ошибки с 10^{-2} до 10^{-4} .

В заключении изложены основные научные результаты, полученные в диссертационной работе в ходе исследования.

В приложениях приведены: акты внедрения результатов работы в «ОАО НПП Полигон» и в учебном процессе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. *Разработан* метод подавления периодических спектральных полос пропускания фотонного некогерентного многоотводного КИХ-фильтра в гибридных системах связи *основанный* на эффекте Верньера, *отличающийся* последовательным включением когерентного оптического фильтра с некогерентным фильтром, что *позволяет* перестраивать ЧХ внутри рабочего диапазона частот пропускания на выходе фотонного СВЧ фильтра, *позволивший* увеличить спектральную эффективность канала связи в 6-8 раз.

2. *Разработана* структура реконфигурируемого комбинированного СВЧ фильтра, основанная на фотонной технологии, *отличающаяся* использованием когерентного оптического Лаойт фильтра второго порядка совместно с некогерентным многоотводным фотонным КИХ-фильтром, *позволившая* повысить помехоустойчивость на 5 дБ за счет повышения добротности разработанного фотонного фильтра.

3. *Разработан* метод управления фазой излучающей системы в гибридных системах связи, основанный на линейности фазо-частотной характеристики, *отличающийся* использованием многосердцевинной дисперсионной матрицы и *позволяющий* управлять фазой излучающей системы, исключая дрожание, и сократить массогабаритные показатели гибридной системы связи. Разработанный метод *позволяет* улучшить помехоустойчивость системы на 3 дБ, весовые показатели оптической системы формирования радиолуча в 8-10 раз и габаритные в 2 раза.

4. *Разработана* методика оценки дисбаланса мощности излучающей системы, *отличающаяся* учетом вносимых потерь многосердцевинной дисперсионной матрицы и перекрестных помех между жилами многосердцевинного волокна, *позволяющая* учитывать изменение оптической мощности в зависимости от структуры фильтра, формирующего дискретные отсчеты сигнала. Разработанная методика *позволила* оценить величину компенсирующего затухания или усиления в зависимости от используемого МСВ волокна и оптимальное соединение волокон.

Перспективы дальнейшей разработки темы. В рамках дальнейших исследований планируется исследование многосердцевинных дисперсионных матриц на основе многосердцевинных волокон с большим количеством жил. Планируется разработка новых методов реконфигурации фотонных СВЧ фильтров и оптимизация существующих. В области фильтрации интересно исследовать фильтры более высоких порядков.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Зайнуллин, А.Р. Метод синтеза прогнозирующего фильтра на основе многомерной линейной экстраполяции для повышения эффективности беспроводных телекоммуникационных систем / И.К. Мешков, Е.П. Грахова, Р.В. Кутлюяров // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – т.9. №3. – с. 76-79.
2. Зайнуллин, А.Р. Исследование статистики распределения перекрестных помех в многожильных волокнах / Зайнуллин А.Р. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016. – т.12, №3. – с. 64-69.
3. Зайнуллин, А.Р. Разработка метода формирования диаграммы направленности излучающей системы в гибридных сетях передачи данных./ А.Р. Зайнуллин. // Инфокоммуникационные технологии. – 2017. – т.15. №2.– с. 187-195.
4. Зайнуллин, А.Р. Метод подавления периодических спектральных полос пропускания на основе комбинированного фотонного СВЧ-фильтра в гибридных сетях связи / А.Р. Зайнуллин, В.Х. Багманов. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – т.13. №1. – с. 54-60.

В других изданиях

1. Зайнуллин, А.Р. WDM signal impairments due to the cross-modulation in the case of nonlinear transmission in the presence of PMD. / A. Kh. Sultanov, V.Kh. Bagmanov, A.R. Zainullin. // Optical Technologies for Telecommunications: SPIE Proceedings – 2013. – vol. 8787. – pp. 878704-6.
2. Зайнуллин, А.Р. Волоконно-оптическая линия передачи для систем ROF с дистанционной накачкой. / И.Л. Виноградова, А.Х. Султанов, И.К. Мешков, А.В. Андрианова, Е.П. Грахова, А.А. Ишмияров, А.Р. Зайнуллин. // Материалы XII Международной научно-технической конференции «Оптические технологии в телекоммуникациях», Казань. – 2014, т.3, стр. 65-68.
3. Зайнуллин, А.Р. Fiber optic line for RoF systems with remote and local pump EDFA. // А.Х. Султанов, И.К. Мешков, И.Л. Виноградова, А.А. Ишмияров, А.Р. Зайнуллин, А.В. Андрианова, Е.П. Грахова // Optical Technologies for Telecommunications: SPIE Proceedings – 2014. – V. 9533. – P. 953302-9.
4. Зайнуллин, А.Р. Излучение антенной решетки для СШП RoF и способ коррекции ее диаграммы направленности. / Абдрахманова Г.И., Виноградова И.Л., Султанов А.Х., Мешков И.К., Андрианова А.В., Грахова Е.П., Ишмияров А.А., Зайнуллин А.Р. // Материалы XVI Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Уфа. – 2015, т.1, стр. 147-149.
5. Зайнуллин, А.Р. SCRF spectral mask compliant ultra-wideband signal generation approaches for RoF systems. / А.В. Андрианова, И.К. Мешков,

А.Х. Султанов, И.Л. Виноградова, Г.И. Абдрахманова, Е.П. Грахова, А.А. Ишмияров, А.Р. Зайнуллин. // Optical Technologies for Telecommunications: SPIE Proceedings – 2015. – V. 9807. – pp. 980704-8.

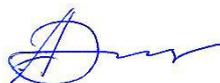
6. Зайнуллин, А.Р. Towards multidimensional multiplexing in multicore fiber optical data links. / A. Zainullin, R. Llorente, A. Macho, D. Garcia-Rodriguez, M. Morant, J. L. Corral. // Proceedings of Transparent Optical Networks (ICTON). – 2016. – Мо.С1.4. – pp. 1-4.

7. Зайнуллин, А.Р. Способ оптического формирования луча фазированной антенной решетки с использованием дисперсионного модуля задержек. / А.Р. Зайнуллин, Р. Лоренте, В.Х. Багманов. // Материалы IX международной научно-практической конференции «Молодой ученый: вызовы и перспективы», секция 44, Москва. – 2016. – № 7(9). – с. 475-479.

8. Зайнуллин, А.Р. Гибридная система передачи данных на основе многосердцевидного волокна. / А.Р. Зайнуллин, В.Х. Багманов. // Материалы XVII международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Самара. – 2016. – с. 506-507.

9. Зайнуллин, А.Р. Multicore fiber beamforming network for broadband satellite communications. / A. Zainullin; B. Vidal, A. Macho, R. Llorente. // Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications X: SPIE Proceedings. – 2017. – vol.10103. – pp. 1010310-7.

Диссертант



А.Р. Зайнуллин

ЗАЙНУЛЛИН Айрат Радикович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ
НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНЫХ ФОТОННЫХ ОПТОВОЛОКОННЫХ
МИКРОВОЛНОВЫХ ФИЛЬТРОВ**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати _____2017. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.
Усл.печ.л. 1,0. Уч.-изд.л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № ____

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-Центр, К.Маркса, 12