

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники»

Объект авторского права

УДК 621.391.63

РОЩУПКИН
Яков Викторович

**КОГЕРЕНТНЫЙ И САМОКОГЕРЕНТНЫЙ ПРИЕМ ДВУХ- И
МНОГОПОЗИЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В ВОЛОКОННО-
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства
телекоммуникаций

Минск 2026

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель

Алишев Япанче Вагизович,

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты

Козлов Сергей Вячеславович, доктор технических наук, профессор кафедры информационных радиотехнологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Горшков Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, директор общества с ограниченной ответственностью «МилитСофт Солюшенс».

Оппонирующая организация

учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»

Защита состоится «15» октября 2026 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. +375-17-293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «14» сентября 2026 г.

Ученый секретарь

совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент



Т. А. Пулко

ВВЕДЕНИЕ

Волоконно-оптические системы передачи, благодаря своим хорошо известным и неоспоримым достоинствам, широко используются во многих областях, но в первую очередь в области телекоммуникаций на всех уровнях сетей. Однако, с ростом популярности сервисов и приложений, требующих передачу больших объемов информации, выдвигаются новые требования к эффективности ВОСП. Использование форматов модуляции, отлично зарекомендовавших себя в радиодиапазоне, таких как, дифференциальная фазовая модуляция (DPSK) и квадратурная фазовая модуляция (QPSK) позволяет повысить энергетическую и спектральную эффективность системы передачи. Другим перспективным направлением является использование самокогерентного метода приема, когда оптический сигнал детектируется путем смещения с некоторой составляющей принимаемого сигнала, формируемой на передающей стороне и выделяемой на приеме. Усиление отдельной составляющей спектра принимаемого сигнала при помощи узкополосного оптического усилителя позволяет повысить энергетическую эффективность системы передачи. Повышению эффективности ВОСП за счет использования DPSK и QPSK модуляции и избирательного усиления определенной компоненты спектра посвящена данная диссертационная работа.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертационной работы соответствует пункту 5 приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 190 от 12 марта 2015 г., «Информатика и космические исследования», а также пункту 1 приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы, утвержденных Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156, «Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии, основанные на них производства: средства связи и методы передачи данных».

Результаты исследований, представленные в диссертации, использованы при выполнении следующих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР):

1. Научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа «Провести научные исследования и разработать конструкторскую документацию и программное обеспечение головной и рабочей станций 32-канальной волоконно-оптической системы по теме: «Разработать и изготовить оборудование цифровой 32-канальной волоконно-оптической системы со спектральным разделением для сети кабельного телевидения» (Шифр «Фотон»)), х/д 03-1024, № госрегистрации 20033708.

2. Научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа

«Изготовить опытные образцы, провести наладку и настройку головной и рабочей станции 32-канальной волоконно-оптической системы по теме: «Разработать и изготовить оборудование цифровой 32-канальной волоконно-оптической системы со спектральным разделением для сети кабельного телевидения» (Шифр «Фотон»)), х/д 03-1036, № госрегистрации 20033709.

3. Научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа «Разработать программно-технические средства оптического модуля STM-4 системы передачи синхронной иерархии», х/д 03-1094, № госрегистрации 2004308.

4. Научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа «Разработать модуль оптического передатчика обратного канала для интерактивных гибридных сетей кабельного телевидения», х/д 04-1012, № госрегистрации 20042548.

5. Научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа «Изготовить опытные образцы, провести наладку и настройку комплекта оборудования 32-канальной волоконно-оптической системы». х/д 04-1071, № госрегистрации 200555.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью диссертационной работы является повышение эффективности (энергетической, спектральной, информационной) волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) за счет улучшения структуры и параметров передающих и приемных устройств.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ методов преобразования оптического сигнала;
- разработать методы передачи и приема оптических сигналов, обеспечивающие повышение энергетической эффективности ВОСП, при сохранении спектральной и информационной эффективности;
- разработать структуру оптического канала для повышения информационной эффективности ВОСП при сохранении энергетической и спектральной эффективности;
- разработать структуру ВОСП с улучшенной спектральной эффективностью при сохранении энергетической и информационной эффективности;
- разработать модели ВОСП, учитывающие баланс между спектральной, энергетической и информационной эффективностью.

Объект исследования – приемо-передающие устройства ВОСП.

Предмет исследования – методы передачи и приема оптических сигналов в ВОСП.

Научная новизна

1. Научная новизна группы методов самокогерентного приема заключается в следующем:

- для метода самокогерентного приема оптических сигналов с дифференциальной фазовой модуляцией предложено раздельное усиление сигналов двух фотодиодов с их последующим вычитанием в решающем устройстве; показано, что мощность шумового тока для такой схемы включения и случая,

когда емкость фотодиода существенно превышает входную емкость усилителя уменьшается в два раза по сравнению с усилением разностного сигнала двух параллельно включенных фотодиодов, что приводит к повышению чувствительности приемника на величину до 1,5 дБ по сравнению с известной схемой включения фотодиодов;

– в методе передачи и приема оптических сигналов с усилением несущей для формирования защитного интервала между информационными составляющими и несущей предложено использовать линейное кодирование сигнала на стороне передачи, что обеспечивает возможность избирательного усиления несущей в узкополосном усилителе Манделъштама-Бриллюэна при приеме; установлено, что увеличение уровня несущей по отношению к информационным составляющим обеспечивает повышение коэффициента преобразования информационных составляющих в фотодетекторе с квадратичной характеристикой и достижение выигрыша по чувствительности до 6,64 дБ для скорости передачи 2,5 Гбит/с и вероятности ошибки 10^{-9} ; показано, что предельная скорость передачи для данного метода определяется частотой смещения Бриллюэна и ограничена величиной 10 Гбит/с;

– в методе передачи и приема оптических сигналов с усилением пилот-сигнала показано, что увеличение уровня спектральной компоненты пилот-сигнала за счет его избирательного усиления в узкополосном оптическом усилителе Манделъштама-Бриллюэна приводит к повышению коэффициента преобразования информационных составляющих в фотодетекторе с квадратичной характеристикой с увеличением чувствительности приемника до 3 дБ при скорости передачи 10 Гбит/с и вероятности ошибки 10^{-9} .

2. Показано, что снижение влияние дробового шума помехи обратного канала в методе дуплексной одноволоконной передачи и приема оптических сигналов без спектрального разделения встречных потоков достигается за счет использования гетеродинного метода приема в сочетании с бимпульсным линейным кодированием, обеспечивающим смещение спектра сигнала в высокочастотную область и уменьшение влияние помехи обратного рассеивания, мощность которой обратно пропорциональна частотной расстройке.

3. Установлено, что использование гомодинного приема и отдельного усиления сигналов четырех фотодиодов на выходе смесителя в методе когерентного (гомодинного) приема оптических сигналов с квадратурной фазовой модуляцией и поляризационным разделением обеспечивает повышение чувствительности приемного устройства до -51 дБм при скорости передачи 10 Гбит/с и вероятности ошибки 10^{-9} .

Положения, выносимые на защиту

1. Методы самокогерентного приема сигналов в волоконно-оптических системах передачи:

– метод самокогерентного приема оптических сигналов с дифференциальной фазовой модуляцией, основанный на использовании интерферометра Маха-Цандера для преобразования дифференциальной фазовой модуляции в модуляцию интенсивности, отличающийся отдельным усилением сигналов

двух фотодиодов на выходе интерферометра с их последующим сравнением в решающем устройстве, что позволяет получить выигрыш по чувствительности до 1,5 дБ по сравнению с усилением разностного сигнала двух последовательно включенных фотодиодов;

– метод передачи и приема оптических сигналов, основанный на модуляции интенсивности на передающей стороне и усилении оптической несущей на приемной стороне, отличающийся использованием узкополосного оптического усилителя Мандельштама-Бриллюэна для усиления несущей и дополнительным линейным кодированием передаваемого сигнала для формирования защитного интервала между информационными составляющими и несущей в процессе модуляции, позволяющий получить выигрыш по чувствительности приемного устройства до 6,64 дБ для скорости передачи 2,5 Гбит/с и вероятности ошибки 10^{-9} по сравнению с методом прямого фотодетектирования без усиления несущей;

– метод передачи и приема оптических сигналов, отличающийся введением в спектр передаваемого сигнала дополнительной однотональной компоненты – пилот-сигнала и его избирательном усилении при помощи узкополосного оптического усилителя Мандельштама-Бриллюэна на приемной стороне, позволяющий получить выигрыш по чувствительности до 3 дБ для скорости передачи 10 Гбит/с и вероятности ошибки 10^{-9} по сравнению с методом прямого фотодетектирования без использования пилот-сигнала.

2. Метод дуплексной одноволоконной передачи и приема оптических сигналов без спектрального разделения встречных потоков, отличающийся применением гетеродинного приема и биимпульсного линейного кодирования на передаче, позволяющий обеспечить дуплексную передачу с увеличением объема передаваемых данных в 2 раза без ухудшения отношения сигнал-шум.

3. Метод когерентного (гомодинного) приема оптических сигналов с квадратурной фазовой модуляцией и поляризационным разделением, основанный на использовании 90-градусного оптического смесителя для смешения принимаемого оптического сигнала с опорным излучением и определения значения фазы принимаемого сигнала, отличающийся раздельным усилением сигналов четырех фотодиодов на выходе смесителя с их последующим попарным сравнением в решающем устройстве, позволяющий повысить чувствительность приемного устройства до -51 дБм для скорости передачи 10 Гбит/с и вероятности ошибки 10^{-9} , что дает выигрыш по чувствительности до 1,5 дБ по сравнению с усилением разностного сигнала последовательно включенных фотодиодов.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с отграничением их от соавторов совместных исследований и публикаций

Представленные в диссертационной работе научные результаты, а также положения, выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно.

Все результаты, приведенные в диссертации, получены либо соискателем, либо с его непосредственным участием. Личный вклад соискателя заклю-

чается в научном обосновании и разработке методов повышения энергетической, спектральной и информационной эффективности ВОСП, проведению их теоретического анализа и моделирования для исследования параметров и характеристик; обработке и анализе полученных результатов; формулировке выводов.

Вклад кандидата технических наук, доцента Урядов В. Н. связан с постановкой цели и задач исследования. Вклад других соавторов совместно опубликованных работ – Бунаса В. Ю., Зеленина С. А., Урядова В.В., Курбыко Д.Н., Пшенника М.Л., Лукашевича С.А. – связан с обсуждением полученных результатов и возможностей внедрения результатов диссертации. Результаты, полученные соавторами публикаций, в диссертацию не вошли.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XVI Белорусско-российская научно-техническая конференция «Технические средства защиты информации» (Минск, БГУИР, 2008 г.); XIII международная научно-техническая конференция «Современные средства связи» (Минск, ВГКС, 2008 г.); Международная научно-техническая конференция, посвященная 45-летию МРТИ-БГУИР (Минск, БГУИР, 2009 г.); XVII Белорусско-российская научно-техническая конференция «Технические средства защиты информации» (Минск, БГУИР, 2009 г.); XVIII Белорусско-российская научно-техническая конференция «Технические средства защиты информации» (Браслав 2010 г.); VI международная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций "РТ - 2010"» (Севастополь, СевНТУ, 2010 г.); Международный научно-технический семинар «Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных» (Минск, БГУИР, 2010 г.); XV международная научно-техническая конференция «Современные средства связи» (Минск, ВГКС, 2010 г.); Международный научно-технический семинар «Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных» (Минск, БГУИР, 2018 г.) ; Международный научно-технический семинар «Технологии передачи и обработки информации» (Минск, БГУИР, 2023 г.); Международный научно-технический семинар «Технологии передачи и обработки информации» (Минск, БГУИР, 2025г.).

Использование результатов диссертации подтверждено актами их практического использования.

Опубликованность результатов диссертации

По результатам выполненных исследований опубликовано 18 научных работ общим объемом 3,8 авторских листа, в том числе: 6 статей в научных журналах, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, общим объемом 2,2 авторских листа; 9 статей в сборниках материалов конференций объемом 1,5 авторских листа; 2 статьи опубликованы в сборниках тезисов докладов конференций объемом 0,1 авторских листа, патент Республики Беларусь на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников и 7 приложений. Список использованных источников включает библиографический список из 120 наименований и список публикаций соискателя ученой степени из 18 наименований. Общий объем – 172 страницы, в том числе 77 рисунков на 55 страницах, 61 таблица на 30 страницах, 7 приложений на 30 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** рассмотрены методы повышения энергетической, спектральной и информационной эффективности ВОСП. Рассмотрена взаимосвязь между показателями эффективности системы передачи, определены основные пути независимого повышения каждого из основных показателей.

Показано, что оптимальный метод передачи двоичной информации предполагает представление двух информационных символов двумя реализациями сигнала, отличающимися только алгебраическим знаком. Относительная фазовая манипуляция (DPSK) несущего колебания постоянной амплитуды полностью отвечает этим требованиям. DPSK также позволяет снизить влияние нелинейных эффектов в оптическом волокне. Для детектирования оптических сигналов с DPSK могут применяться когерентные методы приема, недостатком которых является существенное усложнение приемного устройства.

Для повышения спектральной эффективности действенным способом является использование многоуровневых форматов модуляции, в которых информация закладывается в относительное изменение фазы, как относительная квадратурная фазовая модуляция (DQPSK). Помимо снижения влияния нелинейных искажений, DQPSK модуляция обладает большей устойчивостью к влиянию дисперсии. Улучшение характеристик оптической системы передачи возможно за счет комбинации DQPSK модуляции с двоичным поляризационным мультиплексированием, что позволяет в два раза увеличить спектральную эффективность. Для детектирования DQPSK помимо когерентных методов приема, усложняющих приемное устройство, может быть использован упрощенный приемник на интерферометрах с линией задержки, однако в этом случае ухудшается чувствительность приемного модуля. Уменьшить влияние вышеперечисленных недостатков позволяет модернизация структуры приемных модулей, предложенная в данной диссертационной работе.

Для повышения энергетической эффективности оптических систем передачи применяются когерентные методы приема, альтернативой которым является использование самокогерентного метода, когда принимаемый оптический сигнал детектируется путем смешения не с излучением местного гетеродина, а с некоторой составляющей принимаемого сигнала (пилот-сигналом), формируемой на передающей стороне и выделяемой на приеме. В этом случае существенно упрощается приемный оптический модуль, поскольку не требуются

технически сложные устройства стабилизации частоты и фазы местного гетеродина. Существуют различные способы передачи пилот-сигнала: на ортогональной поляризации, с частотным или временным разделением, а также пространственным и модовым разнесением информационного сигнала и пилот-сигнала. Недостатком такого подхода являются затраты энергии на передачу пилот-сигнала большой мощности, что в конечном итоге не позволяет добиться существенного улучшения энергетической эффективности.

С целью преодоления данного недостатка может быть использовано узкополосное усиление на приемной стороне отдельной компоненты спектра оптического сигнала при помощи распределенного волоконно-оптического усилителя Манделъштама – Бриллюэна. Методы построения оптических систем с самокогерентным методом приема и усилением отдельной компоненты спектра оптического сигнала рассмотрены в данной диссертационной работе.

Во **второй главе** приведено описание методов повышения энергетической эффективности ВОСП.

Метод самокогерентного приема оптических сигналов с дифференциальной фазовой модуляцией отличается раздельным усилением сигналов двух фотодиодов на выходе интерферометра. Структурная схема приемного модуля, реализующего этот метод приведена на рисунке 1.

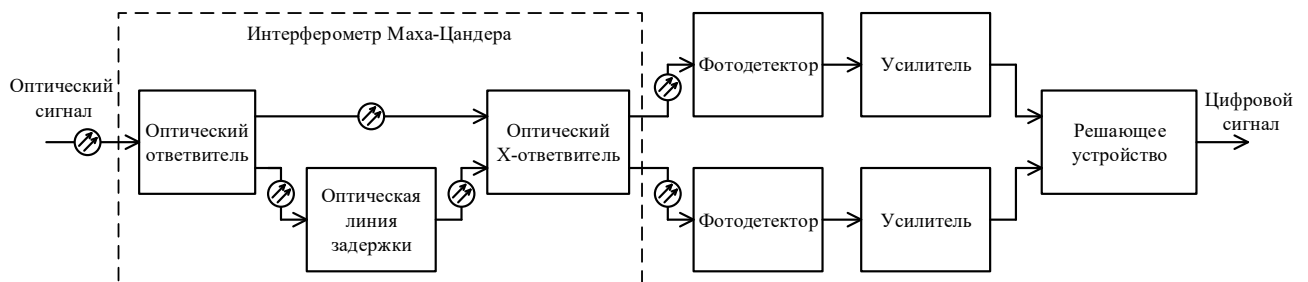


Рисунок 1 – Структурная схема двухканального приемного оптического модуля

В данном приемном модуле используются оба выхода интерферометра и два фотодиода, выходной сигнал каждого фотодиода усиливается отдельным независимым предварительным усилителем. Чувствительность приемного модуля по средней мощности определяется следующим выражением:

$$P_{\text{ср}} = \frac{h\nu}{q\eta} Q_{\text{ош}} \sqrt{8kT [2\pi(C_{\text{ф}} + C_{\text{у}})] B^2 \left[\frac{In_2}{2K} + \frac{In_3 [2\pi(C_{\text{ф}} + C_{\text{у}})] BF_{\text{ПТ}}}{q_m} \right]}$$

где h – постоянная Планка, ν – частота оптического излучения, q – заряд электрона, η – квантовая эффективность фотодетектора, $Q_{\text{ош}}$ – значение Q -функции для заданной вероятности ошибки, k – постоянная Больцмана, T – температура, $C_{\text{ф}}$ – емкость фотодиода, $C_{\text{у}}$ – емкость предварительного усилителя, B – скорость передачи, In_2 , In_3 – интегралы Персона, $F_{\text{ПТ}}$ – шум-фактор полевого транзистора, q_m – крутизна полевого транзистора, K – коэффициент, характеризующий глубину интегрирования во входной цепи фотоприемника.

Применение данного метода позволяет получить выигрыш по чувствительности до 1,5 дБ по сравнению с усилением разностного сигнала двух последовательно включенных фотодиодов [1–А; 7–А – 11–А; 16–А].

Метод передачи и приема оптических сигналов с избирательным усилением оптической несущей основан на изменении спектра оптического сигнала, проиллюстрированного на рисунке 2.

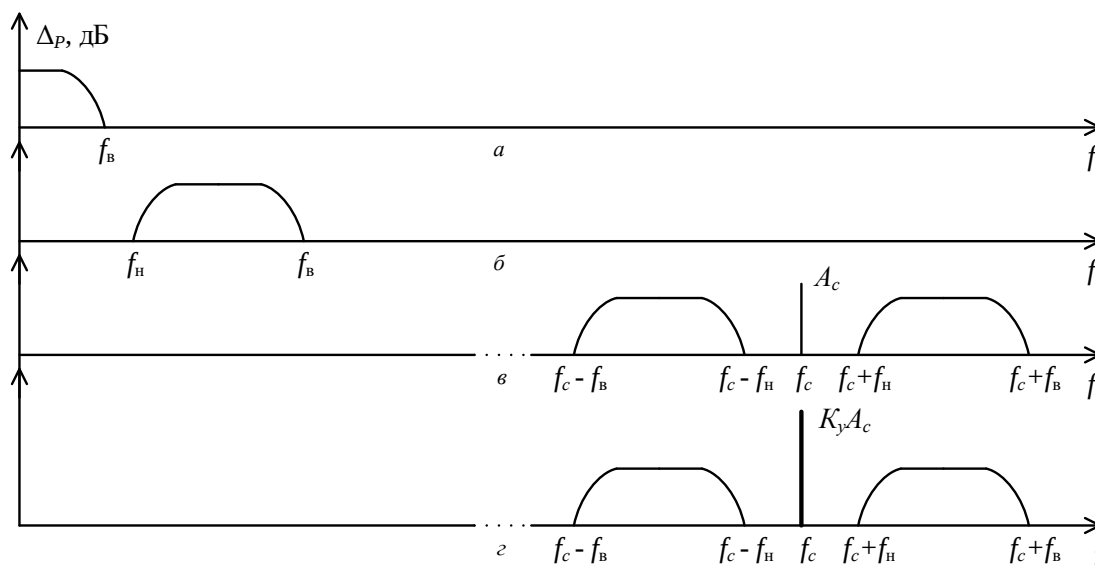


Рисунок 2 – Трансформация спектра оптического сигнала с усилением оптической несущей

Спектр оптического сигнала с модуляцией интенсивности представляет собой несущую и две боковые полосы. На передающей стороне необходимо спектр информационного сигнала (рисунок 2, а) сместить в область более высоких частот (рисунок 2, б), чтобы создать интервал между несущей и информационным сигналом. Это достигается применением линейного кодирования. Спектр модулированного оптического сигнала приведен на рисунке 2, в. На приемной стороне производится избирательное усиление несущей компоненты (рисунок 2, г). Для этих целей наилучшим образом подходит оптический усилитель на эффекте вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна, который обладает значительным коэффициентом усиления (порядка 30 дБ), и узкой полосой усиления (менее 100 МГц). Структурная схема системы передачи с использованием данного метода представлена на рисунке 3.

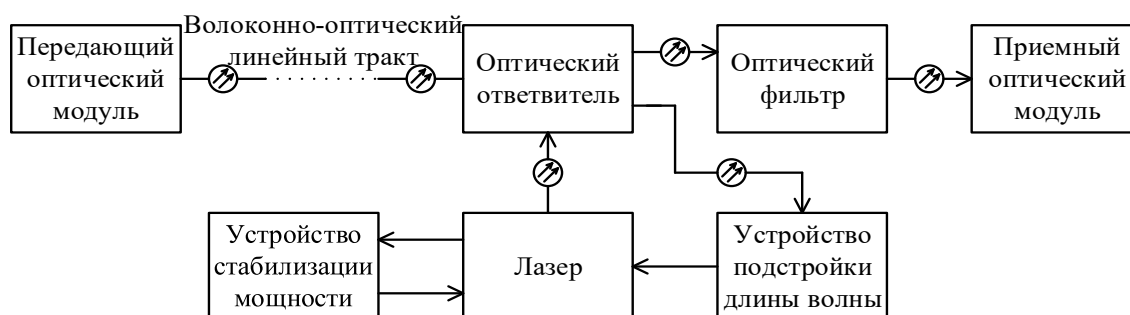


Рисунок 3 – Структурная схема системы передачи с избирательным усилением оптической несущей

Чувствительность приемного устройства по средней мощности при ограничении дробовым шумом усиленного несущего колебания определяется следующим выражением:

$$P_c = \frac{(S/N)h\nu B}{\eta K_{\text{МИ}}^2}$$

где S/N – отношение сигнал-шум, $K_{\text{МИ}}$ – коэффициент модуляции интенсивности.

Установлено, что при использовании данного метода чувствительность приемного устройства для коэффициента модуляции интенсивности $K_{\text{МИ}}=0,1$ и битовой скорости передачи 2,5 Гбит/с составляет –28,17 дБм а выигрыш по чувствительности составляет 6,64 дБ. Ограничением к применению данного метода является скорость передачи данных до 10 Гбит/с [З–А; 14–А].

Оценка влияния шума избирательного усилителя на прием оптических сигналов показала, что основными шумовыми составляющими являются дробовый шум и шум спонтанной эмиссии усилителя Мандельштама – Бриллюэна. Выражение для отношения сигнал-шум приемника с учетом шума спонтанной эмиссии имеет следующий вид:

$$S/N = \frac{(K_y P_c K_{\text{МИ}})^2 \left(\frac{\eta q}{h\nu} \right)^2}{2q \frac{\eta q}{h\nu} \frac{K_y^2 P_c}{2} B + P_{\text{ш.Б}}}$$

где K_y – коэффициент усиления оптического усилителя, P_c – мощность сигнала, $P_{\text{ш.Б}}$ – полная мощность шума спонтанной эмиссии от ВРМБ усиления.

Для достижения существенного коэффициента усиления необходимо увеличивать мощность накачки, что вызывает рост дробового шума и шума спонтанной эмиссии. Показано, что при некотором значении мощности накачки, дробовый шум становится преобладающим и влиянием остальных шумов можно пренебречь (рисунок 4).

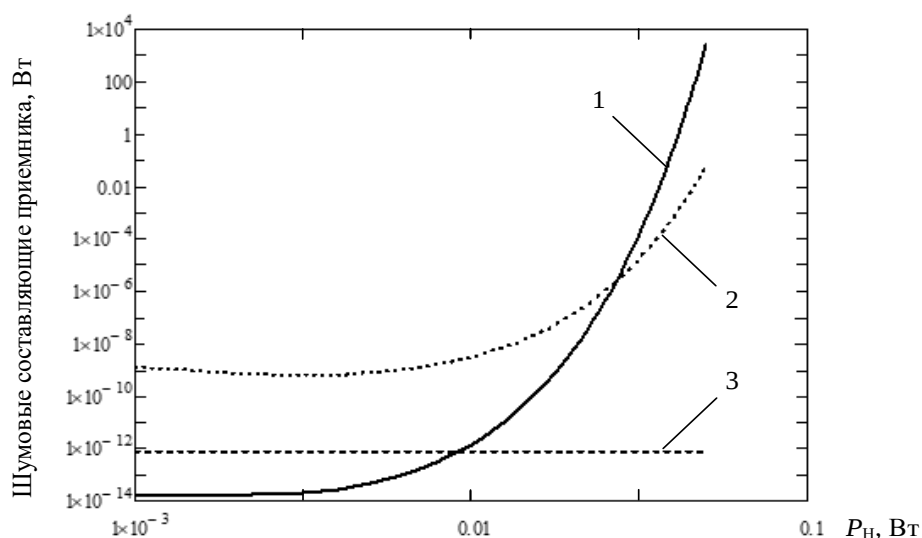


Рисунок 4 – Зависимость шумовых составляющих от мощности накачки

Значение мощности накачки, после которого дробовый шум превалирует, зависит от длины волны и ширины спектра излучения, скорости цифрового потока и типа используемого волокна. Для типичных параметров SMF волокна на длине волны 1550 нм, ширины спектра излучения 300 МГц и скорости цифрового потока 10 Гбит/с, значение мощности составило 26 мВт, что соответствует коэффициенту усиления 41,3 дБ [4–А].

Метод передачи и приема оптических сигналов с избирательным усилением пилот-сигнала основан на изменении спектра оптического сигнала, проиллюстрированного на рисунке 5.

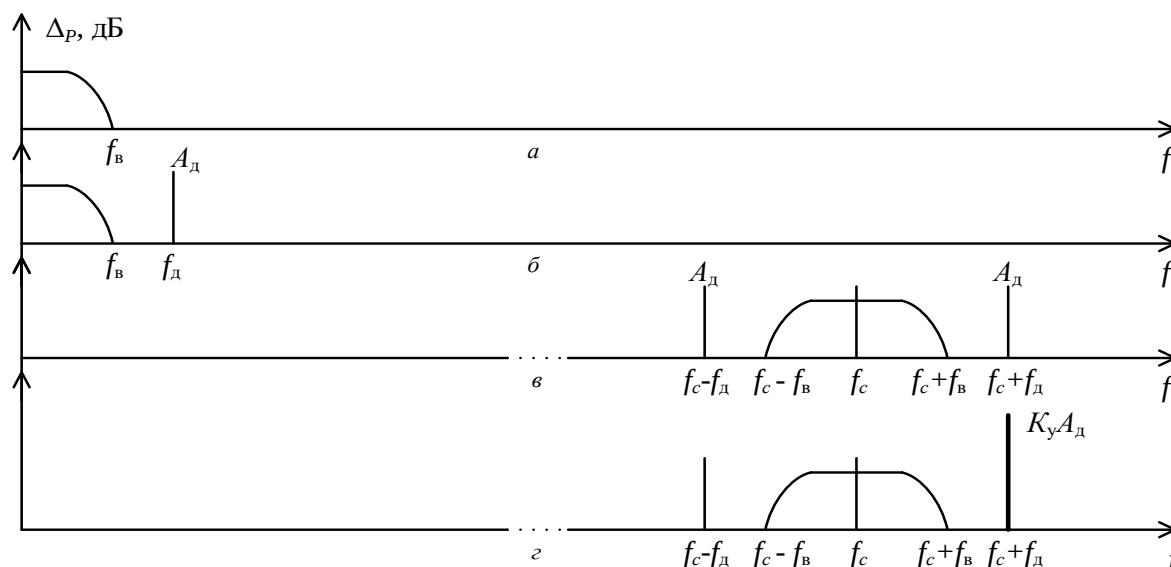


Рисунок 5 – Трансформация спектра оптического сигнала с усилением пилот-сигнала

В спектр информационного сигнала (рисунок 5, а) перед модуляцией оптической несущей вводится однотональный пилот-сигнал с частотой f_d , превышающей верхнюю частоту информационного сигнала (рисунок 5, б). В результате модуляции в спектре оптического сигнала помимо информационных составляющих появятся две дополнительные составляющие с частотами $f_c \pm f_d$, где f_c – частота несущего колебания (рисунок 5, в). В волокне со стороны приема при помощи распределенного усилителя Манделъштама – Бриллюэна производится избирательное усиление составляющей с частотой $f_c + f_d$ (рисунок 5, з). Сформированный таким образом сигнал подается на вход фотодетектора. Данный приемный оптический модуль функционирует по принципу гетеродина, а в качестве сигнала гетеродина выступает усиленная спектральная составляющая ($f_c + f_d$). Значительный коэффициент усиления усилителя Манделъштама – Бриллюэна позволяет получить существенное увеличение мощности спектральной составляющей. На выходе фотодетектора будет получен информационный сигнал на поднесущей частоте $f_{\Pi} = f_d$.

В данном решении частота лазера накачки усилителя не будет попадать в полосу информационного сигнала и будет равна $f_c + f_d + f_{бр}$, где $f_{бр}$ – частота смещения Бриллюэна, и поэтому этот метод может быть использован для любых скоростей передачи.

Выражение для чувствительности приемного модуля при ограничении дробовым шумом имеет следующий вид:

$$P_c = \frac{(S/N)h\nu 4B}{\eta K_{\text{МИ}}^2}$$

Установлено, что при использовании данного метода чувствительность приемного устройства для коэффициента модуляции интенсивности $K_{\text{МИ}}=0,1$ и битовой скорости передачи 10 Гбит/с составляет $-16,12$ дБм а выигрыш по чувствительности составляет 3,025 дБ. Данный метод не накладывает ограничения на эффективную ширину спектра сигнала [6–А; 15–А; 18–А].

В третьей главе приведено описание метода дуплексной одноволоконной передачи и приема без спектрального разделения с биимпульсным кодированием для повышения информационной эффективности ВОСП; метода когерентного (гомодинного) приема оптических сигналов с DP-QPSK модуляцией для повышения спектральной и энергетической эффективности ВОСП.

Метод дуплексной одноволоконной передачи и приема оптических сигналов без спектрального разделения с биимпульсным кодированием позволяет осуществлять встречную передачу оптических потоков по одноволоконному тракту без оптического разделения сигналов. Упрощенная структурная схема подобного тракта приведена на рисунке 6.

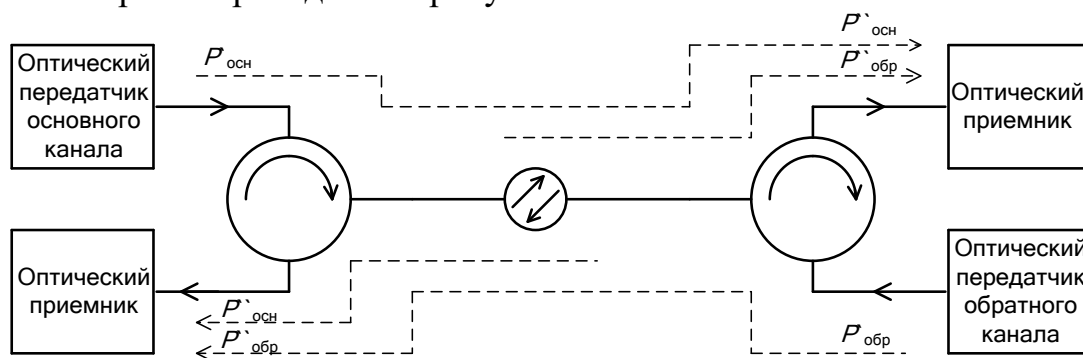


Рисунок 6 – Дуплексный одноволоконный оптический тракт

При такой организации на оптический приемник каждой стороны попадают два сигнала: основного канала $P''_{\text{осн}}$, и обратного $P''_{\text{обр}}$. Помимо сигнала удаленного передатчика, оптическим приемником детектируется некоторая часть сигнала собственного передатчика, приводящая к помехам обратного канала.

Показано, что использование когерентного метода приема существенно снижает влияние помехи обратного канала, т.к. позволяет исключить влияние постоянной составляющей помехи обратного рассеивания на встречный канал выбором соответствующего уровня гетеродина. Однако переменная составляющая помехи при этом растет. Учитывая эти факторы, отношение сигнал/шум приемника будет определяться выражением:

$$S / N = \frac{P_c \eta}{h\nu B + P_{\text{п}} \eta}$$

где $P_{\text{п}}$ – оптическая мощность обратно отраженной помехи.

Определено, что влияние помехи обратного рассеивания существенно лишь при низких скоростях передачи и уменьшается при повышении скорости передачи. Применение линейного биимпульсного кода позволяет практически полностью подавить влияние помехи обратного рассеивания [2–А].

Метод когерентного (гомодинного) приема оптических сигналов с DP-QPSK модуляцией позволяет повысить спектральную эффективность ВОСП за счет использования многоуровневой модуляции и поляризационного разнесения и энергетическую эффективность благодаря применению гомодинного приема и отдельного усиления сигналов четырех фотодиодов на выходе смесителя. Рассматриваемая структурная схема приемного модуля представлена на рисунке 7.

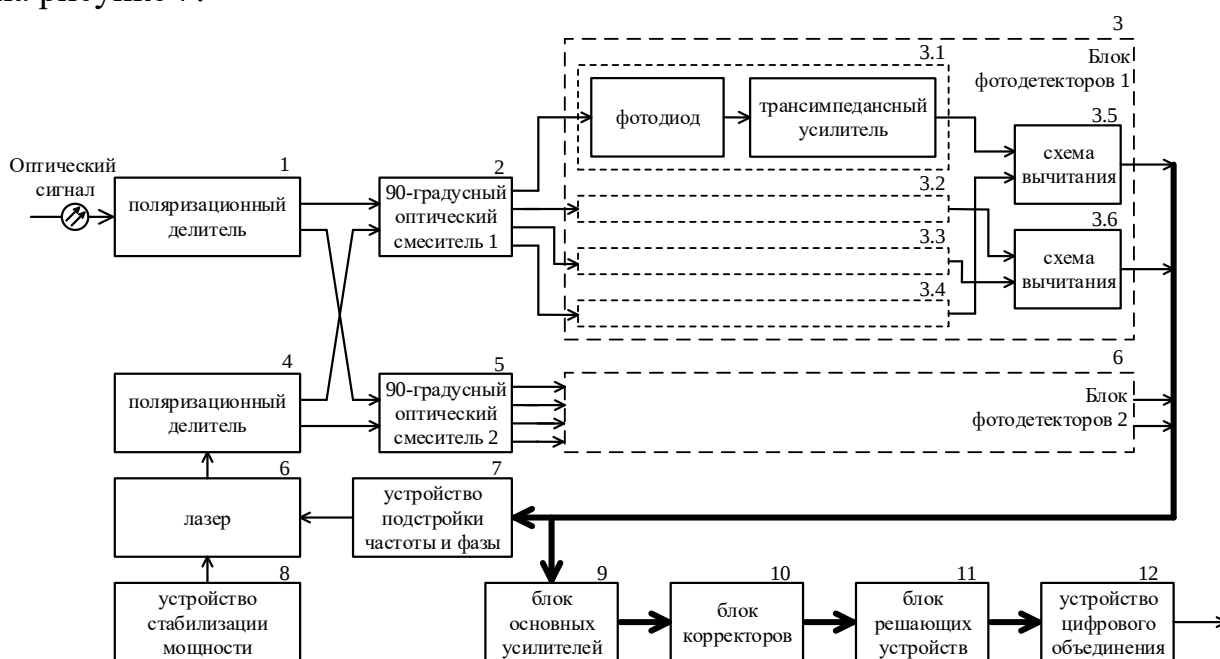


Рисунок 7 – Структурная схема приемного оптического модуля с модуляцией DP-QPSK и поляризационным разнесением

Поляризационный делитель пучка (1, 4) делит поступающий информационный сигнал на две поляризационные компоненты. 90-градусный оптический смеситель (2, 5) служит для смешивания информационного сигнала с непрерывным излучением местного лазера. Одна часть смешивается с опорным излучением, сдвинутым по фазе на 90 градусов, а вторая часть смешивается с опорным излучением без сдвига по фазе. Каждый из четырех смешанных сигналов детектируется блоком фотодетекторов. Блок фотодетекторов 1 состоит из фотодиодов с последующими трансимпедансными усилителями (3.1 – 3.4) и схем вычитания (3.5, 3.6). Блок фотодетекторов 2 аналогичен блоку фотодетекторов 1. Схема вычитания формирует четыре электрических сигнала I_x , Q_x , I_y , Q_y , соответствующие двум парам квадратурных компонент принятого сигнала (по две компоненты в каждой из ортогональных поляризаций). Четыре сигнала со схем вычитания поступают на блок основных усилителей (9). Решающее устройство (11) производит сравнение усиленного сигнала с

пороговым значением, тем самым, обеспечивая восстановление исходной последовательности сигнала. Устройство цифрового объединения (12) преобразует четыре цифровых потока в один высокоскоростной цифровой поток.

Формула для расчета чувствительности приемного модуля, дБм:

$$P_s = \frac{(S / N) h \nu \Delta f}{\eta}$$

где Δf – шумовая полоса приемника.

Показано, что для обеспечения отношения сигнал/шум = 16дБ, (вероятности ошибки не превышает 10^{-9}), рассчитанная чувствительность приемного модуля составила –50,984 дБм для скорости передачи 10 Гбит/с и вероятности ошибки 10^{-9} , что дает выигрыш по чувствительности до 1,5 дБ по сравнению с усилением разностного сигнала последовательно включенных фотодиодов [5–А; 12–А; 13–А; 17–А].

В четвертой главе разработаны и исследованы имитационные модели ВОСП, реализующие методы, предложенные в диссертационной работе. Моделирование производилось с помощью программного пакета OptiSystem компании OptiWave Inc, разработанного для проектирования, тестирования и оптимизации оптических систем телекоммуникаций на физическом уровне.

В процессе исследования имитационных моделей ВОСП были получены и проанализированы спектры оптических сигналов на входе фотодетектора; спектры электрических сигналов в различных точках приемных модулей; зависимости параметров сигналов от параметров приемных модулей; глаз-диаграммы электрических сигналов на выходе приемных оптических модулей.

Произведено моделирование ВОСП, использующей дифференциальную фазовую модуляцию, и реализующей метод самокогерентного приема оптических сигналов с дифференциальной фазовой модуляцией. Показано, что для битовой скорости передачи 10 Гбит/с выигрыш по чувствительности предлагаемого двухканального приемного модуля по сравнению с приемным модулем с использованием одного выходного порта интерферометра составил 1,6 дБ, а по сравнению с балансным приемным модулем выигрыш составил 0,8 дБ, что соответствует теоретическим расчетам [1–А].

В результате моделирования ВОСП, реализующей метод передачи и приема оптических сигналов, основанный на избирательном усилении оптической несущей на приеме, получены следующие результаты. Определен оптимальный уровень мощности лазера накачки волоконно-оптического усилителя для обеспечения минимального BER, который составил 0,91 мВт. Коэффициент усиления при этом составил 32,7 дБ. Получена чувствительность приемника, равная –40,3 дБм при коэффициенте модуляции интенсивности 0,8, скорости передачи 2,5 Гбит/с и коэффициенте битовых ошибок не хуже 10^{-9} .

Произведено моделирование ВОСП, реализующей метод передачи и приема оптических сигналов, основанный на введении в спектр сигнала дополнительной однотональной компоненты – пилот-сигнала и его усилении на приеме. Определено, что усиление, близкое к максимальному (около 30 дБ),

достигается при мощности лазера накачки около 2 дБм и при дальнейшем росте мощности увеличивается незначительно. Получена чувствительность приемника, равная $-26,3$ дБм при коэффициенте модуляции интенсивности 0,8, скорости передачи 10 Гбит/с и коэффициенте битовых ошибок не хуже 10^{-9} .

Произведено моделирование ВОСП, реализующей метод дуплексной одноволоконной передачи и приема оптических сигналов без спектрального разделения противонаправленных потоков с применением гетеродинного приема. Показано, что при использовании сигналов в коде NRZ на скоростях передачи 1 Гбит/с и 155 Мбит/с влияние помехи пренебрежимо мало, а существенное ухудшение чувствительности (на 18,9 дБ) отмечается только на скорости 2 Мбит/с. При применении кода RZ на скорости передачи 2 Мбит/с ухудшение чувствительности составило 0,59 дБ, а для 1 Гбит/с и 155 Мбит/с ухудшение чувствительности не отмечено. При применении кода ВІ-М ухудшение чувствительности приемного оптического модуля не наблюдается для любых скоростей передачи, что соответствует теоретическим исследованиям [2–А].

Произведено моделирование ВОСП, реализующей метод когерентного (гомодинного) приема сигналов с DP-QPSK модуляцией. Показано, для скорости передачи 10 Гбит/с (2,5 Гбод) и вероятности ошибки $8,84 \cdot 10^{-10}$, чувствительность приемного оптического модуля составила $-49,12$ дБм, что соответствует теоретическим исследованиям [5–А]. Приведена спектральная плотность оптического сигнала, которая демонстрирует уменьшение эффективной ширины спектра в 4 раза по сравнению с модуляцией интенсивности и дифференциальной фазовой модуляцией при сохранении скорости передачи данных (10 Гбит/с).

В **приложении А** приведен вывод аналитического выражения мощности шума приемного оптического модуля с р-і-п-фотодетектором и полевым транзистором на входе. В **приложении Б** приведен пример расчета выигрыша по чувствительности двухканального приемного модуля для ВОСП с DPSK модуляцией. В **приложении В** приведены численные результаты имитационного моделирования ВОСП с узкополосным усилением пилот-сигнала. В **приложении Г** приведены численные результаты имитационного моделирования ВОСП с использованием дифференциальной фазовой модуляции. В **приложении Д** приведены численные результаты имитационного моделирования ВОСП с DP-QPSK модуляцией. В **приложениях Е и Ж** приведены акты о практическом использовании результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1 Для повышения энергетической эффективности ВОСП разработан метод самокогерентного приема оптических сигналов с дифференциальной фазовой модуляцией, основанный на использовании интерферометра Маха-Цандера для преобразования дифференциальной фазовой модуляции в модуляцию

интенсивности, отличающийся отдельным усилением сигналов двух фотодиодов на выходе интерферометра с их последующим сравнением в решающем устройстве. Показано, что мощность шумового тока для такой схемы включения и случая, когда емкость фотодиода существенно превышает входную емкость усилителя уменьшается в два раза по сравнению с усилением разностного сигнала двух параллельно включенных фотодиодов, что приводит к повышению чувствительности приемника на величину до 1,5 дБ по сравнению с известной схемой включения фотодиодов [1–А; 7–А – 11–А; 16–А].

2 Для повышения энергетической эффективности ВОСП разработан метод передачи и приема оптических сигналов, основанный на модуляции интенсивности на передающей стороне и усилении оптической несущей на приемной стороне, отличающийся использованием узкополосного оптического усилителя Манделштама-Бриллюэна для усиления несущей и дополнительным линейным кодированием передаваемого сигнала для формирования защитного интервала между информационными составляющими и несущей в процессе модуляции. Установлено, что увеличение уровня несущей по отношению к информационным составляющим обеспечивает повышение коэффициента преобразования информационных составляющих в фотодетекторе с квадратичной характеристикой и достижение выигрыша по чувствительности до 6,64 дБ для скорости передачи 2,5 Гбит/с и вероятности ошибки 10^{-9} по сравнению с методом прямого фотодетектирования без усиления несущей. Показано, что предельная скорость передачи для данного метода определяется частотой смещения Бриллюэна и ограничена величиной 10 Гбит/с [3–А; 4–А; 14–А].

3 Для повышения энергетической эффективности ВОСП разработан метод передачи и приема оптических сигналов, отличающийся введением в спектр передаваемого сигнала дополнительной однотональной компоненты – пилот-сигнала и его избирательном усилении при помощи узкополосного оптического усилителя Манделштама-Бриллюэна на приемной стороне. Показано, что увеличение уровня спектральной компоненты пилот-сигнала за счет его избирательного усиления в узкополосном оптическом усилителе Манделштама-Бриллюэна приводит к повышению коэффициента преобразования информационных составляющих в фотодетекторе с квадратичной характеристикой с увеличением чувствительности приемника до 3 дБ при скорости передачи 10 Гбит/с и вероятности ошибки 10^{-9} [6–А; 15–А; 18–А].

4 Для повышения информационной эффективности ВОСП разработан метод дуплексной одноволоконной передачи и приема оптических сигналов без спектрального разделения встречных потоков, отличающийся применением гетеродинного приема и биимпульсного линейного кодирования на передаче, позволяющий обеспечить дуплексную передачу с увеличением объема передаваемых данных в 2 раза без ухудшения отношения сигнал-шум. Показано, что снижение влияние дробового шума помехи обратного канала достигается за счет использования гетеродинного метода приема в сочетании с биимпульсным линейным кодированием, обеспечивающим смещение спектра сигнала в высокочастотную область и уменьшение влияние помехи обратного

рассеивания, мощность которой обратно пропорциональна частотной расстройке [2–А].

5 Для одновременного повышения информационной и энергетической эффективности ВОСП разработан метод когерентного (гомодинного) приема оптических сигналов с квадратурной фазовой модуляцией и поляризационным разделением, основанный на использовании 90-градусного оптического смесителя для смешения принимаемого оптического сигнала с опорным излучением и определения значения фазы принимаемого сигнала, отличающийся раздельным усилением сигналов четырех фотодиодов на выходе смесителя с их последующим попарным сравнением в решающем устройстве. Установлено, что использование гомодинного приема и раздельного усиления сигналов четырех фотодиодов на выходе смесителя в методе когерентного (гомодинного) приема оптических сигналов с квадратурной фазовой модуляцией и поляризационным разделением обеспечивает повышение чувствительности приемного устройства до -51 дБм при скорости передачи 10 Гбит/с и вероятности ошибки 10^{-9} [5–А; 12–А; 13–А; 17–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Применение метода самокогерентного приема оптических сигналов с дифференциальной фазовой модуляцией, метода передачи и приема оптических сигналов, основанного на усилении оптической несущей на приемной стороне, метода передачи и приема оптических сигналов, отличающегося введением в спектр передаваемого сигнала дополнительной однотоновой компоненты – пилот-сигнала и его избирательном усилении при помощи узкополосного оптического усилителя Мандельштама-Бриллюэна на приемной стороне позволяет повысить чувствительность приемного оптического модуля, что приводит к значительному увеличению регенерационного участка без применения широкополосных оптических усилителей.

Применение метода дуплексной одноволоконной передачи без спектрального разделения встречных потоков, основанного на гетеродинном приеме, позволяет организовать передачу информации во встречных направлениях по одному оптическому волокну, что существенно снижает материальные затраты на формирование кабельной инфраструктуры.

Использование метода гомодинного приема оптических сигналов с DP-QPSK модуляцией позволяет повысить чувствительность приемного устройства и сократить ширину спектра оптического сигнала, что повышает дальность связи и увеличивает суммарную скорость передачи в системах с волновым мультиплексированием.

Метод увеличения уровня оптической несущей на приеме при помощи распределенного волоконного усилителя Мандельштама – Бриллюэна может быть применен для усовершенствования лидарных систем дистанционного обнаружения и измерения концентрации газов. Использование данного метода позволяет получить усиление принимаемого оптического сигнала на величину порядка 30 дБ, что существенно увеличивает дальность дистанционного зондирования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1–А. Урядов, В.Н. Эффективность двухканального оптического приемника сигналов с дифференциальной фазовой модуляцией / В.Н. Урядов, Я.В. Рощупкин, В.Ю. Бунас, В.В. Урядов // Доклады БГУИР. – 2014. – № 4 (82). – С. 5–10.

2–А. Урядов, В.Н. Подавление влияния встречных каналов в дуплексных одноволоконных ВОСП без оптического разделения / В.Н. Урядов, Я.В. Рощупкин, В.Ю. Бунас, А.С. Зеленин // Доклады БГУИР. – 2015. – № 3 (89). – С. 58–63.

3–А. Урядов, В.Н. Трансформация спектра оптического сигнала для повышения эффективности приема в волоконно-оптических системах передачи / В.Н. Урядов, Я.В. Рощупкин, В.Ю. Бунас, А.С. Зеленин // Доклады БГУИР. – 2015. – № 8 (94). – С. 11–16.

4–А. Урядов, В.Н. Влияние шума предусилителя вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна на прием сигналов с трансформированным спектром / В.Н. Урядов, Я.В. Рощупкин, В.Ю. Бунас, А.С. Зеленин // Доклады БГУИР. – 2016. – № 4 (98). – С. 10–14.

5–А. Урядов, В.Н. Обработка сигналов DP-QPSK модуляции в приемном устройстве волоконно-оптической системы передачи / В.Н. Урядов, А.С. Зеленин, Я.В. Рощупкин, Д.Н. Курбыко, М.Л. Пшенник // Доклады БГУИР. – 2016. – № 7 (101). – С. 135–139.

6–А. Урядов, В.Н. Трансформация спектра оптического сигнала при реализации гетеродинного приема в ВОСП / В.Н. Урядов, Я.В. Рощупкин, А.С. Зеленин, С.А. Лукашевич // Электросвязь. – 2018. – № 9. – С. 61–66.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

7–А. Урядов, В.Н. Эффективность применения дифференциальной фазовой модуляции (DPSK) в волоконно-оптических системах передачи / В.Н. Урядов, Я.В. Рощупкин // Технические средства защиты информации. Материалы докладов и краткие сообщения VI Белорусско-российской НТК, Минск, 21-22 мая 2008 г. / БГУИР. – Минск, 2008. – С. 52.

8–А. Урядов, В.Н. Применение новых форматов модуляции в ВОСП для повышения скрытности передаваемой информации / В.Н. Урядов, Я.В. Рощупкин // Технические средства защиты информации. Материалы докладов и краткие сообщения VI Белорусско-российской НТК, Минск, 21-22 мая 2008 г. / БГУИР. – Минск, 2008. – С. 53.

9–А. Урядов, В.Н. Методы приема оптических сигналов с дифференциальной фазовой модуляцией (DPSK) / В.Н. Урядов, Я.В. Рощупкин // Современные средства связи: Материалы XIII международной НТК, Минск, 7-9 октября 2008 г./ ВГКС. – Минск, 2008. – С. 44-45.

10–А. Урядов, В.Н. Способ увеличения чувствительности балансного приемника в ВОСП с DPSK модуляцией / В.Н. Урядов, Я.В. Рощупкин // Технические средства защиты информации. Материалы VII Белорусско-российской НТК, Минск, 23-24 июня 2009 г. / БГУИР. – Минск, 2009. – С. 70.

11–А. Рощупкин, Я.В. Двухканальный балансный оптический приемник для систем с дифференциальной фазовой модуляцией / Я.В. Рощупкин, В.Ю. Бунас // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций "РТ - 2010": материалы 6-ой международной молодежной НТК, Севастополь, 19-24 апреля 2010 г. / СевНТУ. – Севастополь, 2010. – С. 69.

12–А. Урядов, В.Н. Применение высокочувствительных методов приема для увеличения защищенности информации в оптических системах передачи / В.Н. Урядов, Я.В. Рощупкин // Технические средства защиты информации. Материалы VIII Белорусско-российской НТК, Браслав, 24-28 мая 2010 г. / БГУИР. – Минск, 2010. – С. 32.

13–А. Урядов, В.Н. Квадратурная фазовая модуляция в оптических сетях телекоммуникаций / В.Н. Урядов, Я.В. Рощупкин // Современные средства связи: Материалы XV международной НТК, Минск, 28-30 сентября 2010 г. / ВГКС. – Минск, 2010. – С. 42-43.

14–А. Рощупкин, Я.В. Усиление оптической несущей для повышения эффективности приема в волоконно-оптических системах передачи / Технологии передачи и обработки информации: материалы Международного научно-технического семинара, Минск, март – апрель 2023 г. / БГУИР. – Минск, 2023. – С. 78-84.

15–А. Рощупкин, Я.В. Применение пилот-сигнала для повышения энергетической эффективности волоконно-оптических систем передачи / Технологии передачи и обработки информации: материалы Международного научно-технического семинара, Минск, апрель 2025 г. / БГУИР. – Минск, 2025. – С. 34-39.

Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций

16–А. Урядов, В.Н. Использование Q-фактора при оценке вероятности ошибки балансного DPSK-приемника / В.Н. Урядов, Я.В. Рощупкин // Международная научно-техническая конференция, посвященная 45-летию МРТИ - БГУИР: тезисы докладов Международной НТК, Минск, 19 марта 2009 г. / БГУИР. – Минск, 2009. – С. 59-60.

17–А. Рощупкин, Я.В. Метод противодействия утечке информации в волоконно-оптических системах передачи / Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: Тезисы докладов Международного научно-технического семинара, Браслав, 20–24 сентября 2010 г. / БГУИР. – Минск, 2010. – С. 25.

Патенты

18–А. Волоконно-оптическая система передачи данных с узкополосным усилением пилот-сигнала: пат. ВУ 13576 / Я.В. Рощупкин. – Опубл. 20.10.2024.



РЭЗІЮМЭ

Рошчупкін Якаў Віктаравіч

Кагерэнтны і самакагерэнтны прыём двух- і шматпазіцыйных сігналаў у валаконна-аптычных сістэмах перадачы

Ключавыя словы: валаконна-аптычная сістэма перадачы, прыёмны аптычны модуль, кагерэнтны прыём, аптычны ўзмацняльнік, адчувальнасць прыёмнай прылады

Мэта працы: павышэнне эфектыўнасці (энергетычнай, спектральнай, інфармацыйнай) ВОСП за кошт паляпшэння структуры і параметраў перадаюць і прыёмных прылад.

Метады даследавання: тэорыя перадачы і апрацоўкі сігналаў, аналітычныя і лікавыя метады мадэлявання.

Выкарыстаная апаратура: ПЭВМ з праграмным пакетам мадэліравання аптычных сістэм тэлекамунікацый OptiSystem і пакетам Mathcad.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: Для павышэння энергетычнай эфектыўнасці двухвалаконных ВОСП распрацаваны наступныя метады: метады самакагерэнтнага прыёму аптычных сігналаў з дыферэнцыяльнай фазавай мадуляцыяй які адрозніваецца паасобным узмацненнем сігналаў двух фотадыёдаў на выхадзе інтэрферометра; метады перадачы і прыёму аптычных сігналаў, заснаваны на ўзмацненні аптычнай апорнай на прыёмным баку; метады перадачы і прыёму аптычных сігналаў, заснаваны на ўвядзенні ў спектр дадатковай аднатанальнай кампаненты – пілот-сігналу і яго ўзмацненні на прыёме, якія дазваляюць атрымаць выйгрыш па адчувальнасці прыёмнай прылады 1,5 дБ, 6,64 дБ і 3 дБ адпаведна, без змены хуткасці перадачы даных. Для павышэння інфармацыйнай эфектыўнасці прапанаваны метады дуплекснай аднавалаконнай перадачы без спектральнага падзелу сустрэчных патокаў, заснаваны на гетэрадынным прыёме, які дазваляе павялічыць у 2 разы хуткасць перадачы даных пры захаванні значэння адносіны сігнал-шум у канале і шырыні спектру сігналу за кошт сустрэчнай перадачы і лінейнага біімпульснага кадавання. Для павышэння інфармацыйнай і энергетычнай эфектыўнасцяў прапанаваны метады гомодыннага прыёму аптычных сігналаў з DP-QPSK мадуляцыяй, які дазваляе павысіць адчувальнасць прыёмнай прылады да -51 дБм і скараціць у 4 разы шырыню спектру аптычнага сігналу.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: распрацаваныя метады могуць быць выкарыстаны пры пабудове магістральных і зонавых сетак тэлекамунікацый для павелічэння даўжыні рэгенерацыйнага ўчастка без прымянення аптычных узмацняльнікаў і для павелічэння далёкасці сувязі.

Вобласць ужывання: валаконна-аптычныя сістэмы перадачы.

РЕЗЮМЕ

Рощупкин Яков Викторович

Когерентный и самокогерентный прием двух- и многопозиционных сигналов в волоконно-оптических системах передачи

Ключевые слова: волоконно-оптическая система передачи, приемный оптический модуль, когерентный прием, оптический усилитель, чувствительность приемного устройства

Цель работы: повышение эффективности (энергетической, спектральной, информационной) ВОСП за счет улучшения структуры и параметров передающих и приемных устройств.

Методы исследования: теория передачи и обработки сигналов, аналитические и численные методы моделирования.

Использованная аппаратура: ПЭВМ с программным пакетом моделирования оптических систем телекоммуникаций OptiSystem и пакетом Mathcad.

Полученные результаты и их новизна: Для повышения энергетической эффективности ВОСП разработаны следующие методы: метод самокогерентного приема оптических сигналов с дифференциальной фазовой модуляцией отличающийся раздельным усилением сигналов двух фотодиодов на выходе интерферометра; метод передачи и приема оптических сигналов, основанный на усилении оптической несущей на приемной стороне; метод передачи и приема оптических сигналов, основанный на введении в спектр дополнительной однотональной компоненты – пилот-сигнала и его усилении на приеме, позволяющие получить выигрыш по чувствительности приемного устройства 1,5 дБ, 6,64 дБ и 3 дБ соответственно, без изменения скорости передачи данных. Для повышения информационной эффективности предложен метод дуплексной одноволоконной передачи без спектрального разделения встречных потоков, основанный на гетеродинном приеме, позволяющий увеличить в 2 раза скорость передачи данных при сохранении значения отношения сигнал-шум в канале и ширины спектра сигнала за счет встречной передачи и линейного биимпульсного кодирования. Для повышения информационной и энергетической эффективности предложен метод гомодинного приема оптических сигналов с DP-QPSK модуляцией, позволяющий повысить чувствительность приемного устройства до -51 дБм и сократить в 4 раза ширину спектра оптического сигнала.

Рекомендации по использованию: разработанные методы могут быть использованы при построении магистральных и зонных сетей телекоммуникаций для увеличения длины регенерационного участка без применения оптических усилителей и для увеличения дальности связи.

Область применения: волоконно-оптические системы передачи.

SUMMARY

Roshchupkin Yakov Viktorovich

Coherent and self-coherent reception of two- and multi-position signals in fiber-optic transmission systems

Keywords: fiber-optic communication system, optical receiver, coherent detection, optical amplifier, sensitivity of the receiver.

Purpose of the work: Increasing the efficiency (energy, spectral, information) of the fiber-optic communication system by improving the structure and parameters of transmitting and receiving devices.

Research methods: theory of signal transmission and processing, analytical and computational research methods.

Used equipment: PC with a software package for simulating optical telecommunication systems OptiSystem and the Mathcad package.

The results obtained and their novelty: To increase the energy efficiency of FOTS, the following methods have been developed: a method of self-coherent detection of optical signals with differential phase modulation characterized by separate amplification of the signals of two photodiodes at the interferometer output; a method of transmitting and receiving optical signals based on amplification of the optical carrier at the receiving end; a method of transmitting and receiving optical signals, based on the inclusion in the spectrum an additional single-tone component - the pilot-signal and its amplification at the receiver end, which have an improvement in the receiver sensitivity 1.5 dB, 6.64 dB and 3 dB, respectively, without changing the data rate. To increase the information efficiency, a method of duplex single-fiber transmission without spectral separation of oncoming signals, based on heterodyne detection, is proposed, which makes it possible to increase the data rate by 2 times while maintaining the value of the signal-to-noise ratio in the channel and the signal bandwidth due to counter propagation and line bi-pulse coding. To increase information and energy efficiency, the method of homodyne detection of optical signals with DP-QPSK modulation is proposed, which makes it possible to increase the receiver sensitivity to -51 dBm and 4 times reduce the optical signal bandwidth.

Recommendations for use: the developed methods can be used in the construction of backbone and zonal telecommunication networks to increase the length of the regeneration section without the use of optical amplifiers and to increase the communication distance.

Scope: fiber-optic communication systems.

Научное издание

**Рощупкин
Яков Викторович**

**КОГЕРЕНТНЫЙ И САМОКОГЕРЕНТНЫЙ ПРИЕМ ДВУХ- И
МНОГОПОЗИЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В ВОЛОКОННО-
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства
телекоммуникаций**

Подписано в печать 03.09.2026. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Опечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч. изд. л. 1,5. Тираж 60 экз. Заказ 178.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск.