

На правах рукописи



ГОЛОВИНА ЕВГЕНИЯ ЮРЬЕВНА

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ
ДАнных В ВЫДЕЛЕННЫХ ПОДСЕТЯХ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЮЩИХ
ЧИРПИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ**

Специальность 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа, 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент, профессор кафедры телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», **Виноградова Ирина Леонидовна**

Официальные оппоненты:

Нуреев Ильнур Ильдарович, доктор технических наук, профессор, и.о. заведующего кафедрой спортивной инженерии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

Рябова Наталья Владимировна, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий, радиотехники и связи федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный технологический университет»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится 17 сентября 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.07 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» и на сайте <https://uust.ru/>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Вульфин Алексей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие роботизированных систем и технологий искусственного интеллекта привело к появлению новых приложений, для которых требуется обеспечение высоких скоростей взаимодействия с сетью за наносекундные времена и даже меньше. Одним из наиболее эффективных способов ускорения их работы является снижение уровня модели OSI, на котором выполняются операции обработки и управления.

В этой связи актуализируется применение оптических технологий, включая полностью оптические сети (AON – All Optical Networks) и фотонные технологии, обеспечивающие перенос функций управления и коммутации в оптический домен. Особый интерес представляют радиофотонные технологии, реализуемые в концепции Radio-over-Fiber (RoF) и обеспечивающие генерацию высокочастотных и широкополосных сигналов на уровне оптической линии. Применение RoF позволяет повысить быстродействие сети, упростить обработку сигналов и обеспечить миниатюризацию аппаратной части.

Однако для реализации полностью оптических сетей и сегментов AON-RoF требуется разработка элементарно-компонентной базы с малыми временами реконfigurирования и эффективных схем адаптивного генерирования и преобразования сигналов, при этом указанные задачи целесообразно решать за счёт изыскания дополнительного телекоммуникационного ресурса без усложнения архитектуры сети.

В качестве такого ресурса в работе рассматривается чирп оптического импульса (или то же: функция изменения мгновенной длины волны (частоты) оптического импульса (ФИМД)). Традиционно чирпированные сигналы решают задачи физического уровня. В диссертации ФИМД предлагается использовать для создания дополнительного телекоммуникационного ресурса, позволяющего реализовать каналы управления и служебные функции для сегментов AON и AON-RoF. Следовательно, ФИМД используется не для задач физического уровня OSI, а для задач транспортного, канального и сетевого уровней, но с использованием процессов физической линии.

Предложенный подход применим в перспективных телекоммуникационных системах, включая автоматизированные системы с участием человека и полностью автономные устройства, технологии beamforming в сетях 5G/6G, оптические коммутационные системы центров обработки данных (ЦОД, Data Center, DC) и технологии выделенных подсетей (VLAN), где критически важны минимальные задержки.

Степень разработанности темы.

Степень разработанности темы подтверждается рядом ключевых результатов, полученных в данной области исследований. Базовые теоретические положения, связанные с развитием радиофотонных систем и внедрением концепции Radio-over-Fiber в телекоммуникационные сети, сформированы в работах A.J. Cooper, а полностью оптические сети введены в науку Biswanath Mukherjee. Дальнейшее развитие технологий RoF и AON связано с исследованиями как зарубежных учёных (Karthikeyan R., Plettemeier D., Roberto Llorente, Prakasam S., Agrawal G., Idelfonso Tafur Monroy, Paolo Rocca, Kumari N.), так и отечественных учёных (Султанов А.Х., Андреев В.А., Виноградова И.Л., Бурдин В.А., Морозов О.Г., Багманов В.Х. и др.). Значительное внимание в научной литературе уделяется также обеспечению информационной безопасности корпоративных сетей, применительно к RoF-сегментам эти вопросы были углублены в работах Букашкина С.А.

Изучение проработанности темы подтверждает, что актуально создание адаптивных волоконно-оптических схем генерирования и преобразования сигнала для RoF-систем, и управления в AON-сегментах, обеспечивающих расширение их функциональности.

Объект исследования – волоконно-оптические короткосегментные (<50км) сети и системы Radio-over-Fiber (RoF), включая сегменты технологического назначения.

Предмет исследования – оптическое управление волоконно-оптическими и Radio-over-Fiber сегментами с применением функции чирпа оптического импульса (или то же: функции изменения мгновенной длины волны (частоты) оптического импульса (ФИМД)), а также создание адаптивно перестраиваемых сегментов специализированных сетей (MAN – xPON – DC-FC – DC-SDN-FC($F_\lambda S$) – RoF) и моделирование работы последних.

Под специализированными сетями в работе понимается совокупность городских сетей (Metropolitan Area Network, MAN), пассивных оптических сетей (xPON), соединений центров обработки данных на базе технологии Fibre Channel (FC), базирующейся на распараллеливании процессов (DC-FC), реконфигурируемых оптических сетей центров обработки данных с дробным λ -переключением ($F_\lambda S$), использующих программно-определяемую сеть (Software-Defined Networking, SDN) и технологию Fibre Channel (DC-SDN-FC($F_\lambda S$)), а также волоконно-радиоэфирных сегментов (RoF), работающих в соответствии со стандартами G.703, IEEE 802.3ba и IEEE 803.2ae.

Цель работы – повышение эффективности передачи данных на основе увеличения информационной ёмкости оптического сигнала, состоящего в применении функции чирпа/ФИМД оптического импульса для управления на канальном/сетевом уровне.

Под эффективностью передачи данных понимаются основные положения системы стандартов QoS (Quality of Service, качество обслуживания) / GoS (Grade of Service, уровень обслуживания), а в настоящей в работе:

1. Снижение задержек передачи информации в выделенных подсетях оптического и радиодиапазона;
2. Повышение адаптивности волоконно-оптических и волоконно-радиоэфирных сегментов (RoF);
3. Повышение информационной ёмкости систем связи с оптической пакетной коммутацией.

Задачи исследования:

1. Разработать метод управления волоконно-оптическим пакетно-коммутирующим сегментом с использованием процесса физического уровня для передачи управляющей информации в составе информационных пакетов, обеспечивающий переключение пакетов в оптическом домене без задействования узлового коммутационного оборудования уровня ядра сети, что обеспечит балансировку трафика и снижение задержек получения пакетов на приеме.

2. Разработать методику построения высокоизбирательного демультимплектора, позволяющего выполнять перенаправление пакетов на физическом уровне ВОЛП в соответствии с передаваемой в них служебной информацией, основанную на применении неперестраиваемого волоконно-оптического интерференционного многопортового устройства.

3. Разработать методику управления радиосегментом волоконно-радиоэфирной

сети с применением процесса физического уровня, осуществляющую передачу управляющей информации без задействования традиционного телекоммуникационного ресурса, обеспечивающую формирование динамических выделенных подсетей в радиосегменте без привлечения настроек коммутационного оборудования канального и сетевого уровней, и тем самым позволяющую снизить задержку получения пакетов на приеме.

4. Разработать метод преобразования изменения амплитуды при изменении длины волны для оптического сигнала.

5. Разработать архитектуру волоконно-оптической линии с ФИМД-управлением, входящей в состав специализированных сетей, обеспечивающую минимизацию искажений передаваемого оптического ФИМД-сигнала и выработать требования к параметрам сегментов и протоколу маршрутизации.

Под архитектурой волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) в работе понимаются: специализированные сети MAN – xPON – DC-FC – DC-SDN-FC($F_{\lambda}S$)* – RoF, соответствующие стандартам G.703/ IEEE 802.3ba/ IEEE 803.2ae.

*DC-SDN-FC($F_{\lambda}S$) – реконфигурируемые оптические сети Центров обработки данных, использующие технологию Fibre Channel (FC), базирующуюся на распараллеливании процессов.

Научная новизна

1. Метод управления волоконно-оптическим пакетно-коммутирующим сегментом, основанный на применении процесса физического уровня, *отличающийся* передачей управляющей информации в составе информационных пакетов в виде функции чирпа/ФИМД, обеспечивающий перенаправление пакетов и балансировку трафика в оптическом домене без задействования узлового коммутационного оборудования ядра сети и без изменения существующей инфраструктуры ВОЛС, что способствует снижению задержек пакетов на приеме.

2. Методика построения высокоизбирательного демультимплексора, основанная на неперестраиваемом волоконно-оптическом интерференционном многопортовом устройстве, *отличающаяся* применением ступенчато-скошенной структуры частотно-избирательного элемента (световодного гребенчатого зеркала) и уточненным градиентом показателя преломления рабочей области устройства, что позволяет перенаправлять пакеты на ВОЛП с параметрами, соответствующими стандартам оптических сетей, в диапазоне $[\sim 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ нм} \leq \Delta\lambda \leq 5 \cdot 10^{-3} \text{ нм}]$ и более, в соответствующие выходные световоды без каскадного прохождения сигнала, и уменьшить коммутируемую λ -часть по отношению к применяемой в известных системах с полностью оптической пакетной коммутацией, и увеличить производительность указанных систем связи.

3. Методика управления радиосегментом волоконно-радиоэфирной сети, основанная на применении процесса физического уровня, *отличающаяся* тем, что формирование заданных динамических выделенных подсетей осуществляется без привлечения настроек коммутационного оборудования канального и сетевого уровней с использованием управляющей информации в виде функции чирпа/ФИМД информационных пакетов посредством задействования разработанных: устройства преобразования изменения амплитуды при изменении длины волны и устройства перенаправления λ -частей на радиоизлучатели.

4. Метод преобразования изменения амплитуды при изменении длины волны для оптического сигнала, базирующийся на волоконно-оптическом усилителе, *отличающийся* применением легированного эрбием оптоволокна с предложенными

параметрами, которые найдены при динамическом моделировании свойств активной среды, что обеспечивает режим минимального изменения (смещения) начального уровня усиления (расположения полки усиления) и технически реализуемое преобразование: $\Delta P_s \cong 2,275 \times 10^{-4} [\text{Вт/нм}] \times \Delta \lambda$ вблизи $\lambda_0 = 1532$ нм.

5. Архитектура ВОЛС с ФИМД-управлением, входящих в состав специализированных сетей, основанная на известной топологии пассивных оптических сетей (xPON), отличающаяся применением предложенной многоярусной топологией и выработанными требованиями к структуре сегмента и протоколу маршрутизации (по применению разнопутевых алгоритмов и степени узловых соединений), которые получены на основе моделирования процессов физического, канального и сетевого уровней разветвленного сегмента с пакетной коммутацией с учетом свойств ФИМД, что обеспечивает минимизацию искажений функции чирпа/ФИМД в передаваемых информационных пакетах.

Теоретическая значимость работы.

В исследовательской работе разработан метод управления волоконно-оптическим пакетно-коммутирующим сегментом с возможностью нереляционного управления, представляющего интерес для построения сегментов AON и AON-RoF как корпоративного и технологического (включая сети ЦОД), так и общего назначения (сети городского масштаба MAN), включая xPON). Эффект достигается за счёт передачи управляющей информации в составе телекоммуникационных информационных единиц, передаваемых по волоконно-оптической линии, при использовании дополнительного информационного ресурса – чирпа оптического импульса. Разработаны компоненты преобразования, методики расчета их параметров, предложены новые конфигурации сегментов RoF, алгоритмы их функционирования, методики расчета их QoS-показателей, принцип встраивания перечисленных RoF-сегментов в волоконно-оптические сети MAN.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

– уменьшение коммутируемой λ -части по отношению к применяемой в известных системах с полностью оптической пакетной коммутацией позволяет более чем в 3 раза увеличить производительность указанных систем связи;

– применение ФИМД-управления обеспечивает снижение задержки при переключении оптических пакетов на сегментах ВОЛП, ВОЛП-RoF (в частности, для выделенных подсетей в радиосегменте) с десятков – сотен миллисекунд до единиц наносекунд, что способствует повышению адаптивности сети и улучшению показателей QoS/GoS;

– предложенные методика построения высокоизбирательного демультимплексора и метод преобразования изменения амплитуды при изменении длины волны для оптического сигнала на основе эрбиевого волокна позволяют реализовать полностью оптическое управление фазированными антенными решётками без привлечения дополнительного телекоммуникационного ресурса, что упрощает аппаратную часть абонентских устройств, особенно для подвижных объектов (БПЛА) и промышленных систем;

– разработанная архитектура ВОЛС с многоярусной топологией, минимизирующей искажения чирпированных сигналов, позволяет внедрять предложенный метод управления в существующие городские сети MAN и сети xPON без их существенной модернизации.

Результаты диссертационного исследования приняты и внедрены в АО «Центр информационно-коммуникационных технологий Республики Башкортостан», г. Уфа, а

также в учебный процесс ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Методы исследования. Получение основных научных результатов диссертации базировалось на комплексном применении математического аппарата, средств вычислительной электродинамики, а также положений, относящихся к теории дифференциальных уравнений и случайных процессов. Исследование сопровождалось проведением компьютерных экспериментов и численных расчётов, направленных на анализ характеристик рассматриваемых моделей. Для реализации вычислительных процедур использовался метод конечных элементов (Finite Element Method, FEM), реализованный в программной среде Ansys HFSS 2020 R2.

Положения, выносимые на защиту.

1. Метод управления волоконно-оптическим пакетно-коммутирующим сегментом, основанный на применении процесса физического уровня с передачей управляющей информации в составе информационных пакетов в виде функции чирпа/ФИМД (функция изменения мгновенной длины волны (частоты) оптического импульса), обеспечивающий перенаправление пакетов и балансировку трафика в оптическом домене без задействования узлового коммутационного оборудования уровня ядра сети и без изменения существующей инфраструктуры волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), что позволяет снизить задержки получения пакетов на приеме.

2. Методика построения высокоизбирательного демультимплексора, основанная на неперестраиваемом волоконно-оптическом интерференционном многопортовом устройстве с применением предложенной ступенчато-скошенной структуры частотно-избирательного элемента (световодного гребенчатого зеркала) и уточнённым градиентом показателя преломления рабочей области устройства, базирующаяся на использовании служебной ФИМД-информации в коммутируемом сигнале, позволяющая перенаправлять пакеты на волоконно-оптические линии передачи (ВОЛП) с параметрами, соответствующими стандартам оптических сетей в диапазоне $[\sim 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ нм} \leq \Delta\lambda \leq 5 \cdot 10^{-3} \text{ нм}]$ и более в соответствующие выходные световоды без каскадного прохождения сигнала.

3. Методика управления радиосегментом волоконно-радиоэфирной сети с применением процессов физического уровня, основанная на формировании заданного амплитудного (либо амплитудно-фазового) распределения для фазированной антенной решетки (ФАР) с применением разработанных: устройства преобразования изменения амплитуды при изменении длины волны и устройства перенаправления λ -частей на радиоизлучатели, обеспечивающая формирование динамических выделенных подсетей в радиосегменте без задействования традиционного телекоммуникационного ресурса для управляющей информации и привлечения настроек коммутационного оборудования канального и сетевого уровней.

4. Метод преобразования изменения амплитуды при изменении длины волны для оптического сигнала, базирующийся на волоконно-оптическом усилителе, легированном эрбием, и методика моделирования параметров преобразователя, основанная на динамическом представлении параметров активной среды для режима минимального изменения (смещения) начального уровня усиления (расположения полки усиления), позволяющая определить параметры эрбиевого оптоволокна, обеспечивающие технически реализуемое преобразование: $\Delta P_s \cong 2,275 \times 10^{-4} [\text{Вт/нм}] \times \Delta\lambda$ вблизи $\lambda_0 = 1532 \text{ нм}$.

5. Архитектура ВОЛС с ФИМД-управлением, входящих в состав

специализированных сетей, основанная на предложенных многоярусной топологии, требованиях к структуре сегмента и протоколу маршрутизации (по применению разнопутевых алгоритмов и степени узловых соединений), которые получены в результате моделирования процессов физического, канального и сетевого уровней в разветвленном сегменте с пакетной коммутацией с учетом свойств передаваемого ФИМД-сигнала, что позволяет минимизировать искажения последнего в передаваемых информационных пакетах.

Достоверность и обоснованность результатов в диссертационном исследовании, обеспечиваются адекватностью сформулированных научных задач и целесообразностью выбранного методического аппарата, основанного на применении апробированных технологических решений и подходов, ранее доказавших свою эффективность в различных прикладных направлениях. Надёжность полученных выводов дополнительно подтверждается представлением результатов на профильных научных конференциях, публикацией материалов исследования в рецензируемых научных изданиях, включая журналы, входящие в перечень ВАК, а также наличием документов, подтверждающих внедрение результатов работы в учебную и производственную деятельность.

Апробация результатов.

Полученные результаты исследования докладывались и обсуждались на таких научных конференциях, как VI Научный форум «Телекоммуникации: теория и технологии» (г. Казань, 2023), XXV Международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» (г. Казань, 22-24 ноября 2023), VII Научный форум «Телекоммуникации: теория и технологии» (г. Самара, 2024), XXII Международная научно-техническая конференция (г. Самара, 2024), XVI Международная конференция «Прикладная Оптика-2024» (г. Санкт-Петербург, 17-18 декабря 2024), XXIII Международная научно-техническая конференция «Оптические технологии в телекоммуникациях» (г. Уфа, 2025), а также на семинарах кафедры «Телекоммуникационные системы» УУНиТ.

Соответствие паспорту специальности. Результаты диссертационной работы соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 2.2.15. «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»: п. 2. Исследование новых технических, технологических и программных решений, позволяющих повысить эффективность развития цифровых сетей, систем и устройств телекоммуникаций; п.4 Разработка эффективных путей развития и совершенствования структуры, архитектуры сетей и систем телекоммуникаций, включая входящие в них элементы; п. 11. Исследование проблем построения и планирования сетей для беспилотного транспорта, в том числе для беспилотных летательных аппаратов и беспилотных автомобилей, и разработка систем и устройств телекоммуникаций для этих сетей.

Личный вклад автора. Автор диссертации **лично** получил основные результаты, обладающие научной новизной и практической значимостью, которые выносятся на защиту. В рамках соавторских публикаций автор внес существенный вклад, разработав физические и математические модели, методы создания сегментов, а также схемы и принципы генерации и преобразования сигналов. Исследование параметров и характеристик сигналов и систем, основанное на разработанных технических решениях, также является результатом самостоятельной работы автора. Кроме того, автором лично проведены вычислительные эксперименты и численное моделирование с использованием программной среды Ansys HFSS.

Публикации. По материалам исследования опубликовано 20 печатных работ, в том числе 4 статьи в научных изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий,

рекомендованных ВАК, 3 статьи в ведущих зарубежных рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 11 статей в других изданиях, получено 1 свидетельство о регистрации программы ЭВМ, издано 1 учебно-методическое пособие.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Основной текст работы изложен на 225 страницах, содержит 79 рисунков, 8 таблиц, 3 приложения. В список используемой литературы включено 252 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы, определяет объект и предмет исследования, ставит цель работы, формулирует защищаемые положения и научную новизну.

Первая глава посвящена анализу волоконно-оптических и радиодиффузных систем в сетях городского масштаба MAN и RoF. Показано, что развитие технологий 5G/6G, ЦОД и промышленного интернета требует перехода к AON, где управление сигналами осуществляется в оптическом домене, что обеспечивает снижение задержек и повышение адаптивности сетевых сегментов. Рассмотрены системы RoF и выявлены ограничения существующих решений, включая сложность перестройки радиочастоты и отсутствие эффективных методов организации служебных каналов. Это обосновывает потребность в дополнительных физических ресурсах передачи информации. Проанализирована технология дробного λ -переключения ($F_\lambda S$). Она позволяет управлять частями оптического λ -канала с субволновой гранулярностью. Установлено, что известные реализации не обеспечивают быстродействия < 1 нс, высокоизбирательности, сложно интегрируются в RoF. Анализ технологии выделенных подсетей показал, что динамическая реконфигурация VLAN сопровождается задержками до сотен миллисекунд из-за обработки на канальном и сетевом уровнях, не совместима с концепцией RoF, т.е. с операциями управления на физическом уровне. В качестве перспективного физического эффекта предложено использовать функцию изменения мгновенной длины волны оптического импульса. Показано, что ФИМД совместим с существующей инфраструктурой ВОЛП. Генерация реализуется на стандартной компонентной базе. Использование ФИМД позволяет кодировать служебную информацию без задействования основного телекоммуникационного ресурса. На основе анализа сформулированы задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена разработке технических принципов построения волоконно-оптического интерференционного устройства для высокоизбирательного демультимплексирования и анализу его применения в пакетно-коммутируемых сетях. Проведенный в первой главе анализ показал, что существующие технологии оптической коммутации (суперканалы, технология дробного λ -переключения) либо не реализуются полностью в оптическом домене, либо требуют сложной синхронизации и не обеспечивают нереляционного управления. Это обуславливает необходимость создания устройств, позволяющих осуществлять коммутацию пакетов непосредственно в оптической среде на основе информации, заложенной в самом сигнале. В качестве такого решения предложено использовать двухрезонаторный интерферометр Фабри-Перо (ДИФП), обладающий повышенной разрешающей способностью. Ключевым элементом, обеспечивающим спектральную избирательность и многопортовость, является предложенное гребенчатое зеркало,

образованное торцами выходных и дополнительных световодов. Для обеспечения его функционирования в составе высокоизбирательного устройства разработаны следующие модели и приемы.

1. Ввиду отсутствия сходящегося аналитического решения для поля в резонаторе с рельефным зеркалом, разработана методика моделирования в пакете Ansys HFSS. Для преодоления ограничений программы (ориентация на СВЧ-диапазон) предложен метод масштабирования геометрических размеров и пересчета оптических параметров материалов в СВЧ-диапазон (коэффициент пересчета $K = 6452$ для $\lambda_0 = 1550$ нм; $\lambda_{\text{вх модель}} = 1$ см).

2. Разработана методика, реализованная в режиме решения обратной задачи, которая позволила определить оптимальную форму выходного зеркала (рис. 1). Критерием оптимизации являлось минимальное искажение (ширина и порядок следования) гребней стоячей волны в смесителе ДИФП по сравнению с эталонным случаем плоских зеркал. Параметризация выявила, что наиболее значимыми параметрами, влияющими на интерференционную картину, являются форма зеркала и градиент показателя преломления вблизи его поверхности.

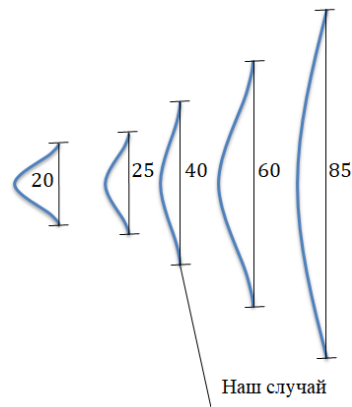


Рисунок 1– Найденные формы для выпукло-изогнутого гребенчатого зеркала ДИФП для различных его диаметров (размеры на рисунке – в сантиметрах)

3. Разработан метод компенсации искажений интерференционной картины, вносимых сложным (гребенчатым) зеркалом. Метод основан на введении градиента показателя преломления k в материале смесителя вблизи зеркала. В результате оптимизации получен итоговый градиент k^{**} , обеспечивающий наименьшее разрушение интерференционной картины (рис. 2)

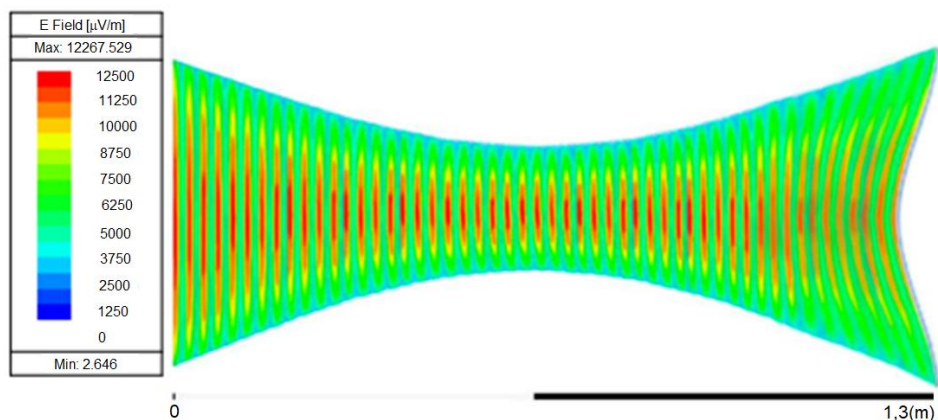


Рисунок 2 – Стоячая волна в смесителе ДИФП с выходным оптимизированным сложным зеркалом, характеризуется изогнутыми гребнями стоячей волны вблизи сложного зеркала

4. На основе анализа поведения стоячей волны вблизи оптимизированного зеркала для разных длин волн разработана конструкция гребенки (рис. 3). Принцип построения заключается в следующем: выходные торцы для более коротких длин волн располагаются ближе к центру («носику») гребенки (ступенька 1); выходные торцы для более длинных волн – ближе к основанию гребенки (ступеньки 2, 3). Торцы дополнительных световодов, образующих второй резонатор, размещены так, чтобы обеспечить требуемое соотношение мощностей $P_1/P_2 \approx 2,7 \dots 2,8$; при этом их общее количество примерно вдвое превышает число выходных световодов. Для снижения потерь торцы световодов в ярусах выполнены со скосом.

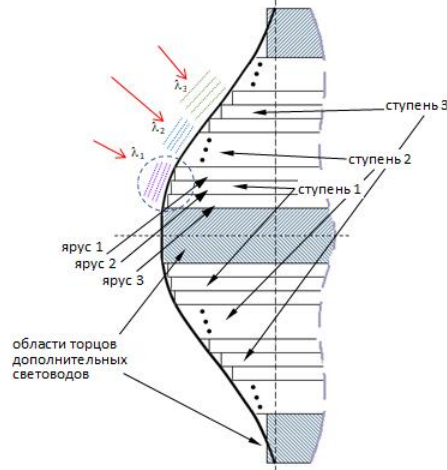


Рисунок 3 – Предложенный принцип построения ступенчатой световодной гребенки: общий вид (сбоку)

5. Для ДИФП, не имеющего аналитической передаточной функции, предложен метод оценки разрешающей способности θ по аналогии с классическим ИФП, но с учетом градиента показателя преломления. Получено соотношение для $\delta\lambda$:

$$\delta\lambda \cong \frac{4}{m} \cdot |n(z_1) \cdot z_1 - n(z_2) \cdot z_2|, \quad (1)$$

где m – порядок интерференции, $n(z)$ – значение показателя преломления в точках z_1 и z_2 , определяющих ширину интерференционного максимума.

Расчеты показали, что $\delta\lambda_{\text{опт}} \cong 1,6 \cdot 10^{-5}$ нм, что является достаточным для решения задачи демультиплексирования chirпированных сигналов в заданном диапазоне ($\Delta\lambda_{\text{раб}} = 0,001 \dots 0,01$ нм).

6. Для преодоления ограничений HFSS, не позволяющих напрямую описывать градиентные материалы, разработана программа на языке программирования Python. Она преобразует исходные табличные данные о показателе преломления $n(x, y, z)$ (полученные ранее в расчётах на FORTRAN) в формат библиотеки материала (*.amat), воспринимаемый HFSS. Программа выполняет интерполяцию данных с заданным шагом, что необходимо для обеспечения стабильности и сходимости численного решения при адаптивном изменении сетки в процессе моделирования.

7. Разработана методика обеспечения сходимости и верификации точности численного решения в пакете HFSS. Методика заключается в итеративном уменьшении шага сетки (от 1/20 до 1/64 от длины волны) с последовательным сравнением амплитуд поля на гребнях стоячей волны. Критерием достаточной точности принято изменение амплитуд не более 0,1% на последних итерациях. Полученный таким образом шаг (примерно 1/64 от длины волны) был подтвержден автоматическим адаптивным построением сетки в HFSS, что позволило достичь общей

относительной погрешности решения приблизительно $1,43 \cdot 10^{-5}$.

8. Выполнена оценка влияния хроматической дисперсии (ХД) на передачу chirпированных сигналов в линии SMF-28. Показано, что для битовых скоростей до 1 Гбит/с воздействие ХД на управляющий chirп на сегментах городского масштаба не является критичным. Для более высоких скоростей работа целесообразна на коротких сегментах (например, в ЦОД).

9. Разработана математическая модель для количественной оценки эффективности применения предложенного устройства с динамическим перераспределением трафика. В модели многоканальная система описывается стационарным случайным процессом (в качестве базового принято Пуассоновское распределение, которое при необходимости может быть заменено на Эрланговское и др. без потери общности), а эффект от использования ДИФП выражается через отношение реальной производительности системы с возможностью заполнения периодов молчания (θ^*) к производительности без неё (θ):

$$Y = \frac{\theta^*}{\theta} \quad (2)$$

Моделирование (рис. 4) показало, что эффективность Y растет с увеличением числа каналов J и числа каналов L , участвующих в перераспределении трафика. Дополнительно получены выражения для оценки снижения задержки бита при использовании предложенного метода.

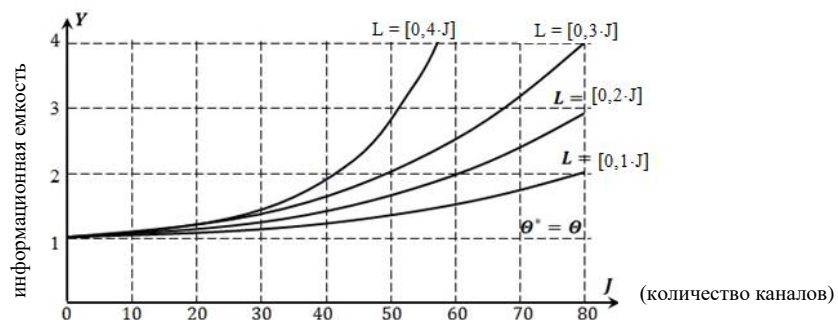


Рисунок 4 – Графики для результирующей эффективности в сети с ДИФП - устройством, обеспечивающим заполнение периодов молчания абонентов

Таким образом, разработано многопортовое волоконно-оптическое устройство на основе ДИФП с профилированным смесителем и оптимизированной ступенчатой световодной гребенкой на выходном зеркале. Устройство является нереляционным, не требует буферизации и глобальной синхронизации. Управление перенаправлением пакетов осуществляется на основе функции chirпа $C(t)$, содержащейся в сигнале. Количество выходных портов может составлять от 50 до 100 и более. Разрешающая способность устройства ($\delta\lambda \sim 10^{-5}$ нм) позволяет реализовать принципы дробного λ -переключения ($F_\lambda S$) и эффективно работать в сетях ЦОД, повышая их пропускную способность и снижая задержки.

В третьей главе рассматриваются вопросы разработки RoF-сегментов, обеспечивающих формирование выделенных подсетей в радиоканале (радиоVLAN) на физическом уровне сети за счёт применения ФИМД-сигналов. Показано, что использование chirпа в составе оптического сигнала позволяет управлять пространственным распределением излучения ФАР и формировать динамические радиоVLAN (рис. 5).

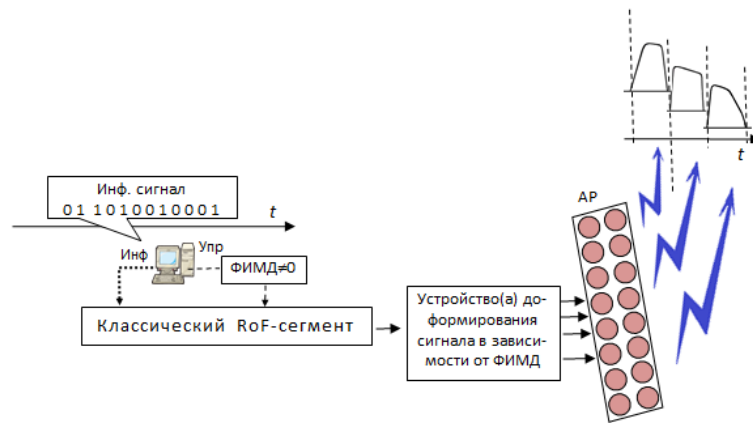


Рисунок 5 – Формирование выделенных подсетей в RoF-сегменте на физическом уровне (режим «ФИМД≠0»)

Проведено моделирование работы классической RoF-схемы с двумя лазерами. Установлено, что при увеличении разности частот лазеров, соответствующей радиочастотам от единиц ГГц и выше, в системе возникают значительные фазовые шумы, ограничивающие применение таких схем.

В связи с этим предложены схемы построения RoF-сегментов с использованием одного лазерного источника. Разработана архитектура RoF-сегмента с управлением ФАР посредством ФИМД-сигналов, включающая ФИМД-элемент $C(t)$, который определяет параметры чирпа для формирования необходимого распределения излучения. Это обеспечивает распределение сигналов по группам излучателей и формирование радиоVLAN на физическом уровне сети (рис. 6). Данный подход представляет особый интерес для управления БПЛА-коммутаторами в «летающих сетях».

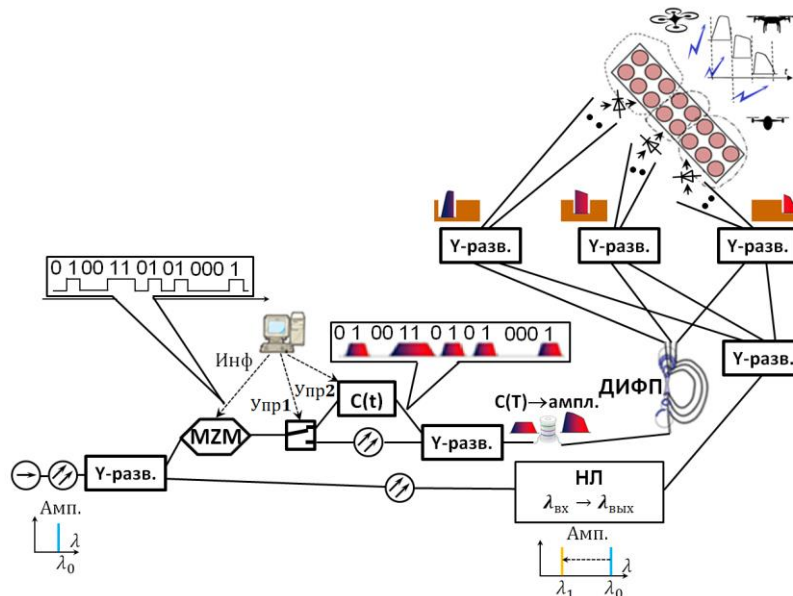


Рисунок 6 – Архитектура RoF-сегмента с ФИМД-управлением в режиме передачи на радиоVLAN

Ключевым элементом предложенной архитектуры является преобразователь изменения амплитуды при изменении длины волны для оптического сигнала, реализованный на базе эрбиевого волоконного усилителя (EDFA). В результате моделирования получена передаточная характеристика:

$$\Delta P_s \cong 2,275 \times 10^{-4} \text{ [Вт/нм]} \times \Delta \lambda \quad (3)$$

позволяющая регистрировать изменения длины волны порядка 0,005 нм.

Показано, что реализация управления радиоVLAN на физическом уровне позволяет снизить задержки переконfigurирования сети более чем на 2 порядка по сравнению с традиционными решениями, основанными на коммутационном оборудовании уровней 2–3 модели OSI.

В четвертой главе представлена разработка адаптивного RoF-сегмента для технологических сетей, обеспечивающего передачу информации и управление внутритрубными объектами с использованием ФИМД-сигналов. Предложено формирование волноводных мод: TE_{01} (то же – H_{01}) – для внутритрубной связи, и E_{11} (то же – TM_{11}) – для мониторинга. Моделированием в программном пакете Ansys HFSS определены амплитудно-фазовые распределения для ФАР из 19 элементов. Установлены зависимости дальности радиолинии от диаметра трубопровода и свойств наполняющей среды (случай 1 – среда: $\epsilon = \epsilon_{\text{реал}} \cong 1,67$; $\tan \delta_{\text{потерь}} \cong 4 \cdot 10^{-8}$, получено, что для трубопровода с диаметром 50 см дальность радиолинии составляет около 600 м; случай 2 – среда: $\epsilon = \epsilon_{\text{реал}} + j \cdot \epsilon_{\text{jm}} \cong 1,82 + j \cdot 2,23$; $\tan \delta_{\text{потерь}} \cong 1,23$ и эл. проводности $\sigma \cong 4,61 \cdot 10^{-9}$ [См/м] получено, что для трубопровода с диаметром 10 см дальность радиолинии составляет до 40 м). Разработана оптическая схема дуплексного канала для связи с внутритрубным подвижным объектом (рис. 7). Определена функция ФИМД-сигнала, необходимая для формирования заданного амплитудно-фазового распределения на ФАР.

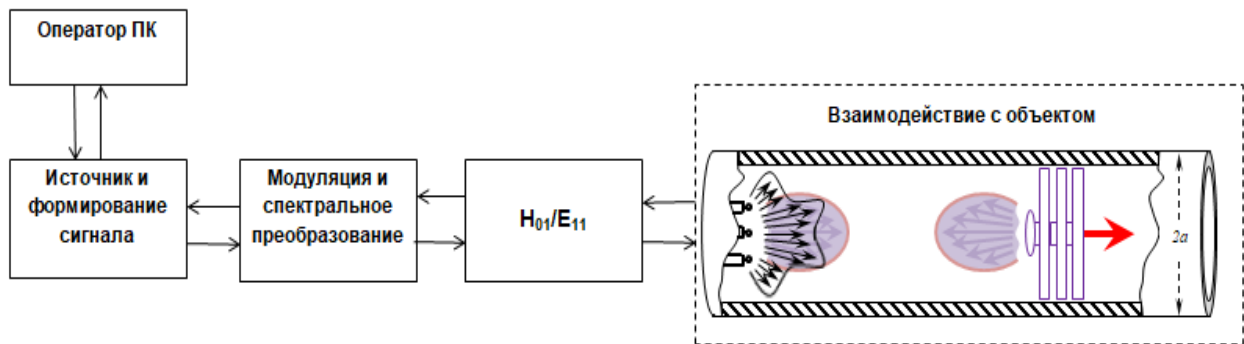


Рисунок 7 – Схема оптическая принципиальная дуплексного канала для связи с внутритрубным подвижным устройством

Проведено моделирование распространения ФИМД-сигналов по разветвленным ВОЛП, характерным для городских сетей. На основе численного моделирования распространения оптических импульсов с учетом дисперсии и нелинейных эффектов выработаны рекомендации по выбору параметров эрбиевых волоконных усилителей (EDFA) и коэффициентов деления разветвителей (табл. 1), обеспечивающие сохранение положительного chirпирования. Установлено, что для минимизации искажений ФИМД-сигнала при разветвлении до 1×12 достаточно одного EDFA, а при большей степени разветвления требуется применение двух усилителей.

Таблица 1 – Рекомендуемые параметры разветвленных ВОЛП для сегментов xPON/MAN с информационно-управляющими ФИМД-сигналами

Разветвитель до 1×6	1×6 ... 1×12	Свыше 1×12 (иссл. до 1×24)
Y-разветвитель	Y-разветвитель	Звездообразный разветвитель
EDFA до разветвителя		Двойной EDFA
$L_{EDFA} = 10$ м и $P_{EDFA} = 35$ мВт	$L_{EDFA} = 18...25$ м и $P_{EDFA} = 35$ мВт	Перед разветвителем $L_{EDFA} = 25$ м; после – 18 м; $P_{EDFA} = 35$ мВт
$n_{НЛК} \approx 1...3 \times 10^{-17}$ м ² /Вт ²	$6...8 \times 10^{-17}$ м ² /Вт ²	$1...3 \times 10^{-17}$ м ² /Вт ²
$P_{ASE} \approx 0,11...0,15$ мВт	$P_{ASE} \approx 0,15...0,20$ мВт	$P_{ASE} \approx 0,20...0,30$ мВт

Для оценки QoS выполнено моделирование задержек доставки сообщений с учетом битовых ошибок и используемых протоколов маршрутизации. На основе разработанной вероятностной модели проведено сравнение протоколов BGP, RSVP, OSPF и INAP, функционирующих через ядро IS-IS и IPv6. Сопоставление этих протоколов разного функционального назначения (BGP/OSPF – маршрутизация, RSVP – резервирование, INAP – прикладной уровень) в единой модели возможно благодаря общему сетевому ядру на базе IS-IS и позволяет оценить влияние различных протокольных механизмов на задержки и достоверность передачи ФИМД-сигналов. Установлено, что в условиях автоматической реконфигурации сети наиболее эффективен протокол RSVP, обеспечивающий наименьшие задержки при фоновых ошибках.

Разработанные решения позволяют создавать адаптивные RoF-сегменты, интегрируемые в городские сети доступа, и могут быть использованы для управления внутритрубными объектами в рамках концепции «Промышленного интернета». Применение предложенного подхода обеспечивает увеличение эффективности использования полосы пропускания до 2 раз и снижение задержек передачи в 5...6 раз.

В заключении изложены основные результаты и выводы, полученные автором, а также перспективы дальнейших исследований.

В приложении изложены теоретические основы для расчёта параметров предложенных сегментов и документы, подтверждающие их использование в учебном процессе ФГБОУ ВО «УГНТУ» при проведении лабораторных и практических работ, и на предприятии АО «Центр информационно-коммуникационных технологий Республики Башкортостан», г. Уфа, в виде методики расчета и программного обеспечения для нахождения QoS-показателей сложно-разветвленных сегментов городских сетей.

Перспективы дальнейшего исследования. Актуальными направлениями исследований в рамках развития использования предложенных методов является изучение влияния дисперсионных свойств смесителя ДИФП на структуру интерференционной картины, и подробное изучение влияния среды распространения на параметры радиолинии для технологического сегмента.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод управления волоконно-оптическим пакетно-коммутирующим сегментом, основанный на применении процесса физического уровня с передачей управляющей информации в составе информационных пакетов в виде функции чирпа/ФИМД, что обеспечивает перенаправление пакетов и балансировку трафика в оптическом домене без задействования узлового коммутационного оборудования уровня ядра сети, и тем самым позволяет снизить задержки получения пакетов на приеме.

2. Разработана методика построения высокоизбирательного демультимплексора, основанная на неперестраиваемом волоконно-оптическом интерференционном многопортовом устройстве с применением ступенчато-скошенной структуры частотно-избирательного элемента (световодного гребенчатого зеркала) и уточненным градиентом показателя преломления рабочей области устройства, базирующаяся на использовании служебной ФИМД-информации в коммутируемом сигнале, что позволяет перенаправлять пакеты на ВОЛП с параметрами, соответствующими стандартам оптических сетей, в диапазоне $[1,6 \cdot 10^{-5} \text{ нм} \leq \Delta\lambda \leq 5 \cdot 10^{-3} \text{ нм}]$ и более в соответствующие выходные световоды без каскадного прохождения сигнала, и не менее, чем в 10 раз уменьшить коммутируемую λ -часть по отношению к применяемому в известных системах с полностью оптической пакетной коммутацией, и более, чем в 3 раза увеличить производительность указанных систем связи.

3. Разработана методика управления радиосегментом волоконно-радиоэфирной сети с применением процессов физического уровня, основанная на формировании заданного амплитудного (либо амплитудно-фазового) распределения для ФАР с применением разработанных: устройства преобразования изменения амплитуды при изменении длины волны для поступающего сигнала и устройства коммутации частей λ -канала на радиоизлучатели, обеспечивающая формирование динамических выделенных подсетей в радиосегменте без задействования традиционного телекоммуникационного ресурса для управляющей информации и привлечения настроек коммутационного оборудования канального и сетевого уровней.

4. Предложен метод преобразования изменения амплитуды при изменении длины волны для оптического сигнала, базирующийся на волоконно-оптическом усилителе, легированном эрбием, и разработана методика моделирования параметров преобразователя, основанная на динамическом представлении параметров активной среды для режима минимального изменения (смещения) начального уровня усиления (расположения полки усиления), позволяющая определить параметры эрбиевого оптоволокна, обеспечивающие технически реализуемое преобразование: $\Delta P_s \cong 2,275 \cdot 10^{-4} [\text{Вт/нм}] \cdot \Delta\lambda$ вблизи $\lambda_0 = 1532 \text{ нм}$.

5. Предложена архитектура ВОЛС с ФИМД-управлением, входящая в состав специализированных сетей, основанная на разработанных многоярусной топологии и требованиях к структуре сегмента и протоколу маршрутизации (по применению разнопутевых алгоритмов и степени узловых соединений), полученных в результате моделирования процессов физического, канального и сетевого уровней в разветвленном сегменте с пакетной коммутацией с учетом свойств передаваемого ФИМД-сигнала, что позволяет минимизировать искажения последнего. Применение сетевого сегмента с рекомендованными параметрами для ФИМД-управления обеспечивает возможность передачи наибольшего количества уплотненных каналов (для заданного ТС-ресурса) при поддержании нормативного уровня QoS и позволяет увеличить эффективность использования полосы пропускания до 2 раз, а задержки уменьшить в 5...6 раз.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК

1. Виноградова И.Л., Головина Е.Ю. Выработка рекомендаций по структуре ВОЛП городских сетей, минимально искажающей информационно-управляющие

ФИМД-сигналы // Инфокоммуникационные технологии. – 2023. – Т. 21, №4. – С. 37- 46.

2. Виноградова И. Л., Головина Е. Ю. Метод обеспечения адаптивности радиолинии промышленного объекта, основанный на использовании оптических сигналов с функцией изменения мгновенной длины волны оптического излучения // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2024. – Т. 16, №. 4. – С. 50-59.

3. Виноградова И. Л., Головина Е. Ю. Анализ эффективности генерирования и преобразования оптических ФИМД-сигналов на базе классического RoF-сегмента, основанного на применении двух лазеров // Вестник СибГУТИ. – 2024. – Т. 18, №. 3. – С. 28-44.

4. Виноградова И.Л., Султанов А.Х., Головина Е.Ю., Комиссаров А.М., Филатов П.Е. Быстрое оптическое переключение: анализ существующих решений и новый метод, обеспечивающий коммутацию сигналов/пакетов в мультисервисных сетях // Труды учебных заведений связи. – 2025. – Т. 11, № 5. – С. 97–118. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-97-118.

Статьи, индексируемые в международной базе WoS/Scopus

5. Golovina E. U., et. al. Method of RoF-network segment control using chirped optical pulses // Optical Technologies for Telecommunications 2023. – SPIE, 2024. – Vol. 13168. – PP. 51-62.

6. Vinogradova I. L., Golovina E. U., Gizatulin A. R., & Meshkov I. K. EDFA optical amplifier for radiophotonic systems // Optical Technologies for Telecommunications 2023. – SPIE, 2024. – Vol. 13168. – PP. 102-110.

7. Golovina E. U., et. al. Optical technologies for radio line adaptability in industry // In Optical Technologies for Telecommunications 2024. – SPIE, 2025. – Vol. 13738. – PP. 13-23.

Прочие публикации

8. Головина Е.Ю. К вопросу построения полностью оптических сетей // Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационные технологии и решения в промышленности». Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). Ишимбай-Стерлитамак, 2024. – С. 350-353.

9. Головина Е.Ю. Применение радиосегментов для приложений «Промышленного интернета» на примере внутритрубных систем мониторинга // Наука. Технология. Производство – 2025: материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 80-летию Победы в Великой Отечественной войне. Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2025. – С.269-271.

10. Головина Е.Ю. Высокоскоростное полностью оптическое переключение на основе двухрезонаторного интерферометра Фабри-Перо // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций (ПТиТТ-2025); Оптические технологии в телекоммуникациях (ОТТ-2025): материалы XXVII и XXIII Международных научно-технических конференций (г. Уфа, 5–7 ноября 2025 г.) / отв. ред. А.Х. Султанов [Электронный ресурс] / Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа: Уфимский университет, 2025. – С. 688-689.

11. Виноградова И.Л., Гизатулин А.Р., Мешков И.К., Головина Е.Ю. Генерация поверхностного плазмона на оптоволокне с графеновым покрытием для сенсорных приложений // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2023. – Т. 3, № 4. – С. 57-64.

12. Виноградова И. Л., Головина Е. Ю. Использование технологии Radio-over-Fiber в системах связи // Сборник научных статей по материалам XIII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники», Уфа. – 2023. – С. 84-88.

13. Виноградова И. Л., Головина Е. Ю. Анализ существующих методов оптического управления фазированными антенными решетками // Современные вопросы устойчивого развития общества в эпоху трансформационных процессов: Сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции, Москва, 25 декабря 2023 года. – Москва: ООО «Издательство АЛЕФ», 2023. – С. 125-133.

14. Виноградова И. Л., Головина Е. Ю. Существующие принципы и схемы построения систем связи категории Radio-over-Fiber // Концепция устройства современного мира в эпоху цифры: сборник научных трудов по материалам Международного научного форума, Москва, 15 декабря 2023 года. – Москва: Алеф, 2023. – С. 83-87.

15. Виноградова И.Л., Филатов П.Е., Комиссаров А.М., Косцов Я.М., Головина Е.Ю. Управление чирпированием для радиосегмента ROF-сети // В сборнике: VI Научный форум «Телекоммуникации: теория и технологии» ТТТ-2023. Материалы XXV Международной научно-технической конференции. Казань, 2023. – С. 390-392.

16. Виноградова И.Л., Головина Е.Ю., Султанов А.Х. К вопросу использования функции чирпа для задач управления в оптическом канале систем связи // «Оптические технологии в телекоммуникациях» ОТТ-2024 Материалы XXII Международной научно-технической конференции (г. Самара, 06 – 08 ноября 2024 г.). – Самара: ПГУТИ, 2024. – С. 8-9.

17. Виноградова И. Л., Головина Е. Ю., Косцов Я. М. О применении функции чирпа для задач управления в оптическом канале систем связи // Прикладная оптика - 2024: сборник тезисов XVI Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 17–18 декабря 2024 года. – Санкт-Петербург: ООО «Скифия-принт», 2025. – С. 135-137.

18. Головина Е. Ю. и др. Компьютерное моделирование параметров оптического элемента для управления БПЛА в радиосегменте // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2025. – Т. 21, № 3. – С. 81-89.

Учебно-методическое пособие

19. Радиосистемы обработки информации и телекоммуникации: учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных работ и СРО / УГНТУ, ИНН (фил. в г. Салавате), каф. ИнТех; сост. Головина Е.Ю., Виноградова И.Л., Зарипов Д. М., Шамсутдинова А.В. - Салават : УГНТУ, 2025. - 1,13 Мб. - Б. ц. - Текст : электронный.

http://bibl.rusoil.net/base_docs/UGNTU/FILIALE/Salawat/Golovina20024.pdf

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025693357 РФ. Расчет излучения фазированной антенной решетки для управления радиосегментом: заявл. 19.11.2025: опубл. 27.11.2025 / Виноградова И. Л., Головина Е. Ю., Зарипов Д. М., Шамсутдинова А. В.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Диссертант



Е.Ю. Головина