

На правах рукописи



АНДРИАНОВА Анна Владимировна

**РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО СЕГМЕНТА
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ
НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ RADIO-OVER-FIBER**

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

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

Уфа – 2016

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

- Научный руководитель: д-р техн. наук, профессор
Султанов Альберт Ханович,
заведующий каф. телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»
- Официальные оппоненты: д-р техн. наук, доцент
Бурдин Антон Владимирович,
помощник ректора по инновациям, профессор кафедры линий связи и измерений в технике связи ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»
- кандидат техн. наук
Талипов Анвар Айратович,
старший научный сотрудник лаборатории фотоники и волоконной квантовой оптики казанского квантового центра «КАИ-Квант» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ»
- Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Новосибирск

Защита диссертации состоится 07 октября 2016 г. в 10⁰⁰ 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 « ___ » _____ 20__ года.

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



И.Л. Виноградова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Применение систем Radio-over-Fiber (RoF) позволяет обеспечить всем без исключения абонентам услуги широкополосного доступа. Данное направление особенно актуально в удаленных от города населенных пунктах, где требуется прокладка дополнительной кабельной линии для подключения абонентов к центру коммутации операторов. Системы Radio-over-Fiber с простой и недорогой организацией базовой станции (модуль удаленного доступа – RAU – remote antenna unit) позволяют решить эту задачу, так как стоимость подключения таких абонентов к информационно-коммуникационной сети Интернет значительно уменьшается. При этом системы RoF позволяют решать радиотехнические задачи, что делает их привлекательными для использования совместно с системами беспроводной передачи данных. Технология сверхширокополосной (СШП) передачи данных обладает несколькими ключевыми преимуществами: широкая безлицензионная полоса частот, низкая изотропная излучаемая мощность, низкий уровень межсимвольной интерференции. Применение СШП-систем передачи на базе технологии RoF позволяет организовать высокоскоростную передачу данных, при этом обеспечить высокую помехозащищенность полезных сигналов, и соответственно качество предоставляемых услуг. Однако при построении волоконно-оптического сегмента таких систем возникают вопросы, которые необходимо решить: а) простой и эффективный способ генерации СШП-сигнала на центральной станции; б) возможность передачи СШП-сигнала по протяженным волоконно-оптическим линиям связи; в) простые и эффективные решения радиотехнических задач (например, управление диаграммой направленности антенной решетки) средствами оптики.

Степень разработанности темы. Технология Radio-over-Fiber начала активно исследоваться с конца 1980-х годов. Применение технологии RoF для интеграции волоконно-оптических кабельных и беспроводных систем было впервые представлено в работах A.J. Cooper. Сверхширокополосные системы передачи на базе технологии Radio-over-Fiber исследуются в работах R. Llorente, I.T. Monroy, S.T. Abraha. В данных работах рассматривается в основном оптическая генерация СШП-сигнала в системах СШП-RoF. Однако во всех представленных работах СШП-сигнал генерируется с учетом требований американской комиссии FCC (Federal Communication Commission – Государственная комиссия по коммуникациям). В Российской Федерации же приняты требования Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ).

Методы увеличения длины безрегенерационного участка рассмотрены в работах P.Bousselet, P. Borel, J.D. Downie, H. Bissessur, Турицына С.К., Волкова К.А. В работах P.Bousselet, P. Borel, J.D. Downie, H. Bissessur предлагается использовать усилители с удаленной накачкой, либо усилители высокой мощности. Данные методы не рассматриваются применительно к системам RoF. В работах Волкова К.А. предлагается использование квазисолитонного режима передачи с плотным управлением дисперсии в системах RoF. Однако данный под-

ход также усложняет передающую часть системы RoF. Поэтому предлагается вносить корректирующий чирп в оптический сигнал для его передачи по протяженной волоконно-оптической линии. Чирпирование позволяет уйти от использования электронных компенсаторов дисперсии, что нежелательно при построении системы СШП-RoF.

Методы оптического управления диаграммой направленности антенной решетки рассмотрены в работах М. Burla, А. Meijerink, В. Vidal. В работах М. Burla и А. Meijerink предлагается использовать оптоэлектронный чип, на котором реализованы фазовращатели и линии задержки для управления диаграммой направленности антенной решетки. В работах В. Vidal предлагается использовать перестраиваемые лазеры для быстрого управления диаграммой направленности антенной решетки. Методы, предлагаемые в данных работах, не позволяют работать с одним радиопередатчиком для всего СШП-диапазона и требуют большого количества управляющих элементов. Для управления диаграммой направленности антенной решетки предлагается использовать оптическое устройство управления. Применение такого устройства в системах СШП-RoF позволит увеличить энергоэффективность передатчика совместно с уменьшением его массогабаритных показателей.

Объект исследования. Сверхширокополосные системы передачи информации на основе технологии Radio-over-Fiber.

Предмет исследования. Методы повышения эффективности волоконно-оптического сегмента систем СШП-RoF.

Целью работы является повышение эффективности волоконно-оптического сегмента систем СШП-RoF за счет увеличения протяженности безрегенерационного сегмента волоконно-оптических линий связи, использования оптических средств для управления диаграммой направленности антенной решетки.

Задачи исследования:

1. Разработка математической модели сигнала, передаваемого в системах СШП-RoF, позволяющая моделировать его в программной среде для подстройки параметров сигнала под заданную волоконно-оптическую линию RoF с целью минимизации искажений.

2. Разработка метода увеличения протяженности волоконно-оптической линии RoF без использования электронной регенерации и восстановления сигнала.

3. Разработка математической модели функции корректирующего чирпа оптического сигнала, позволяющая адаптивно определять чирп в зависимости от параметров системы СШП-RoF.

4. Разработка метода управления диаграммой направленности антенной решетки с помощью средств волоконно-оптической линии RoF.

Научная новизна работы:

1. Разработана математическая модель сигнала, передаваемого в системах СШП-RoF, основанная на временной функции оптического сигнала на выходе модулятора Маха-Цендера, отличающаяся внесением корректирующего чирпа

в оптический сигнал СШП-RoF, и *позволяющая* рассчитать параметры сигнала в зависимости от параметров волоконно-оптической линии связи, что обеспечивает минимизацию искажений.

2. Предложен метод построения безрегенерационного сегмента волоконно-оптической линии RoF, *основанный* на использовании квазисолитонного режима передачи, *отличающийся* внесением корректирующего чирпа в оптический сигнал за счет использования нелинейного оптического волокна, усилителей EDFA, совместно распространяющейся накачки с сигналом и принципом расстановки EDFA на волоконно-оптической линии RoF, и *позволяющий* передавать сигнал по протяженной волоконно-оптической линии RoF без использования электронной регенерации сигнала.

3. Разработана математическая модель функции корректирующего чирпа, *учитывающая* электрооптические свойства модулятора Маха-Цендера, *позволяющая* моделировать изменение рабочей точки модулятора исходя из свойств кристалла ниобата лития, что *обеспечивает* адаптивную подстройку чирпа в зависимости от параметров системы СШП-RoF.

4. Разработан метод управления диаграммой направленности антенной решетки, *основанный* на изменении фазы сигналов с помощью задержек, управляемых с использованием оптического устройства управления, входящего в состав волоконно-оптической линии RoF, *учитывающий* мощность, поступающую из выходных световодных каналов оптического устройства управления и параметры управляющего воздействия, и *позволяющий* отклонять основной лепесток радиоизлучения антенной решетки с помощью средств волоконно-оптической линии.

Теоретическая и практическая ценность полученных результатов состоит в возможности использования предложенного метода построения безрегенерационного сегмента волоконно-оптической линии связи, как при проектировании новых сетей передачи данных, так и при модернизации уже существующих сетей. Внесение корректирующего чирпа в оптический сигнал позволяет передать его без искажений по протяженной волоконно-оптической линии связи, при этом используется только модулятор Маха-Цендера, что значительно снижает стоимость передающего оборудования. Управление диаграммой направленности с помощью оптического устройства управления позволяет вынести антенну на большое расстояние от передатчика, что актуально при построении ведомственных сетей связи. Разработанная функция корректирующего чирпа обеспечивает адаптивную подстройку чирпа в зависимости от параметров системы СШП-RoF.

Методология и методы исследования. Результаты работы получены с использованием численных методов, теории электрической связи, теории случайных процессов, теории функции комплексной переменной, теории физики сплошных сред. Применены методы математического моделирования, с использованием программных пакетов.

Положения выносимые на защиту:

1. Математическая модель сигнала, передаваемого в системах СШП-RoF,

основанная на временной функции оптического сигнала на выходе модулятора Маха-Цендера.

2. Метод построения безрегенерационного сегмента волоконно-оптической линии RoF, основанный на использовании квазисолитонного режима передачи.

3. Математическая модель функции корректирующего чирпа, учитывающая электрооптические свойства модулятора Маха-Цендера.

4. Метод управления диаграммой направленности антенной решетки, основанный на изменении фазы сигналов с помощью задержек, управляемых с использованием оптического устройства управления, входящего в состав волоконно-оптической линии RoF.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации основана на использовании известных теоретических положений; корректности используемых математических моделей и их адекватности реальным физическим процессам.

Апробация результатов. Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XV и XVI Международной научно-технической конференции “Проблемы техники и технологии телекоммуникаций”, г. Казань, 2014 г., г. Уфа, 2015 г., XII и XIII Международной научно-технической конференции “Оптические технологии в телекоммуникациях”, г. Казань, 2014 г., г. Уфа, 2015 г., IV Международной конференции по фотонике и информационной оптике, г. Москва, 2015 г., XI Международной IEEE Сибирской конференции по управлению и связи SIBCON-2015, г. Омск, 2015 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 6 статей в зарубежных научных изданиях, входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus, 5 работ в сборниках трудов и материалах конференции, получен патент на полезную модель РФ.

Личный вклад. Постановка основных задач принадлежит научному руководителю. Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно. Самостоятельно были разработаны: математическая модель сигнала, передаваемого в системах СШП-RoF, математическая модель функции корректирующего чирпа, метод построения безрегенерационного сегмента волоконно-оптической линии СШП-RoF, метод управления диаграммой направленности. Также автором диссертации были самостоятельно получены результаты имитационного моделирования и результаты эксперимента.

Материалы диссертационной работы использовались при выполнении проекта №2048, в рамках базовой части государственного задания №2014/240 по теме «Развитие теории и разработка технических принципов формирования, передачи и преобразования спиральных пучков в волоконно-оптических телекоммуникационных системах».

Материалы диссертационной работы использовались при выполнении соглашения о предоставлении субсидии №14.574.21.0058, уникальный иденти-

фикатор проекта RFMEFI57414X0058 по теме «Повышение эффективности систем широкополосного доступа к мультимедийным услугам, работающих по технологии Radio-over-Fiber (RoF), на основе совершенствования элементов и устройств физического уровня» в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Содержит 165 с. машинописного текста, 100 рисунков, список использованной литературы из 99 наименований, приложения на 6 с.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована основная цель работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены сверхширокополосные системы передачи информации на базе технологии Radio-over-Fiber, проведен анализ существующих методов генерации СШП-сигнала оптическим способом в системах СШП-RoF, проведен анализ способов построения безрегенерационного сегмента в волоконно-оптических линиях связи, проведен анализ способов оптического управления диаграммой направленности антенной решетки.

В исследованных источниках задача оптической линии системы RoF сводится фактически к передаче сигнала, и задача генерации СШП-радиосигнала легко достижима. Однако данный подход не является оптимальным, т.к. в нем не учтено влияние оптической линии. Выбор способа формирования сигнала следует производить с оценкой сложности реализации электрическими или оптическими средствами системы с выбором наиболее предпочтительного, с учётом подзадач/требований, предъявляемых к оптической линии со стороны общих тенденций развития волоконно-оптических систем передачи (ВОСП). Компенсация искажений в традиционных волоконно-оптических линиях связи и на оптических линиях RoF имеет существенное отличие. В первом случае достаточно неизменности длительности импульса или разности фаз двух гармонических сигналов, поляризованных ортогонально, во втором случае – накладывается более жёсткое требование: неизменность не только длительности, но и формы оптического импульса. В исследованных работах по оптическому управлению диаграммой направленности антенной решетки, предлагается использовать только узкую часть СШП-диапазона, при этом возрастает количество управляющих элементов. В первой главе были сформулированы задачи исследования.

Во второй главе предлагаются схемные решения поставленных задач. Исследуемый волоконно-оптический сегмент системы СШП-RoF приведен на рис. 1.

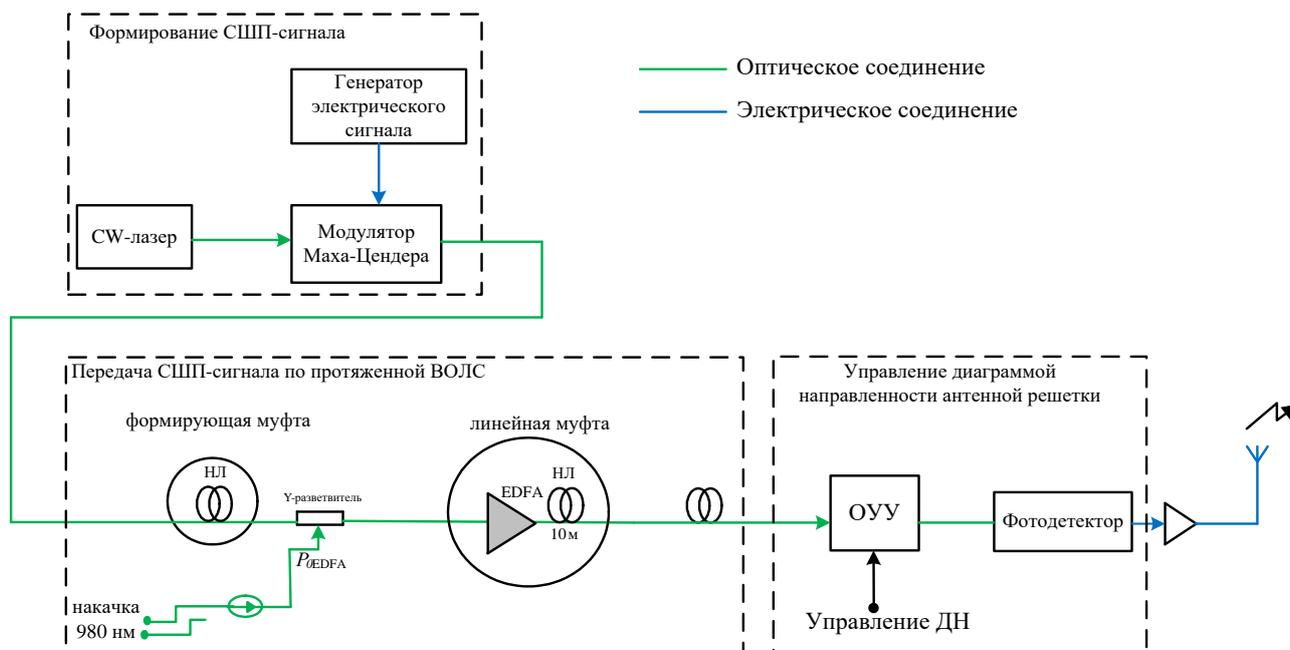


Рис. 1 – Исследуемый волоконно-оптический сегмент системы СШП-RoF

Схема состоит из следующих элементов: блок формирования СШП-сигнала, волоконно-оптическая линия связи и блок управления диаграммой направленности.

СШП-сигнал формируется следующим образом: на электрический вход модулятора Маха-Цендера поступает электрический сигнал, формируемый генератором сигналов. В качестве генератора сигналов может использоваться генератор специальной формы (AWG-генератор) или генератор псевдослучайной последовательности (PRBS-генератор). Электрический сигнал модулирует оптическую несущую, поступающую с CW-лазера. Далее сформированный оптический сигнал поступает в волоконно-оптическую линию. Для передачи сигнала по протяженной (более 100 км) линии связи используется EDFA-усилитель с дистанционной накачкой и совместно с ним – нелинейное волокно. Пройдя по волоконно-оптической линии связи, оптический сигнал поступает на устройство оптического управления, осуществляющего управление диаграммой направленности. Затем оптический сигнал поступает на фотодетектор, где происходит его преобразование в электрический сигнал и далее электрический сигнал передается через антенну в радиоэфир.

Для генерации СШП-сигнала предлагаются схемы с использованием модулятора Маха-Цендера и с прямой модуляцией волоконного лазера.

При передаче сигнала по протяженной волоконно-оптической линии связи происходит его искажение, вызванное влиянием хроматической дисперсии и нелинейных эффектов, что приводит к нарушению приема сигнала. Традиционные методы компенсации дисперсии, основанные на поочерёдном включении сегментов оптического волокна (ОВ) с коэффициентами дисперсии различных знаков, применение локально включаемых устройств, задерживающих определённые спектральные составляющие, тем самым точно выравнивая фазовые скорости их распространения, оказываются в такой ситуации недоста-

точно эффективными. Это и оправдывает апробацию солитонов или так называемого квазисолитонного режима передачи (КСП), «работающего» с чирпированным сигналом, что позволяет снизить влияние дисперсии посредством использования специфики взаимодействия такого сигнала с материалом ОВ, являющегося нововведением с точки зрения традиционного построения волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП). Чирп – изменение мгновенной частоты (или длины волны) на протяжении длительности импульса (рис. 2).

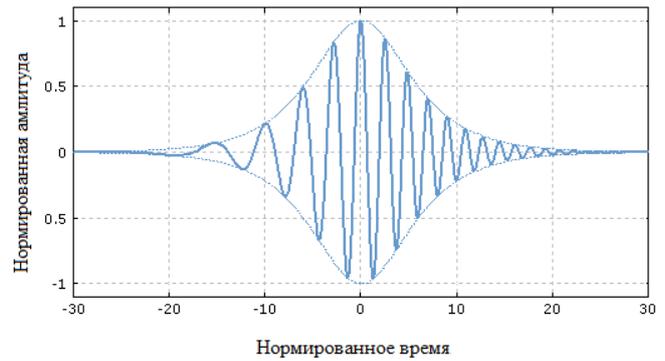


Рис. 2 – Временная форма чирпированного импульса

Для организации квазисолитонного режима передачи предлагается использовать схему, представленную на рис. 3.

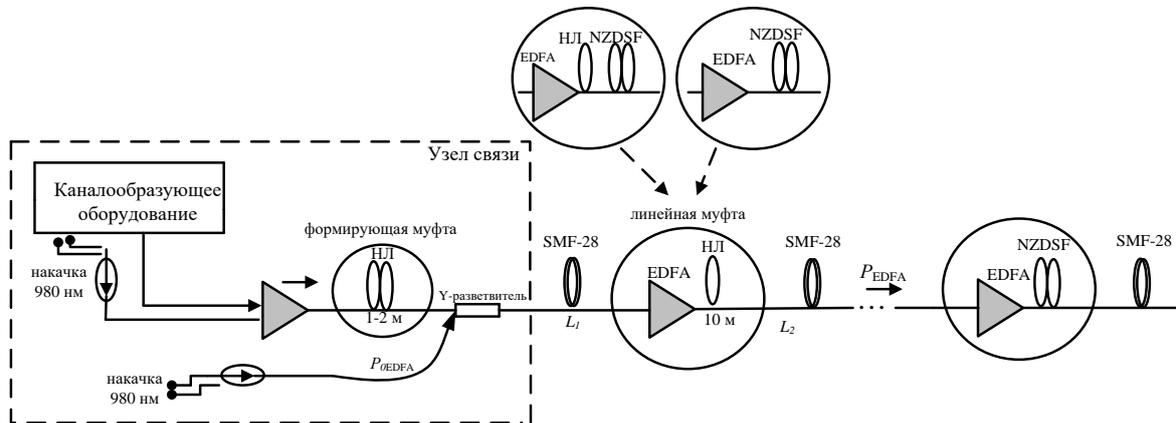


Рис. 3 – Схема создания КСП на ВОЛП с дистанционной накачкой EDFA, расположенных в муфтах восстановления КСП

Предлагается использовать легированные эрбием световоды EDFA и совместно с ними – нелинейное оптическое волокно (НЛ ОВ), возможно также использовать оптическое волокно с нулевой смещенной дисперсией (NZDSF), во входной, и в последующих линейных муфтах. Накачку расположенных на линии усилителей EDFA ($\lambda_{EDFA}=980$ нм) следует производить дистанционно. Усиленный мощный импульс с амплитудой $P_{0,вх}$, проходя через НЛ ОВ, приобретает положительный чирп из-за фазовой самомодуляции, и далее, распространяясь через оптическое волокно, подвергается перестройке спектральных составляющих. Соответственно в процессе преобразования чирпа от начального положительного на отрицательный – на выходе ВОЛП, длительность импульса остаётся практически неизменной. Это позволит сохранить полностью оптический принцип при КСП, т.е. не использовать электрические компоненты в зоне ВОЛП. Кроме того – усилить позитивное влияние эффекта нелинейного преломления: дополнительно к влиянию со стороны НЛ ОВ в муфтах – ещё и появление фазовой кросс-модуляции (ФКМ) между излучением накачки и ин-

формационного сигнала в ОВ, также вызывающей положительное чирпирование, увеличивая тем самым расстояние до следующего пункта регенерации с необходимостью восстановления электронными средствами.

Для управления диаграммой направленности предлагается использовать оптическое устройство управления (ОУУ). При этом для выравнивания пространственно-частотной характеристики диаграммы направленности (ДН) антенной решетки (АР) предлагается в составе решетки использовать большее число излучателей, чем требуется для создания заданных направленных свойств радиолинии, а их запитывание (подачу сигнала) производить не идентично, а с разделением на частотные поддиапазоны (вдоль направления y), рис. 4.

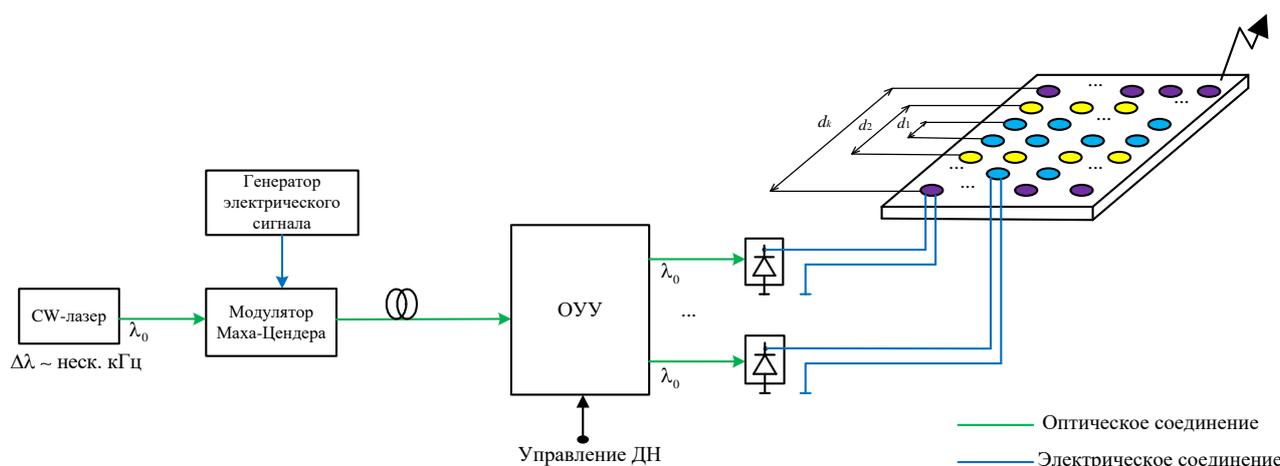


Рис. 4 – Схема линии передачи для СШП-RoF с излучающей антенной решеткой

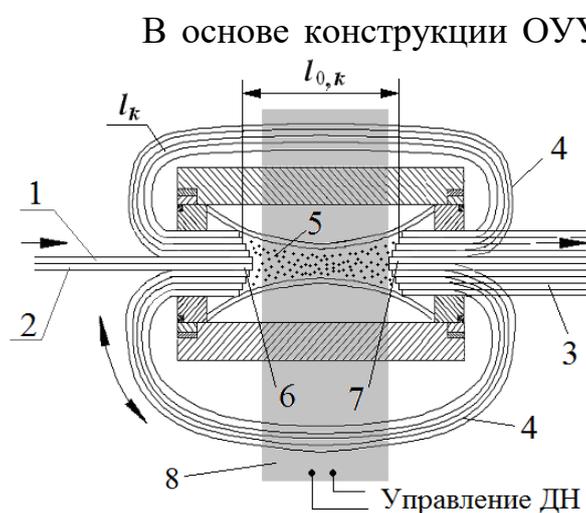


Рис. 5 – Базовая конструкция оптического устройства управления:
1 – входной световод; 2 – световод для подачи излучения накачки в смеситель; 3 – выходные и 4 – дополнительные световоды; 5 – оптический смеситель; 6 и 7 – входные и выходные торцы смесителя; 8 – матрица оптического управления

В основе конструкции ОУУ предлагается использовать интерференционный волоконно-оптический разветвитель, содержащий профилированный оптический смеситель в качестве рабочего тела (рис. 5). Торцы 6 и 7 составлены из торцов световодов, которые расположены со смещением по осевому направлению друг относительно друга, благодаря чему обеспечивается вырезание соответствующих спектральных полос $\Delta\lambda_k$ из широкополосного оптического сигнала. Использование управляющего элемента (например, пьезоэлектрической матрицы – ПМ или матрицы оптического управления), на пьезоэлементах, на которых избирательно закреплены дополнительные световоды ОУУ, позволяет изменять длину участков дополнительных световодов, изменяя соответственно и набег фаз оптических сигналов, распространяющихся в них. Это обеспечивает задержку сигналов, подаваемых на элементы антенной

решетки, что и будет приводить к отклонению главного лепестка диаграммы направленности.

В третьей главе приведено математическое моделирование процессов обработки и передачи сигналов в системах СШП-RoF по оптоволоконному тракту. Приводятся, математическая модель сигнала, передаваемого по оптической линии при реализации системы СШП-RoF в лабораторных условиях, а также математическая модель процесса управления диаграммой направленности в системах СШП-RoF.

На практике достаточно сложно реализовать систему СШП-RoF, представленную на рис. 1. Одним из самых трудоемких элементов системы является нелинейное волокно, которое вносит корректирующий чирп в оптический сигнал. В качестве альтернативы при реализации системы СШП-RoF в лабораторных условиях предлагается использовать модулятор Маха-Цендера, вносящий корректирующий чирп в оптический сигнал.

Оптический сигнал на выходе модулятора Маха-Цендера (ММЦ) описывается следующим выражением:

$$E_{\text{вых.}}(t) = \sqrt{P_0} \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2V_\pi} \cdot (-V_b + 2V(t) + \Delta V_1) \right] \quad (1)$$

где P_0 – максимальная оптическая мощность на выходе ММЦ

V_b – напряжение смещения, выставляющее рабочую точку ММЦ;

V_π – напряжение для обеспечения сдвига фаз на π между двумя плечами ММЦ, $\in [3 \text{ В}, 5 \text{ В}]$;

$V(t)$ – сигнал, подаваемый на электрический вход ММЦ;

ΔV_1 – смещение напряжения, необходимое для подстройки теоретического напряжения смещения под экспериментальное.

Данное уравнение описывает нечирпированный импульс на выходе модулятора. Для того чтобы модулятор обеспечивал чирпирование оптического импульса, предлагается использовать интерферометр Маха-Цендера на кристалле ниобата лития LiNbO_3 , имеющий срез по оси Z , и вносить чирпирование плавным изменением рабочей точки модулятора.

Напряжение смещения V_b , задающее рабочую точку, можно представить в виде:

$$V_b = V_0 + V_N(t) \quad (2)$$

где V_0 – напряжение, определяющее положение рабочей точки модулятора Маха-Цендера, подаваемое на его управляющий вход;

$V_N(t)$ – дополнительное (управляющее) напряжение, также подаваемое на управляющий вход.

В этом случае выражение (1) примет вид:

$$E_{\text{вых.}}(t) = \sqrt{P_0} \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2V_\pi} \cdot (-V_0 - V_N(t) + 2V(t) + \Delta V_1) \right] \quad (3)$$

Для компенсации синусоидальных составляющих в выражении (3) используется балансная схема, представленная на рис. 6.

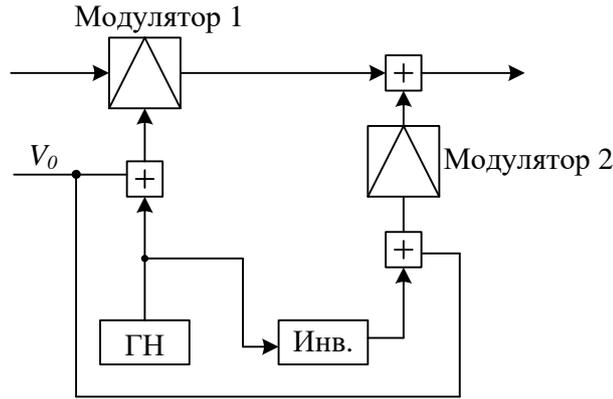


Рис. 6 – Балансная схема соединения двух модуляторов Маха-Цендера

В балансной схеме используются два модулятора Маха-Цендера с противофазным смещением управляющих сигналов. На управляющий вход первого модулятора поступает сигнал с генератора напряжения. На управляющий вход второго модулятора поступает сигнал с противофазным смещением. Далее оба сигнала суммируются.

При использовании балансной схемы выражение (3) примет вид:

$$E_{\text{вых.}}(t) = \sqrt{P_0} \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi}{2V_\pi} \cdot (-V_0 + 2V(t) + \Delta V_1)\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2V_\pi} \cdot V_N(t)\right) \right) \quad (4)$$

Изменение показателя преломления кристалла ниобата лития LiNbO_3 описывается выражением:

$$\Delta n(\lambda, t) = -\frac{n_0^3(\lambda) \cdot r}{2} \cdot V_N(t) \cdot \frac{1}{d} \quad (5)$$

где n_0 – показатель преломления кристалла ниобата лития без приложенного напряжения;

r – электрооптический коэффициент, м/В;

d – толщина кристалла ниобата лития.

Показатель преломления кристалла ниобата лития равен:

$$n(\lambda, t) = n_0(\lambda) + \Delta n(\lambda, t) \quad (6)$$

Фазовый сдвиг прямо пропорционален функции корректирующего чирпа $C(\lambda, t)$. Тогда, функция корректирующего чирпа примет вид:

$$C(\lambda, t) = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (n(\lambda, t) - n_0(\lambda)) \cdot n(\lambda, t) \cdot l_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot l_0}{\lambda} \cdot (n^2(\lambda, t) - n(\lambda, t) \cdot n_0(\lambda)), \quad (7)$$

где l_0 – длина волоконно-оптической линии.

Решая (7) относительно $n(\lambda, t)$, в одном из случаев показатель преломления получается отрицательным. В случае внесения положительного корректирующего чирпа это значение не имеет физического смысла, поскольку показатель преломления оказывается меньше нуля. Поэтому при дальнейших вычислениях используется следующее выражение:

$$n(\lambda, t) = \frac{n_0(\lambda) + \sqrt{n_0^2(\lambda) + \frac{4 \cdot \lambda \cdot C(\lambda, t)}{2 \cdot \pi \cdot l_0}}}{2} \quad (8)$$

Изменение показателя преломления $\Delta n(\lambda, t)$ будет равно:

$$-\frac{n_0^3(\lambda) \cdot r}{2} \cdot V_N(t) \cdot \frac{1}{d} = \frac{n_0(\lambda) + \sqrt{n_0^2(\lambda) + \frac{4 \cdot \lambda \cdot C(\lambda, t)}{2 \cdot \pi \cdot l_0}}}{2} - n_0(\lambda) \quad (9)$$

Откуда $V_N(t)$ будет равно:

$$V_N(t) = -\frac{2 \cdot d}{n_0^3(\lambda) \cdot r} \cdot \left(\frac{n_0(\lambda) + \sqrt{n_0^2(\lambda) + \frac{4 \cdot \lambda \cdot C(\lambda, t)}{2 \cdot \pi \cdot l_0}}}{2} - n_0(\lambda) \right) \quad (10)$$

Функция корректирующего чирпа $C(\lambda, t)$ равна:

$$C(\lambda, t) = \frac{2 \cdot \pi \cdot l_0}{\lambda} \cdot \left(\left(\frac{-n_0^3(\lambda) \cdot r \cdot V_N(t)}{d} + n_0(\lambda) \right)^2 - n_0^2(\lambda) \right) \quad (11)$$

Таким образом, сигнал на выходе модулятора Маха-Цендера, содержащий корректирующий чирп, будет описываться выражением:

$$E_{\text{вых.}}(t) = \sqrt{P_0} \cdot \left(\cos \left(\frac{\pi}{2V_\pi} \cdot (-V_0 + 2V(t) + \Delta V_1) \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2V_\pi} \cdot \left(-\frac{2 \cdot d}{n_0^3(\lambda) \cdot r} \cdot \left(\frac{n_0(\lambda) + \sqrt{n_0^2(\lambda) + \frac{4 \cdot \lambda \cdot C(\lambda, t)}{2 \cdot \pi \cdot l_0}}{2}} - n_0(\lambda) \right) \right) \right) \right) \quad (12)$$

Для оптического управления диаграммой направленности антенной решетки предлагается использовать оптическое устройство управления. При этом ОУУ обеспечивает задержку и «вырезание» соответствующих спектральных составляющих для каждого поддиапазона. Различные значения мощности, подаваемые на световоды матрицы оптического управления, приводят к изменениям оптической длины, что в свою очередь приводит к задержке оптического сигнала и к фазовому сдвигу.

Диаграмма направленности антенной решетки определяется множителем системы. Предполагается, что антенная решетка возбуждается равноамплитудным распределением токов с постоянным сдвигом фаз между соседними излучателями (линейное распределение по решетке). Распределение токов зависит от коэффициента спектральной полосы, вырезаемой ОУУ из полного сигнала $S_l(C^*(t))$, управляющего воздействия Ξ_l и значения оптической мощности P_l .

Математическая модель управления диаграммой направленности для плоской антенной решетки:

$$\tilde{f}_c = \sum_{-M_x}^{M_x} \sum_{-M_y}^{M_y} \sqrt{\frac{2 \cdot K_{\text{ФД}} \cdot P_l}{Z_B}} \cdot e^{-j \cdot n_x \cdot \frac{2\pi \cdot \Delta x}{\lambda_0 \cdot \Xi_l}} \cdot e^{-j \cdot n_y \cdot \frac{2\pi \cdot \Delta y}{\lambda_0 \cdot \Xi_l}} \cdot e^{j \cdot k_l (x_n \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + y_n \sin(\theta) \cdot \sin(\phi))} \quad (13)$$

где $K_{\text{ФД}}$ – коэффициента оптоэлектронного преобразования фотодетектора;

P_l – оптическая мощность, поступающей из l -группы выходных световодных каналов ОУУ;

Z_B – волновое сопротивление, $Z_B = 50$ Ом;

$\Delta l_x, \Delta l_y$ – изменение оптической длины световодов ОУУ;

Ξ_l – управляющее воздействие, зависящее от номера l -выделенной группы дополнительных световодных каналов ОУУ;

n_x, n_y – количество элементов антенной решетки вдоль осей x и y ;

$k_i = \frac{2\pi}{\Lambda_i}$ Λ_i – длина волны радиоизлучения;

ϕ и θ – угловые координаты.

Для осуществления отклонения главного лепестка диаграммы направленности антенной решетки необходимо учитывать мощность, подаваемую на дополнительные световоды ОУУ (световоды матрицы оптического управления) и спектральную полосу, вырезаемую ОУУ за счет неравномерного расположения торцов смесителя ОУУ.

В четвёртой главе было проведено имитационное моделирование предлагаемой системы СШП-RoF. Были рассмотрены схемы по оптической генерации СШП-сигнала в системах RoF. Каждый из предложенных подходов по оптической генерации СШП-сигнала может использоваться при практической реализации системы СШП-RoF. Предложенный метод внесения корректирующего чирпа в оптический сигнал показывает, что чирпирование является достаточно эффективным методом передачи сигнала по протяженным волоконно-оптическим линиям связи без искажений (рис. 7).

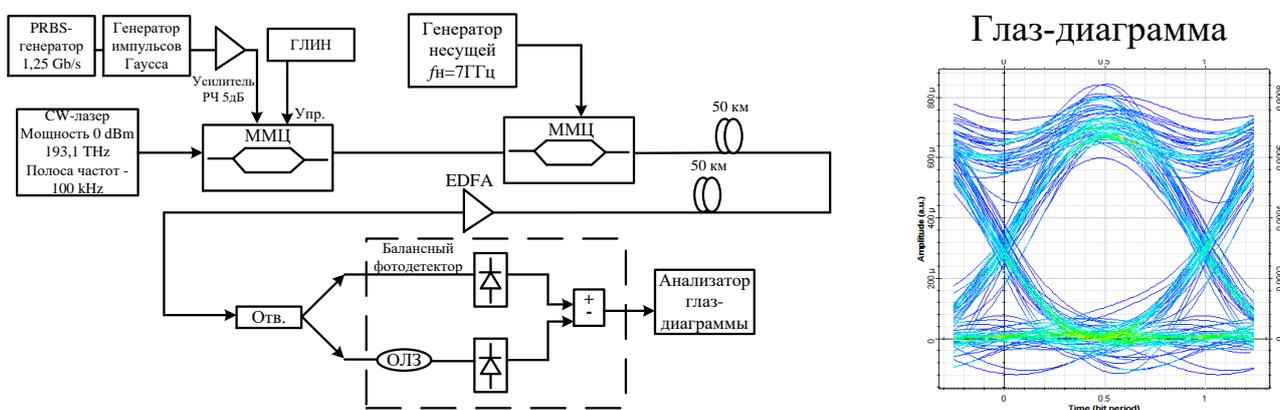


Рис. 7 – Схема передачи СШП-RoF-сигнала по протяженной ВОЛС

Для внесения корректирующего положительного чирпа в оптический сигнал на управляющий вход модулятора Маха-Цендера (ММЦ) подается линейно-изменяющееся напряжение с генератора линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН). Далее чирпированный СШП-RoF сигнал поступает на второй модулятор Маха-Цендера. Генератор несущей с частотой $f_n = 7$ ГГц обеспечивает сдвиг по спектру на 7 ГГц для соответствия требованиям ГКРЧ РФ. После этого, СШП-RoF сигнал поступает в волоконно-оптическую линию связи протяженностью 100 км. Далее оптический сигнал поступает на балансный фотодетектор, где происходит его преобразование в электрический СШП-

сигнал. Показателем работоспособности системы является коэффициент битовых ошибок (BER – bit error rate). Коэффициент BER составляет 10^{-10} , что соответствует требованиям МСЭ-R.

Для экспериментальной реализации предложенного подхода внесения корректирующего чирпа в оптический сигнал, была собрана установка на рис.8.

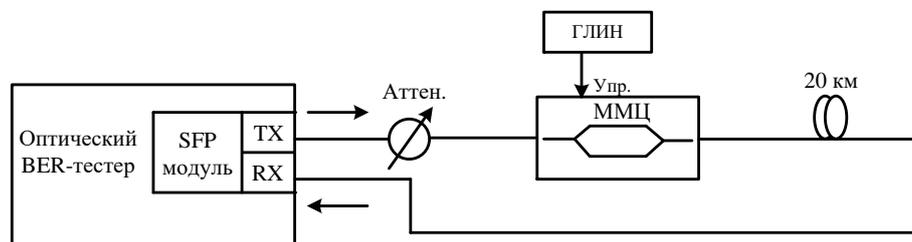


Рис. 8 – Экспериментальная реализация метода внесения корректирующего чирпа в оптический сигнал

Для исследования коэффициента битовых ошибок используется оптический BER-тестер со встроенным SFP-модулем. SFP-модуль представляет собой приемопередающее устройство. Оптический сигнал с выхода SFP-модуля поступает через аттенюатор на модулятор Маха-Цендера. На управляющий вход модулятора поступает сигнал с генератора ГЛИН. Длина линии составляет 20 км. На рис. 9 представлены графики зависимости BER от напряжения генератора при подаче на управляющий вход модулятора постоянного напряжения и при подаче линейно-изменяющегося напряжения.

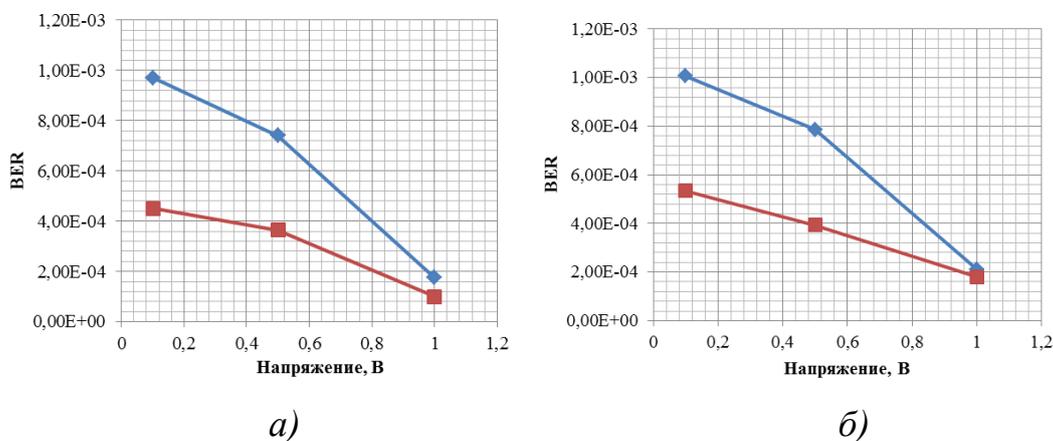


Рис. 9 – Графики зависимости BER от значения напряжения на управляющем входе модулятора Маха-Цендера: а) результаты имитационного моделирования; б) результаты эксперимента

—◆— источник постоянного тока; —■— ГЛИН

В четвертой главе также были даны рекомендации по применению системы СШП-RoF в существующих сетях связи. Были рассмотрены варианты применения этой системы в сетях FTTH и в ведомственных сетях связи. Использование системы СШП-RoF дает дополнительные преимущества, такие как высокая скорость передачи, отсутствие трансмодуляции и невозможность перехвата СШП-сигнала.

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы.

В приложениях приведены параметры образцов ниобата лития LiNbO_3 , используемого при изготовлении модуляторов Маха-Цендера. Приведены существующие схемы организации широкополосного доступа.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель сигнала, передаваемого в системах СШП-RoF, *основанная* на временной функции оптического сигнала на выходе модулятора Маха-Цендера, *отличающаяся* внесением корректирующего чирпа в оптический сигнал, и *позволяющая* имитировать его в программной среде и рассчитывать параметры сигнала в зависимости от параметров волоконно-оптической линии связи для минимизации искажений. Минимальное среднеквадратичное отклонение входной и выходной форм импульса составляет $\sigma = (1,8 - 2,5) \cdot 10^{-4}$.

2. Предложен метод построения безрегенерационного сегмента волоконно-оптической линии RoF, *основанный* на использовании квазисолитонного режима передачи, *отличающийся* внесением корректирующего чирпа в оптический сигнал за счет использования нелинейного оптического волокна, усилителей EDFA, совместно распространяющейся накачки с сигналом и принципом расстановки EDFA на волоконно-оптической линии RoF, и *позволяющий* передавать сигнал по протяженной волоконно-оптической линии RoF, без использования электронной регенерации сигнала, длиной 100 км с коэффициентом битовых ошибок порядка 10^{-10} .

3. Разработана математическая модель функции корректирующего чирпа, *учитывающая* электрооптические свойства модулятора Маха-Цендера, *позволяющая* моделировать изменение рабочей точки модулятора исходя из свойств кристалла ниобата лития, что *обеспечивает* адаптивную подстройку чирпа в зависимости от параметров системы СШП-RoF.

4. Разработан метод управления диаграммой направленности антенной решетки, *основанный* на изменении фазы с помощью задержки, управляемой с использованием разработанного устройства, входящего в состав волоконно-оптической линии RoF, *учитывающий* мощность, подаваемую из выходных световодных каналов оптического устройства управления и управляющее воздействие, вносимое в дополнительные световодные каналы устройства, и *позволяющий* отклонять основной лепесток радиоизлучения антенной решетки с помощью средств волоконно-оптической линии.

5. Результаты исследований диссертационной работы, состоящие из математической модели сигнала, передаваемого в системах СШП-RoF, математической модели функции корректирующего чирпа, метода построения безрегенерационного сегмента волоконно-оптической линии СШП-RoF, метода управления диаграммой направленности антенной решетки, будут использованы в виде рекомендаций по техническим решениям в новой технологии сверхширокополосного радиодоступа после проведения стандартизации.

Перспективы дальнейшей разработки темы. В рамках дальнейших исследований планируется разработка методологического подхода по примене-

нию корректирующего чирпа в существующих системах связи. Также планируются дальнейшие исследования в области оптического управления диаграммой направленности с помощью оптического устройства управления. Планируется более подробное изучение управляющего воздействия, подаваемого на дополнительные световоды оптического устройства.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Андрианова, А.В. Выбор метода генерации сверхширокополосного сигнала при построении оптической части RoF-систем / А.В. Андрианова, А.Х. Султанов, И.Л. Виноградова, И.К. Мешков // Вестник УГАТУ. – 2015. Т. 19. – № 4 (70). – С. 49-53.

2. Андрианова, А.В. Генерация многоканального сверхширокополосного сигнала для RoF-систем / А.В. Андрианова, И.К. Мешков, А.Х. Султанов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2015. Т. 11. – № 1. – С. 84-89.

3. Andrianova, A.V. Photonic generation of ultra-wideband signal for Radio-over-Fiber systems / A.V. Andrianova, I.K. Meshkov, A. Kh. Sultanov, V.V. Chernykh // Инфокоммуникационные технологии. – 2015. Т. 13. – №2. – С. 139-143.

4. Андрианова, А.В. Реализация оптической генерации сверхширокополосного сигнала для RoF систем с учетом требований спектральной маски ГКРЧ / А.В. Андрианова, И.К. Мешков, А.Х. Султанов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2015. Т. 18. Ч. 2. – № 3. – С. 34-38.

5. Андрианова, А.В. Способ подключения антенных излучателей для RoF с применением оптического устройства и методика расчета его параметров / И.Л. Виноградова, А.Х. Султанов, И.К. Мешков, А.В. Андрианова [и др.] // Компьютерная оптика. – 2015. Т. 39. – №5. – С. 728-737.

Патенты РФ на полезную модель

6. Пат., номер заявки: 2016103991 Российская Федерация, МПК G02B 6/28. Устройство для разветвления и чирпирования оптических сигналов / Виноградова И.Л., Султанов А.Х., Андрианова А.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «УГАТУ» (RU). - № 2016103991/28; заявл. 08.02.2016; решение о выдаче патента 26.05.2016.

В других изданиях

7. Андрианова, А.В. Волоконно-оптическая линия передачи для систем RoF с дистанционной накачкой / Виноградова И.Л., Султанов А.Х., Мешков И.К., Андрианова А.В. [и др.]// Труды XV МНТК «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций». – Казань, КНИТУ-КАИ. – 2014. – С. 65-68.

8. Андрианова, А.В. Волоконно-оптическое устройство для положительного чирпирования сигнала интерференционным методом с подстройкой величины чирпа / И.Л. Виноградова, А.Х. Султанов, И.К. Мешков, А.В. Андрианова [и др.] // Труды XV МНТК «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций». – Казань, КНИТУ-КАИ. – 2014. – С. 68-71.

9. Андрианова, А.В. Подход к преобразованию спектра широкополосного сигнала оптической частью системы RoF / И.Л. Виноградова, А.Х. Султанов, И.К. Мешков, А.В. Андрианова [и др.] // Труды IV Международной конференции по фотонике и информационной оптике. – Москва, НИЯУ МИФИ. – 2015. – С. 216.

10. Andrianova, A.V. The fiber optic device for signal positive chirping by interferential method with tuning of chirp size / I.L. Vinogradova, A. Kh. Sultanov, I.K. Meshkov, A.V. Andrinova [et al.] // Optical Technologies for Telecommunications. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2014. – V. 9533. – P. 953309-8.

11. Andrianova, A.V. Fiber optic line for RoF systems with remote and local pump EDFA / I.L. Vinogradova, A. Kh. Sultanov, I.K. Meshkov, A.V. Andrinova [et al.] // Optical Technologies for Telecommunications. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2014. – V. 9533. – P. 953302-9.

12. Andrianova, A.V. UWB-RoF optical signal relevant to State Committee on Radio Frequency spectral mask and its chirping task / I.L. Vinogradova, A. Kh. Sultanov, I.K. Meshkov, A.V. Andrinova [et al.] // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2015. – P. 1-6.

13. Андрианова, А.В. Электрическая генерация сверхширокополосного сигнала для RoF-систем / А.В. Андрианова, И.К. Мешков // Труды XVI МНТК «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций». – Уфа, УГАТУ. – 2015. Т. 2. – С. 103-105.

14. Андрианова А.В. Оптическая генерация сверхширокополосного сигнала для RoF-систем / А.В. Андрианова // Труды XVI МНТК «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций». – Уфа, УГАТУ. – 2015. Т. 2. – С. 105-107.

15. Andrianova, A.V. SCRF spectral mask compliant ultra-wideband signal generation approaches for RoF systems / A.V. Andrinova, A. Kh. Sultanov, I.K. Meshkov [et al.] // Optical Technologies for Telecommunications. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2015. – V. 9807. – P. 980704-8.

16. Andrianova, A.V. Interference fiber optic device for RoF antenna radiators control / I.L. Vinogradova, A. Kh. Sultanov, I.K. Meshkov, A.V. Andrinova [et al.] // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2016. – P. 1-6.

17. Андрианова А.В. Методы повышения эффективности компонентов оптической части сверхширокополосных систем передачи на базе технологии Radio-over-Fiber / А.В. Андрианова // Труды МНТК «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы - 2016» (ПРЭФЖС-2016). – Казань, КНИТУ-КАИ. – 2016. – С. 166-170.

Диссертант



А.В. Андрианова

АНДРИАНОВА Анна Владимировна

**РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО СЕГМЕНТА
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ
НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ RADIO-OVER-FIBER**

Специальность 05.12.13 –
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати ____ 2016. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.
Усл.печ.л. 1,0. Уч.-изд.л. 0,9.
Тираж ____ экз. Заказ № ____

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический
университет»
Центр оперативной полиграфии
450008, Уфа-Центр, К.Маркса, 12