

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И. Сатпаева»

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра электроники, телекоммуникации и космических технологий

Сағынай Сағи Болатұлы

«Исследование реконфигурируемого оптического мультиплексора с вводом и выводом
для применения в системах телекоммуникации»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7M06202 – Телекоммуникация

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени
К.И. Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра электроники, телекоммуникации и космических технологий

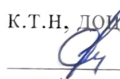
УДК 665.622.43.046.6-52 (043)

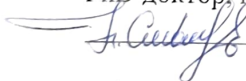
На правах рукописи

Сағынай Сағи Болатұлы

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
На соискание академической степени магистра

Название диссертации Исследование реконфигурируемого оптического
мультиплексора с зводом и выводом для применения в
системах телекоммуникации
Направление подготовки 7М06202 – Телекоммуникация

Рецензент
к.т.н., доцент АУЭС
 Ермекбаев М.М.
« 14 » 01 2025 г.

Научный руководитель
PhD доктор, профессор
 Смайлов Н.К.
« 14 » 01 2025 г.

Нормоконтроль
Преподаватель каф. ЭТиКТ, м.т.н.
 Кенгесбаева С.С.
« 9 » 01 2025 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ЭТиКТ
к.т.н., ассоциированный профессор
Е. Таштай
« 14 » 01 2025 г.



Алматы 2025

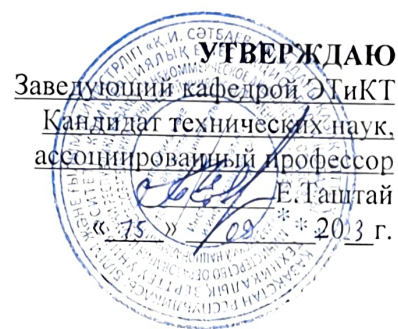
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени
К.И. Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра электроники, телекоммуникации и космических технологий

7M06202 – Телекоммуникация



ЗАДАНИЕ
на выполнение магистерской диссертации

Обучающемуся Сагынай Саги Болатұлы

Тема диссертации: «Исследование реконфигурируемого оптического мультиплексора с вводом и выводом для применения в системах телекоммуникации»

Срок сдачи законченной диссертации: «13» 12 2024г.

Исходные данные к магистерской диссертации: Поставленные цели и задачи диссертационной работы обуславливают оптимизацию пропускной способности оптической мультиплексорной сети.

Перечень вопросов, рассмотренных в диссертационной работе: а) Изучение характеристик мультиплексорных технологий. Свойства объединения оптических сигналов. Исследование технологий SDH и DWDM. б) исследование характеристик и компонентов реконфигурируемого оптического мультиплексора с вводом и выводом; в) проведение рефлектометрического анализа оптической линии на предмет километрового затухания; г) расчет бюджета мощности для сети ROADM.

Рекомендуемая основная литература:

1 T. Ye, J. Luo, H. Li and Y. Yao, "Design of Large-Scale OXC for the Next-Generation ROADM, Incheon, Korea, Republic of, 2024, pp. 1-6.

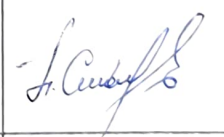
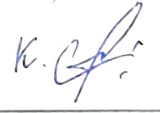
2 Pravesh Kumar Chaudhary, Ravi Kumar, Sumit Kaushik, "Review Paper on DWDM Technology", volume 8, issue 12 (2018).

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Сбор данных	15.09.2023 _г – 14.01.2024 _г	Выполнено
Исследование существующих технологии оптического мультиплексирования, их преимуществ и недостатков.	14.01.2024 _г – 14.06.2024 _г	Выполнено
Осмотр характеристик и параметров ROADМ мультиплексора и его компонентов. Выбор оптимальной архитектуры мультиплексорной сети.	14.06.2024 _г – 17.09.2024 _г	Выполнено
Проведение рефлектометрического измерения параметров оптоволоконной сети. Расчет бюджета мощности.	17.09.2024 _г – 9.12.2024 _г	Выполнено

Подписи

Консультантов и нормконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов работ

Раздел	Консультант, (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Анализ темы диссертационной работы	PhD доктор, профессор кафедры ЭТиКТ Смайлов Н.К.	14.01.24	
Теоритическая информация и практический раздел	PhD доктор, профессор кафедры ЭТиКТ Смайлов Н.К.	9.12.24	
Стандартизация/нормоконтроль	Преподаватель каф. ЭТиКТ, м.т.н. Кенгесбаева С.С.	9.1.25г.	

Научный руководитель



Н.К. Смайлов

Задание принял к исполнению магистрант



С.Б. Сагынай

Дата

« 15 » 09 2023 г.

АННОТАЦИЯ

В последнее время с развитием информационных технологий появилась повышенный спрос на технологии обеспечения скоростной передачи информации. Помимо способов обработки, маршрутизации, коммутации стоит острая необходимость мультиплексирования каналов для экономии физической среды сигнала и повышения скорости передачи.

В работе рассматривается современная и перспективная технология мультиплексирования по длине волны, и методы его развития.

Произведен обзор компонентов реконфигурируемого оптического мультиплексора ввода и вывода.

Выполнен экспериментальный анализ состояния оптического волокна искусственной линии с помощью рефлектометра MTS 8000.

Произведен расчет бюджета оптической мощности и дизайн архитектуры для компонентов сети ROADM.

АНДАТПА

Жақында ақпараттық технологиялардың дамуымен ақпараттың жылдам берілуін қамтамасыз ету технологияларына сұраныстың артуы байқалды. Өңдеу, маршруттау, коммутация әдістерінен басқа, сигналдың физикалық ортасын үнемдеу және беру жылдамдығын арттыру үшін арналарды мультиплекстеудің шұғыл қажеттілігі туындайды.

Жұмыста толқын ұзындығы бойынша мультиплекстеудің заманауи және перспективалы технологиясы және оны дамыту әдістері қарастырылған.

Қайта конфигурацияланатын оптикалық енгізу және шығару мультиплексорының компоненттеріне шолу жасалды.

MTS 8000 рефлектометрiнiң көмегімен жасанды сызықтың оптикалық талшығының күйіне эксперименттік талдау жасалды.

ROADM желісінің компоненттері үшін оптикалық қуат бюджеті және архитектуралық дизайн есептелді.

ANNOTATION

Recently, with the development of information technology, there has been an increased demand for high-speed information transfer technologies. In addition to processing, routing, and switching methods, there is an urgent need for multiplexing channels to save the physical signal environment and increase transmission speed.

The paper considers the modern and promising technology of wavelength multiplexing, and methods of its development.

The components of a reconfigurable optical input and output multiplexer are reviewed.

An experimental analysis of the state of the optical fiber of an artificial line was performed using an MTS 8000 reflectometer.

The optical power budget and architectural design were calculated for ROADM network components.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Технология оптического мультиплексирования	8
1.1 Разновидности технологии мультиплексирования по принципу работы	8
1.2 Технология синхронной цифровой иерархии (SDH) для оптических сигналов	8
1.3 Технология мультиплексирования по длине волны для оптического сигнала	11
1.4 Обзор длин волн светового сигнала для передачи информации с помощью мультиплексирования по длине волны	13
1.5 Принцип работы плотного мультиплексирования по длине волны для оптического сигнала	16
2 Реконфигурируемый оптический мультиплексор ввода и вывода ROADM и его компоненты	19
2.1 Обзор принципа работы реконфигурируемого оптического мультиплексора ввода и вывода (ROADM)	19
2.2 Оптоволокно для физической среды передачи	26
2.3 Оборудование для ввода, вывода, мультиплексирования и демультимплексирования оптических каналов	31
2.4 Плата транспондера для преобразования длины волны	34
2.5 Оптический усилитель мощности сигнала	38
2.6 Селективный переключатель длины волны (WSS)	42
3 Рефлектометрический анализ и расчет бюджета мощности оптической линии	47
3.1 Рефлектометрический анализ оптического волокна. Расчет вносимого затухания для оптического сигнала	47
3.2 Расчет бюджета мощности для ROADM сети	51
3.3 Расчет необходимого мощности исходящего сигнала для каждого канала	54
3.4 Подбор необходимых компонентов и дизайн сети для компенсации дисперсии, затухания в сети roadm	57
Заключение	59
Список использованной литературы	60

ВВЕДЕНИЕ

Современные телекоммуникационные сети требуют высокой гибкости и масштабируемости для эффективного удовлетворения растущих потребностей в передаче данных. Одним из ключевых компонентов таких сетей является оптический мультиплексор, обеспечивающий эффективное распределение и управление широкополосными сигналами через оптоволоконные каналы связи. В условиях быстрого развития технологий и увеличения объемов передаваемой информации возникает необходимость в устройствах, которые могут адаптироваться к изменениям в требованиях сетевой инфраструктуры и оптимизировать использование ресурсов.

Цели и задачи данной работы направлены на исследование конструкции и функциональных возможностей реконфигурируемого оптического мультиплексора с вводом и выводом для использования в телекоммуникационных системах. Необходимо провести анализ принципов работы и существующих технологий создания подобных устройств, выявить их преимущества и ограничения. В рамках работы следует рассчитать энергетическую мощность мультиплексора, позволяющую оптимизировать его параметры для повышения эффективности передачи данных. Целью данной диссертации является исследование и расчет характеристик концепции реконфигурируемого оптического мультиплексора ввода-вывода, а также его оптимизация для применения в телекоммуникационных системах. В работе будут рассмотрены теоретические основы работы оптических мультиплексоров, методы их реконфигурации, а также методы повышения их производительности и надежности.

Актуальность данного исследования характеризуется стремительным ростом потребности в высокоскоростной передаче информации. Развитие технологии мультиплексирования открывает новые возможности и методы усовершенствования существующих DWDM мультиплексоров. На текущий момент существуют множество видов оптических мультиплексоров ввода и вывода, но методы регулирования и оптической коммутации являются перспективным развитием OADM мультиплексоров. Мультиплексоры с применением ROADM технологии смогут повысить эффективность систем передачи связи. В данной работе исследуется и проектируется модель оптической платы способная получить такие возможности.

Научная новизна работы заключается в предложении использования рефлектометрического анализа при расчетах бюджета мощности, исследования возможности использования передовых технологии усилителей, компенсаторов дисперсии для адаптации к динамичным изменениям в телекоммуникационных потоках и нагрузках. Также будут разработаны рекомендации по оптимизации их применения в высокоскоростных и высоконагруженных сетевых инфраструктурах.

1 Технология оптического мультиплексирования

1.1 Разновидности технологии мультиплексирования каналов связи по принципу работы

С развитием технологий и возрастающей потребностью в передаче огромных объемов данных современные коммуникационные сети требуют высокой пропускной способности и эффективности. Одной из ключевых технологий, позволивших значительно увеличить пропускную способность в оптических сетях, стали оптические мультиплексоры. Оптические мультиплексоры позволяют объединить несколько каналов передачи данных в одном оптическом волокне, что делает их неотъемлемой частью высокоскоростных сетей и магистральных каналов связи. В данной статье рассмотрим принципы работы оптических мультиплексоров, их основные виды, архитектуру и применение.

Оптический мультиплексор это устройство, позволяющее объединять несколько оптических сигналов различной длины волны и передавать их по одному волоконно-оптическому кабелю. Сигналы, передаваемые по разным каналам, не смешиваются, поскольку для каждого из них используется своя длина волны света. На стороне приемника оптический демультиплексор разделяет сигналы обратно на отдельные каналы, возвращая их к исходной длине волны для дальнейшей обработки.

Наиболее распространенные технологии мультиплексирования включают:

- Мультиплексирование по синхронной цифровой иерархии (SDH, от англ. Synchronous Digital Hierarchy);
- Мультиплексирование с разделением по длине волны (Wavelength Division Multiplexing, WDM);
- Плотное мультиплексирование с разделением по длине волны (Dense WDM, DWDM);
- Грубое мультиплексирование с разделением по длине волны (Coarse WDM, CWDM).

1.2 Технология синхронной цифровой иерархии (SDH) для мультиплексирования оптических сигналов

С развитием информационно-коммуникационных технологий возникла потребность в высокопроизводительных и надежных системах передачи данных. Синхронная цифровая иерархия (SDH, от англ. Synchronous Digital Hierarchy) стала одной из ключевых технологий, обеспечивающих высокую пропускную способность и масштабируемость современных телекоммуникационных сетей. Основные преимущества SDH — это гибкость, совместимость с различными видами оборудования и простота

интеграции с другими протоколами и стандартами. SDH разработана для стандартизации методов передачи данных и, благодаря этому, широко используется в глобальных сетях связи [1].

SDH разработана для предоставления синхронизированной сети, способной передавать информацию с высокой точностью и минимальными задержками. Она основана на идее передачи данных в синхронном режиме, где каждый элемент сети работает на одной и той же скорости и синхронизируется с главным источником. Это позволяет обеспечивать высокую точность и минимизировать искажения сигнала, что особенно важно в системах передачи голосовых и видео данных [2].

SDH является технологией мультиплексирования, что позволяет передавать несколько каналов данных по одной линии. Принцип работы SDH заключается в том, что данные разбиваются на кадры и синхронизируются по времени, что позволяет получить синхронизированную иерархию сигналов. Это не только упрощает передачу данных, но и значительно облегчает процесс их маршрутизации и переключения.

Архитектура SDH состоит из нескольких уровней иерархии, каждый из которых соответствует определенной скорости передачи данных. Эти уровни включают базовые структуры (STM-1, STM-4, STM-16 и т.д.), каждая из которых может передавать определенное количество данных.

Основными элементами SDH считаются:

- Синхронный транспортный модуль уровня 1 (STM-1): Базовый уровень в SDH с пропускной способностью 155,52 Мбит/с;

- STM-4, STM-16, STM-64 которые являются более высокими уровнями, представляющие собой кратные уровню STM-1, что позволяет масштабировать систему по мере увеличения требований к скорости передачи данных;

- Терминальные мультиплексоры (Terminal Multiplexers): Используются для подключения различных сетей к SDH и передачи информации;

- Добавляющие и извлекающие мультиплексоры (Add-Drop Multiplexers, ADM): Позволяют извлекать отдельные каналы из мультиплексированного потока, что делает SDH высоко адаптивной к изменяющимся требованиям трафика.

Данные в SDH передаются в виде кадров, что позволяет более эффективно управлять передачей данных и поддерживать синхронизацию между различными частями сети. Каждый кадр SDH состоит из нескольких составляющих [1]:

- Секционные заголовки (Section Overheads): Метаданные, которые содержат информацию о маршрутизации, синхронизации и мониторинге ошибок;

- Пути (Path Overheads): Определяют параметры передачи данных между различными сетевыми элементами и обеспечивают контроль качества передачи;

- Пользовательская информация: Содержит данные, которые передаются пользователями и приложениями.

Иерархия SDH включает несколько уровней, которые позволяют обеспечить различную пропускную способность и гибкость в управлении сетями. К таким основным уровням относятся:

- STM-1: Базовый уровень в SDH со скоростью 155,52 Мбит/с;
- STM-4: Скорость передачи 622,08 Мбит/с;
- STM-16: Скорость передачи 2,5 Гбит/с;
- STM-64: Скорость передачи 10 Гбит/с.

Каждый из уровней представляет собой кратный предыдущему, что позволяет масштабировать систему. Это делает SDH удобной для адаптации к различным требованиям сетевой нагрузки, позволяя увеличивать пропускную способность по мере необходимости.

SDH поддерживает множество протоколов и форматов, что позволяет интегрировать её с различными сетями и технологиями. К основным протоколам и стандартам, которые поддерживает SDH, относятся:

- SONET (Synchronous Optical Network): Североамериканский стандарт, который совместим с SDH и часто используется в международных сетях;
- PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy): Предшественник SDH, который также поддерживается для обеспечения совместимости со старыми сетями;
- ATM (Asynchronous Transfer Mode): Протокол передачи данных, который может быть интегрирован в SDH для обеспечения более высокой скорости и гибкости передачи данных.

Преимуществами мультиплексирования SDH являются высокая надежность, универсальность и способность эффективно передавать данные на большие расстояния. Технология поддерживает синхронизацию сигналов, что минимизирует потери и искажения при передаче данных. Это особенно важно для магистральных сетей и корпоративных инфраструктур, где требуется стабильность и точность передачи информации. SDH предоставляет гибкость в управлении трафиком, позволяя добавлять или изымать каналы (drop-and-add) без необходимости полной реконфигурации сети. Поддержка различных типов трафика, включая голос, данные и видео, делает SDH универсальным инструментом для современных телекоммуникаций [2].

Однако SDH имеет и свои недостатки. Главный из них — высокая стоимость оборудования и эксплуатации по сравнению с современными технологиями, такими как Ethernet или IP-сети. Кроме того, SDH менее адаптивен к резким изменениям трафика и не всегда подходит для динамических приложений, требующих быстрой масштабируемости. Ограниченная интеграция с пакетными технологиями затрудняет его использование в современных сетях передачи данных, где доминирует IP-протокол. В итоге, несмотря на свои достоинства, SDH постепенно уступает место более гибким и экономичным решениям.

Мультиплексирование SDH (Synchronous Digital Hierarchy) широко применяется в телекоммуникационных магистралях и городских сетях связи для передачи данных, голоса и видео с высокой пропускной способностью. Эта технология используется операторами связи для транспортировки данных на дальние расстояния между городами и странами, обеспечивая высокую надежность и минимальные потери при передаче. SDH подходит для организации магистральных каналов интернет-провайдеров, соединения дата-центров и создания корпоративных сетей, где требуется поддержка различных типов трафика, включая голосовые вызовы, видеоконференции и крупные массивы данных.

Также SDH находит применение в энергетике, промышленности и системах безопасности. В энергетических системах SDH обеспечивает передачу данных SCADA и других критически важных сигналов для управления объектами инфраструктуры. В системах безопасности технология используется для передачи видеонаблюдения и данных мониторинга. Благодаря синхронизации и гибкости SDH, она подходит для работы в условиях высокой нагрузки и строгих требований к качеству обслуживания (QoS), что делает ее популярной в крупных сетях, требующих стабильности и надежности [2].

1.3 Технология мультиплексирования по длине волны (WDM) оптических сигналов для повышения пропускной способности канала

В последние годы популярность оптоволоконной связи для передачи данных на большие расстояния возросла благодаря ряду преимуществ, включая низкие потери, низкую стоимость, простое усиление, низкий уровень помех и малый вес. Базовая оптическая телекоммуникационная система состоит из передатчика, носителя и приемника. Передатчик преобразует сигнал в световые волны. После этого среда (оптическое волокно) передает световые волны к месту назначения. Отправленный сигнал преобразуется обратно в его первоначальную форму приемником в месте назначения [3].

Одним из заметных и важных достижений в области оптической связи является плотное мультиплексирование с разделением длин волн (DWDM). Многочисленные оптические устройства, такие как Mux (мультиплексор), реконфигурируемые оптические мультиплексоры ввода и вывода (ROADM) и другие, объединяют выходные данные нескольких оптических передатчиков и передают результирующий полезный сигнал по одному оптическому волокну в сетях DWDM. На приемной стороне объединенные оптические сигналы разделяются другим устройством DWDM (Demux), которое затем передает каждый канал на оптический приемник. Между устройствами DWDM используется только одно оптическое волокно (для каждого направления передачи). Одно волоконно-оптическое соединение

может обслуживать несколько оптических каналов с помощью DWDM. Каждому оптическому каналу присваивается определенная длина волны.

Оптический дополнительный фильтр создает составной сигнал, который передается по одному каналу путем объединения нескольких длин волн, генерируемых различными оптическими передатчиками, работающими на разных волокнах (мультиплексирующий фильтр). На приемной стороне оптический понижающий фильтр (демультиплексирующий фильтр) разделяет различные длины волн составного сигнала на отдельные волокна. Модуль мультиплексирования и демультиплексирования (MDU) представляет собой единый корпус, в котором обычно размещаются компоненты мультиплексирования и демультиплексирования (передачи и приема) [3].

Волоконно-оптическая связь использует инфракрасный диапазон длин волн для связи на большие расстояния. Длины волн находятся в диапазоне от 1260 до 1675 нм. Оптические сигналы обладают более высокой пропускной способностью при передаче данных и меньшими потерями в этом диапазоне. Именно в этом диапазоне длин волн предназначены для работы оптические передатчики и приемники. Оптические сигналы имеют меньшее затухание на более длинных волнах. Однако, поскольку длина волны инфракрасного излучения меняется от световой к тепловой, длины волн более 1675 нм не подходят для волоконно-оптической связи. Следовательно, сигналы на более длинных волнах нарушаются температурой поверхности, которая действует как фоновый шум [3]. Диапазон рабочих длин волн указан в таблице 1.1.

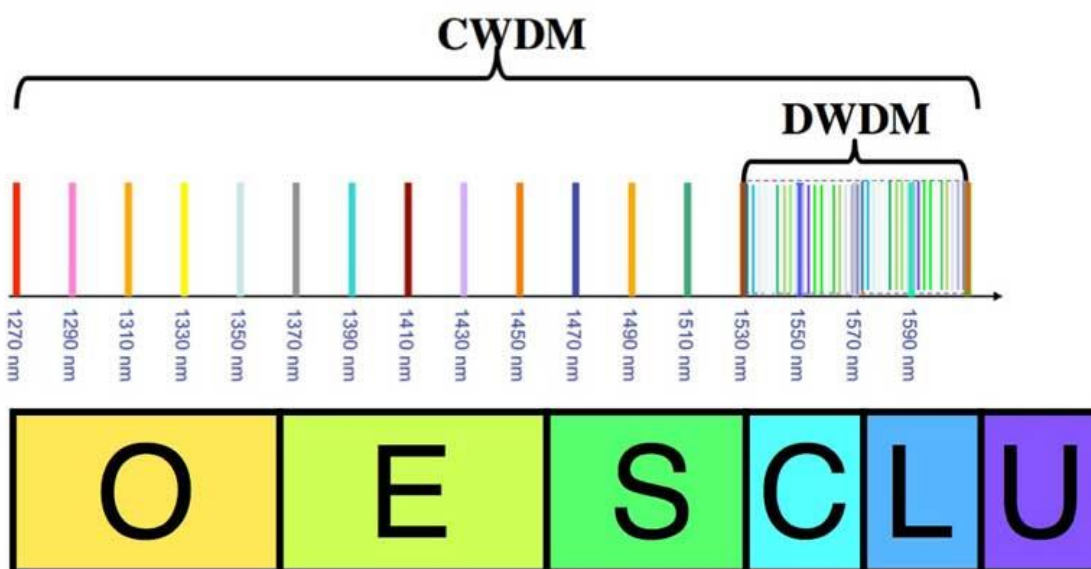


Рисунок 1.1 – Длины волн для использования в WDM.

Таблица 1.1 – Диапазон длин волн для мультиплексирования

Спектр	Описание	Длина волны (нм)
О	Оригинальный диапазон	1260-1360
Е	Расширенный диапазон	1360-1460
S	Короткий диапазон	1460-1530
С	Обычный диапазон	1530-1565
L	Длинный диапазон	1565-1625
U	Ультра диапазон	1625-1675

1.4 Обзор длин волн светового сигнала для передачи информации с помощью мультиплексирования по длине волны

Свет с длиной волны от 1260 до 1625 нм обладает наименьшей дисперсией, искажениями сигнала и наименьшими потерями, что, согласно многочисленным исследованиям и испытаниям, делает его идеальным для передачи по оптическому волокну [4]. Из этих пяти диапазонов длин волн волоконно-оптическая связь впервые была реализована в О-диапазоне. Хроматическая дисперсия приводит к очень малому рассеянию сигнала в этом диапазоне. S-диапазон используется в качестве нисходящей длины волны в пассивных оптических сетях (PONs), поскольку потери в оптическом волокне в нем меньше, чем в О-диапазоне. Из пяти диапазонов длин волн Е-диапазон используется меньше всего. Оптическое волокно демонстрирует наибольшее затухание в Е-диапазоне из-за остаточных примесей воды (группа ОН) в стекле. исчезновение широко используемого оптического волокна международного союза электросвязи (ITU)-TG. 652. После использования технологии дегидратации в процессе производства стекла, D) в Е-диапазоне уменьшилось по сравнению с О-диапазоном. Однако, поскольку многие оптические сети были созданы до 2000 года, использование Е-диапазона ограничено.

В наши дни оптическое волокно подходит для систем передачи данных на большие расстояния и имеет самые низкие потери в С-диапазоне. Он часто используется в сочетании с системами оптической передачи данных WDM, на большие расстояния, сверхдальние расстояния в подводных оптических кабелях и во многих городских районах, локальных сетях (LAN) и других приложениях. Когда С-диапазон не в состоянии удовлетворить необходимую потребность в полосе пропускания, может быть использован L-диапазон, который имеет вторые по величине потери.

WDM - это метод увеличения пропускной способности оптического волокна для передачи данных. Это метод мультиплексирования различных потоков данных, т.е. оптических каналов, в одну волоконную нить с различными длинами волн для различных цветов лазерного излучения. Инфракрасный (ИК) спектр - это область, в которой осуществляется WDM.

Частота и длина волны - это просто взаимозаменяемые термины. Частота (в Гц), умноженная на длину волны (фактическую продолжительность одного цикла), является скоростью несущей волны. WDM и FDM используют одну и ту же технологию, поскольку длина волны и частота обратно пропорциональны (более высокая частота равна более короткой длине волны). Следовательно, FDM электрических сигналов разных частот аналогичен WDM оптических сигналов разных длин волн. Мультиплексированные сигналы разделяются на исходные каналы на приемном конце с помощью демультиплексора. Демультиплексор обычно используется в качестве фильтра для выбора определенной длины волны оптического сигнала.

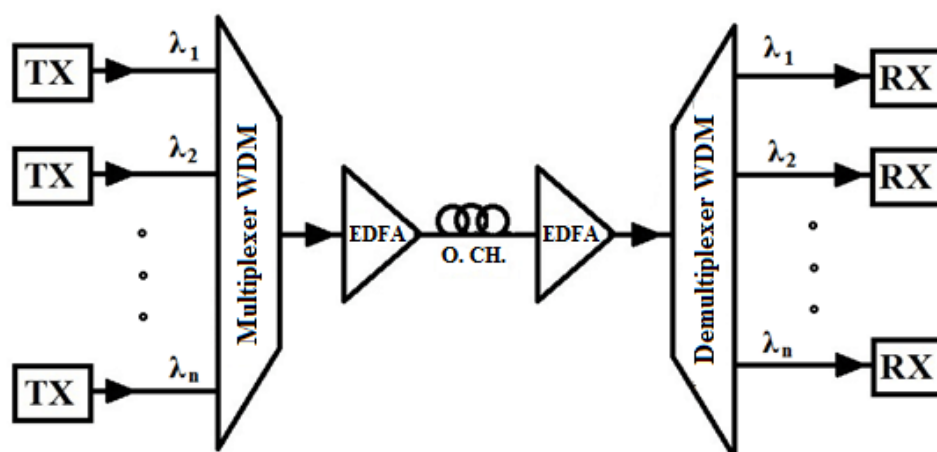


Рисунок 1.2 – Принцип работы WDM мультиплексирования.

Телекоммуникационные компании в настоящее время широко используют системы WDM благодаря технологии, которая позволяет им увеличить пропускную способность сети без добавления дополнительных оптических волокон. В 1978 году впервые была опубликована технология WDM, а к 1980 году были доступны системы WDM лабораторного производства. Первоначальная система WDM имела всего два сигнала. Базовая система со скоростью 100 Гбит/с может быть расширена до более чем 16 Тбит/с по одному волокну благодаря способности современных систем умножать 160 сигналов. Кроме того, была внедрена 320-канальная система управления (12.5 ГГц интервал между каналами).

Обычный WDM использует как 1310 нм, так и 1550 нм обычной длины волны. Существует три типа WDM:

- 1) Обычный WDM;
- 2) Грубое мультиплексирование с разделением длин волн (CWDM);
- 3) Плотное мультиплексирование с разделением длин волн (DWDM).

При работе в оптическом диапазоне длин волн CWDM использует меньшее количество каналов (4, 8, 16 или 18). В CWDM расстояние между каналами больше, чем в DWDM. Каналы в CWDM расположены на

расстоянии 20 нм друг от друга. CWDM - это другое название широкого WDM.

Для передачи сигнала на расстояниях малой дальности часто используется CWDM. По сравнению с DWDM-каналом, CWDM является менее дорогостоящим. Номинальное изменение частоты или длины волны - это расстояние между двумя соседними оптическими каналами. На минимальное расстояние между каналами, известное как межканальная перекрестная речь, влияет ряд переменных, включая полосу пропускания фильтра, формат модуляции, скорость передачи данных в канале и сдвиги центральной длины волны (вызванные изменениями в производстве лазера и температуре).

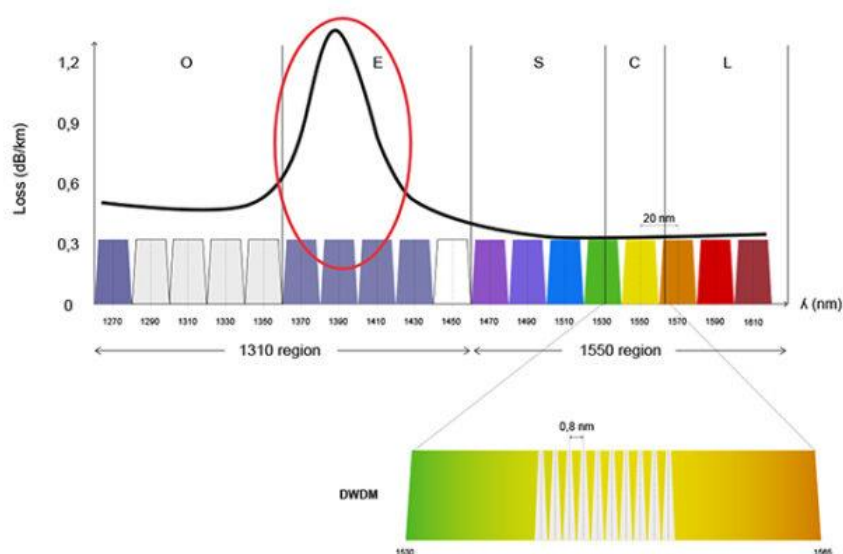


Рисунок 1.3 – Диапазон длин волн для CWDM и DWDM.

На рисунке 1.3 показаны 18 каналов CWDM в диапазоне 1260-1625 нм, разделенных расстоянием 20 нм. В DWDM используется меньшее расстояние между каналами, чем в CWDM. Расстояния между каналами выражаются в виде частоты в методе DWDM. Расстояние между каналами DWDM составляет 0,8/0,5 нм. Благодаря небольшому расстоянию между каналами одновременно может передаваться больше данных. В С-диапазоне возможно использование до 40 каналов с интервалом между каналами 100 ГГц. Возможно использование 320 каналов С-диапазона с интервалом между каналами 12-5 ГГц [5]. Другое название этого стандарта - Ultra-DWDM. Небольшое количество каналов DWDM С-диапазона с интервалом между каналами 100 ГГц (как по частоте, так и по длине волны) показано на рисунке 4.

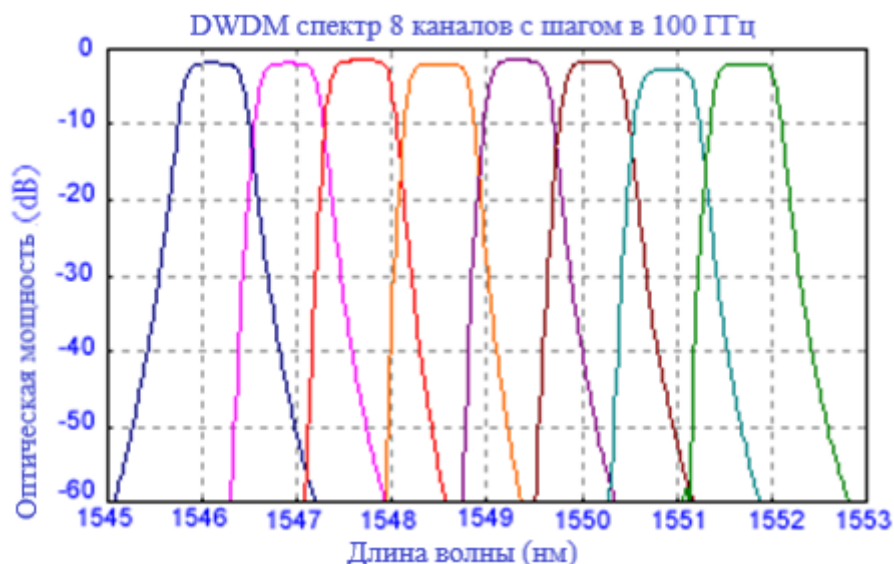


Рисунок 1.4 – Полоса длин волн для DWDM.

1.5 Принцип работы плотного мультиплексирования по длине волны для оптического сигнала

DWDM - это значительное усовершенствование волоконно-оптической связи. DWDM (Mux) мультиплексирует выходные данные, так что несколько оптических передатчиков могут передавать их по одному оптическому волокну. На принимающей стороне другое устройство DWDM (demux) передает мультиплексированные оптические сигналы и каждый оптический сигнал на оптический приемник [6]. Между устройствами DWDM используется только одно оптическое волокно (для каждого направления передачи).

Пример типичной сети DWDM показан на рисунке 1.5. По сети DWDM может передаваться любой трафик, включая Ethernet, SDH и SONET. В дополнение к оптическим сигналам, DWDM соответствует длинам волн и использует оптические передатчики и транспондеры для преобразования трафика в оптическую форму. Передача голоса, электронной почты, видео и мультимедийных данных может осуществляться через системы DWDM. Оптические передатчики и приемники, мультиплексоры и демультимплексоры, реконфигурируемые оптические мультиплексоры ввода и вывода (ROADM), оптические усилители, оптические мониторы мощности (OPM), промежуточные устройства (ILU) и оптические транспондеры являются основными компонентами сетей DWDM.

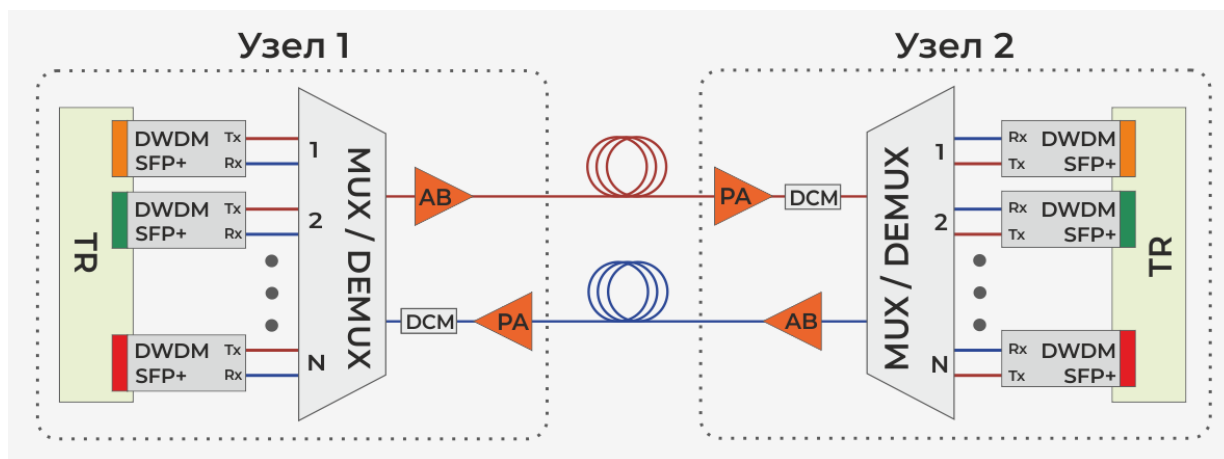


Рисунок 1.5 – Принцип работы и элементы системы DWDM.

На одном конце оптоволоконного кабеля установлен оптический передатчик, а на другом - оптический приемник. Устройство, известное как приемопередатчик (SFP, SFP+), может функционировать как в качестве передатчика, так и в качестве приемника. Оптический передатчик использует лазерный диод или светодиод LED для преобразования электрического сигнала в оптический. Содержание исходного сигнала не меняется. Световые волны или оптические сигналы могут проходить через оптическое волокно благодаря полному внутреннему отражению. В качестве оптического приемника используется фотодетектор. Электрические сигналы вырабатываются путем преобразования оптических сигналов.

Несколько длин волн, генерируемых различными оптическими передатчиками, работающими на различных волокнах, объединяются оптическим дополнительным фильтром для создания единого составного сигнала, который затем передается по одному каналу (мультиплексору). Все различные длины волн составного сигнала разделяются и передаются по отдельным волокнам на приемном конце через оптический каплевидный фильтр, также известный как демультиплексор.

ROADM работает аналогично оптическому мультиплексору ввода и вывода MDU. Единственным отличием является его способность обрабатывать оптические сигналы с двумя или более длинами волн на портах добавления и удаления. В этом устройстве также используется технология WDM. Он используется для удаленного переключения трафика на уровне длин волн из систем WDM. Плата WSS используется для удаленного переключения трафика WDM. Сеть может быть перенастроена благодаря устройству мультиплексора ROADM [7].

Оптические усилители могут либо повышать коэффициент усиления оптических сигналов, либо усиливать их на более высоком уровне. Эти устройства работают за счет увеличения энергии фотонов в световом сигнале. Важным компонентом, поддерживающим современные сети оптической связи на большие расстояния, является усиление света, которое

происходит без преобразования оптического сигнала в электрический. Усилители могут использовать широкий диапазон длин волн. Таким образом, эти устройства могут использоваться с любым другим компонентом DWDM. Усилители являются односторонними устройствами.

Прибор, называемый оптическим монитором мощности (OPM), используется для измерения средней мощности в волоконно-оптических системах. OPM отслеживает уровни мощности оптического сигнала на каждом порту устройства. С ним можно использовать другие компоненты DWDM, такие как передатчики и приемники, мультиплексоры и демультиплексоры, усилители и т.д. Это достигается в MDU с помощью порта мониторинга. Аварийные сигналы будут подаваться, когда уровень оптических сигналов упадет ниже необходимого порога.

Блок промежуточной передачи (ILU – Inter-Lever Unit) - это пассивное оптическое устройство с тремя портами, которое используется для чередования четных и нечетных каналов DWDM. В целом, оно используется для создания более плотных оптических каналов. Можно создавать DWDM-каналы с интервалом 50 ГГц, чередуя нечетные и четные DWDM-каналы с интервалом 100 ГГц. Аналогичным образом, можно создавать более плотные оптические каналы с интервалом 25 ГГц или 12,5 ГГц [8].

В телекоммуникационных сетях высокая скорость передачи данных является фундаментальным требованием для передачи данных на большие расстояния. WDM использует меньше ресурсов для удовлетворения этого требования. В данной статье приводится подробное описание технологии и типов WDM. Представлена архитектура сети DWDM, а также описана работа основных компонентов сети.

2 Реконфигурируемый оптический мультиплексор ввода и вывода ROADM и его компоненты

2.1 Обзор принципа работы реконфигурируемого оптического мультиплексора ввода и вывода (ROADM)

Системы оптических линий связи (OILS) служат базовой инфраструктурой для передачи оптических сигналов на большие расстояния, образуя основу современного Интернета. Важнейшим компонентом этой инфраструктуры является реконфигурируемый оптический мультиплексор с возможностью добавления/удаления (ROADM). Эти устройства стратегически расположены в узлах сети для управления сегментами оптического спектра по различным волоконным каналам, выполняя такие функции, как фильтрация, ослабление и усиление оптических сигналов во время их передачи. В настоящее время на рынке широко доступны автомобильные дороги. В этой работе предлагается подробное исследование потенциальной конструкции ROADM, которая может быть изготовлена открытым способом с использованием компонентов, которые могут быть приобретены в небольших количествах [9].

Основная задача ROADM - обеспечить маршрутизацию мультимедийных каналов (МК) по волоконно-оптической сети. Определенный спектральный диапазон, такой как С-диапазон, разбивается на сегменты, которые впоследствии маршрутизируются между различными входными и выходными портами ROADM. Эта возможность маршрутизации характеризуется частотными границами, которые определяют конкретные медиаканалы, подлежащие маршрутизации, конечные точки МС и любые необходимые настройки мощности сигнала. В дополнение к функции светопередачи, важно контролировать сигнал в той или иной степени. Поскольку ROADM работает исключительно в фотонной области, проводимые измерения не требуют углубленного анализа передаваемых сигналов. Вместо этого основное внимание уделяется характеристикам спектра. Любые дополнительные функциональные возможности предназначены для достижения основной цели - эффективного управления использованием спектра.

Современные ROADM работают по принципу гибкой сетки, используя участки спектра, которые различаются по ширине и расположены на разных центральных частотах канала. Специфические особенности работы ROADM, включая необходимое расположение этих участков и вариации их ширины, различаются в зависимости от модели устройства. Переключатели с селективностью по длине волны (WSS) обычно используются для фильтрации и маршрутизации медиаканалов. WSS состоит из N входных и M выходных портов, что позволяет конфигурировать участки спектра для маршрутизации от назначенного входного порта к выходному порту. Этот процесс по своей сути предполагает некоторое ослабление из-за вносимых

устройством потерь (IL). В узле ROADM для маршрутизации медиаканалов используются два основных типа соединений. Экспресс-соединения облегчают маршрутизацию медиаканалов между линиями ROADM, также известными как узловые уровни. В отличие от этого, локальные или добавочные/удаленные соединения предоставляют механизм для ввода и извлечения клиентских сигналов на локальном узле, используя одноволновой интерфейс для подключения к модулям транспондеров. Существует простая классификация ROADM, основанная на функциональных возможностях добавочных/удаленных портов [10].

Бесцветный порт - это порт, ориентированный на клиента, который можно настроить для передачи любого определенного "цвета" (длины волны) света.

Функция ненаправленности позволяет направлять сигнал, проходящий через определенный клиентский порт, под любым углом.

Кроме того, бесконфликтная конфигурация добавления/удаления позволяет передавать несколько экземпляров на одной и той же длине волны (через отдельные экспресс-соединения) в рамках одного модуля добавления/удаления.

Современные ROADM часто отличаются отсутствием цветовой гаммы и направленности. Несмотря на то, что бесконфликтные конструкции являются выполнимыми и понятными, для их реализации требуются обширные массивы усилителей или многоадресная оптическая коммутация в отсутствие легкодоступных $M \times N$ WSS [11].

Основным измерительным прибором является фотодиод (ФД). Будучи светочувствительным устройством, ФД оценивают интенсивность света, попадающего на их активную область. Эффективность PDS можно определить по их спектральной чувствительности, которая относится к их реакции на единицу световой мощности на различных частотах. Каждое физическое измерение должно описываться соответствующим спектром.

Монитор оптического канала (ОСМ) представляет собой более сложный измерительный прибор. Его можно представить в виде последовательного расположения фильтра, который может быть перестраиваемым, за которым следует фотодиод. В контексте дифракционной решетки ROADM, ОСМ, как правило, предназначен для поддержки функциональности оптической решетки. Следовательно, ОСМ способен оценивать оптическую мощность, передаваемую по определенному медиа-каналу. Если решетку ОСМ обеспечивает разрешение, превышающее одну ячейку на медиаканал, это также может облегчить проведение более сложных измерений. Одним из таких измерений является спектральная плотность мощности (PSD), которая позволяет получить предварительную характеристику спектральных свойств канала.

При распространении сигнала по оптическому волокну вдоль его траектории происходят потери энергии. Общий показатель потерь составляет приблизительно 10 дБ на каждые 50 километров волокна. Упомянутые ранее

модули, а именно переключатель с выбором длины волны (WSS) и монитор оптических каналов (OCM), также испытывают определенные потери. Для WSS вносимые потери (IL) обычно составляют от 4 до 8 дБ. OCM или фотоприемник (PD) сконструированы таким образом, чтобы поглощать весь поступающий свет, поэтому они обычно устанавливаются на оптическом отводе, который направляет часть оптической мощности на измерительный датчик, позволяя при этом продолжать передачу оставшейся части сигнала. Типичный уровень шума для канала передачи сигнала с 1%-ным отводом составляет 0,2 дБ, при этом PD/OCM регистрирует уровень мощности, который на 21 дБ ниже, чем у исходного источника сигнала. В случае соединения 1:8 коэффициент усиления обычно составляет около 11 дБ. Кроме того, оптические разъемы способствуют возникновению вносимых потерь, которые могут достигать 0,5 дБ при каждом соединении. Наиболее распространенным устройством, используемым для усиления, является волоконный усилитель, легированный эрбием (EDFA). Хотя существуют такие альтернативы, как комбинационное усиление, они неэффективны для устранения потерь в самом блоке ROADM [12].

По мере уменьшения мощности сигнала его усиление до заданного целевого значения становится все более сложной задачей из-за возрастающего влияния минимального уровня шума, например, вызванного спонтанным излучением усилителя (ASE), которое значительно влияет на общее оптическое отношение сигнал/шум (OSNR) [13]. Крайне важно убедиться, что сигнал не становится чрезмерно слабым перед повторным усилением в любой точке сети; в противном случае OSNR может подвергнуться необратимому ухудшению.

Для требуемого значения OSNR в 17,0 дБ при мощности запуска сигнала 0,0 дБм и использовании десяти усилителей EDFA с коэффициентом шума 6 потери диапазона и, следовательно, усиление усилителя после каждого диапазона определяются как равные 25,0 дБ. Этот вывод согласуется с эмпирическими данными, собранными в оптической сети CESNET. Следовательно, мы спроектировали дорожную систему таким образом, чтобы уровень мощности сигнала не снижался значительно ниже -25 дБм.

В дополнение к основным функциям ROADM, которые включают маршрутизацию спектра, мониторинг и усиление, оборудование DWDM часто включает дополнительные функции. Некоторые из этих функций необходимы для современных сетей, в то время как другие обеспечивают удобство и облегчают задачи операторов.

1) Оптический канал управления: OSC устанавливает внутриполосный канал для связи между устройствами. Обычно он расположен за пределами С-диапазона и работает на частоте, которая больше не является оптимальной для эффективного усиления EDFA, часто около 1511 нм. Отсутствие усиления не является проблемой, поскольку OSC отключается после каждой секции оптической передачи (OTS). OSC обычно используется для реализации механизмов автоматического снижения мощности (APR) и

автоматического отключения лазера (ALS). Существуют различные способы интеграции сигнала OSC с функцией обнаружения сигнала встроенного предусилителя на линейном входе. Кроме того, спецификация OpenROADM предусматривает наличие критически важного для безопасности контура управления, который использует OSC для автоматического отключения линии [14].

2) Оптическая рефлектометрия во временной области: Узел ROADM, обращенный к линии, может включать встроенный рефлектометр. Это устройство передает серию импульсов в оптоволокно, измеряя отражения от разрывов волокон, разъемов и других аномалий, а также время, необходимое для возврата импульса определенной формы к передатчику. Анализируя эти отражения, рефлектометр может точно определить местоположение таких проблем, как разрывы волокон.

Некоторые модули OSC, имеющиеся в продаже, интегрируют измерения OTDR в подключаемые устройства SFP. В этой реализации используются смещения, определяемые производителем, в регистровом пространстве модуля SFP для управления функциональностью рефлектометра, запроса измерений и ретрансляции обработанных результатов. В этом случае сигнал рефлектометра передается тем же лазером Tx и, следовательно, имеет ту же оптическую полосу пропускания, что и канал OSC.

1) Идентификация подключения: Встроенный маломощный источник света может быть подключен к нескольким выходным портам для облегчения идентификации кабельных соединений. Длина волны этого источника света обычно находится за пределами диапазона C, что позволяет соответствующим образом модифицированному переключателю с выбором длины волны (WSS) эффективно направлять его. Детектор света способен определить, какой входной порт принимает этот световой сигнал от другого устройства в пределах того же узла ROADM. Для стандартной реализации требуется WSS с более широкой, чем обычно, полосой передачи, отключение по крайней мере одного канала передачи данных или WSS, работающая в режиме 2:N, а не в более распространенной конфигурации 1:N. При достаточном уровне интеллектуализации на уровне управления сетью и добавлении одного дополнительного приемопередатчика аналогичная функциональность может быть достигнута по требованию и в полосе пропускания, при условии, что сеть используется не полностью.

Была выбрана архитектура Route-and-Select, в которой используются бесцветные, ненаправленные модули ввода/вывода. ROADM оснащены усилителями EDFA для снижения внутренних потерь и поддержки более широкого спектра уровней мощности входного сигнала. Для мониторинга производительности передаваемых мультимедийных каналов используется многовходовой модуль OCM. Каждый узел ROADM содержит N линейных модулей, которые управляют подключениями на большие расстояния к другим узлам ROADM, а также M модулей добавления/удаления для

локального завершения каналов. Этот проект является масштабируемым и позволяет использовать конфигурации, в которых N меньше или равно 8, а сумма N и M не превышает 10; например, возможно построить участок ROADM с уклоном в восемь градусов с двумя резервными установками для добавления/удаления.

Оптическая конфигурация линейного градусного блока ROADM показана на рис. 4(а). Каждый градус оснащен встроенными OSC-фильтрами и обеспечивает двунаправленный рефлектометр через OSC. Выходящие в линию порты оснащены контрольным отводом с коэффициентом мощности 1%. Кроме того, при передаче сигналов, подверженных хроматической дисперсии, к выходу EDFA может быть подключен дополнительный модуль компенсации дисперсии (DCU). Четырехканальный ОСМ используется для оценки распределения мощности по мультимедийным каналам как до, так и после каждого усилителя [15].

В открытой спецификации ROADM не рекомендуется использовать локальный контур управления для управления питанием канала из-за потенциального риска возникновения колебаний в сети. Следовательно, в нашем существующем оборудовании для настройки канала используется центральный контроллер. Все необходимые свойства доступны через интерфейс NETCONF, работающий на сервере.

1) Ограничения по мощности: Как подробно описано в разделах II-D и II-E, важно постоянно поддерживать уровень сигнала в указанных пределах. В частности, общая мощность по всем каналам не должна превышать 21 дБм на любом доступном внешнем порту, и ни один сигнал не должен опускаться ниже -25 дБм в любой точке трассы. Модули EDFA, которые мы используем, имеют максимальный выходной сигнал на своих портах, равный +21,5 дБм. В обычной системе DWDM, работающей на частоте 50 ГГц, до 96 каналов могут передаваться через многоволновые интерфейсы (линейный ВХОД, линейный выход и экспресс-порты). Такая конфигурация обеспечивает динамический диапазон почти в 20 дБ, а с внедрением технологии FlexGrid, возможно, и больше [16].

Есть необходимость установить начальную мощность на уровне +0 дБм на канал на линейном выходе, чтобы обеспечить работу на волоконных линиях более чем на 25 дБ без необходимости дополнительного усиления. Принимая во внимание максимальную вносимую потерю WSS в 8 дБ, как указано в техническом описании, это привело к необходимости усиления EDFA на уровне 22 дБ от входного порта IN до линейного выходного OUT, что привело к прогнозируемому значению мощности на уровне -12 дБм на портах Express. Для входящего канала со скоростью -25 дБм на линейном входе, наряду с соответствующими фильтрующими потерями (см. раздел II-C), DCU и максимальными вносимыми потерями WSS, необходимо усиление на уровне 27 дБ в линейном входе в направлении прямого выхода, чтобы достичь -12 дБм на канал на прямом выходе. Однако, благодаря широкому динамическому диапазону системы DWDM, использование 96 каналов

обеспечивает выходную мощность EDFA +20,6 дБм. Незначительное увеличение до -24 дБм на канал при линейном входе привело бы к насыщению EDFA, так как выходная мощность превысила бы +21,5 дБм. Это подчеркивает необходимость тщательного выравнивания мощности каналов в сети DWDM, особенно когда используются все каналы в C-диапазоне.

Узел добавления и удаления с помощью маршрута и выбора показан на рис. 4(б). Хотя он имеет концептуальное сходство с узлом линейного уровня, в этой конфигурации используется встроенный разделитель и ответвитель 8:1, направленный в сторону скоростного пути. Мы использовали устройства с селективным переключением длин волн (WSS) в соотношении 1:N, что позволяет этим разветвителям эффективно выполнять функции без указания направления. Однако такая конструкция не удовлетворяет требованиям автономности. Для локального ограничения длины волны, принимаемой с нескольких направлений, необходимо несколько дополнительных устройств добавления и удаления. Собранный прототип показан на рис. 2. Этот модуль добавления и удаления оснащен расширенными возможностями фильтрации и мониторинга, что делает его пригодным для использования с чужеродными длинами волн.

Методология выбора маршрута, которую мы применили для линейных градусов, оказывается особенно полезной в контексте двухградусного дорожного узла. В этой конфигурации для быстрого подключения используется только один порт WSS, что позволяет сохранить восемь портов для локального добавления и удаления функций. Учитывая, что узел работает на двухступенчатом уровне, дополнительные соединения могут быть эффективно установлены либо с помощью Y-образных кабелей, либо с помощью серии пассивных разветвителей. Для создания дополнительного узла, который обеспечивает бесцветное, ненаправленное и бесконтактное подключение до восьми клиентских портов, требуются следующие компоненты: 16 блоков разветвителей 1:2, оснащенных разъемами LC/UPC, 24 дуплексных соединителя LC/UPC и простой оптический корпус. Хотя аналогичная схема могла бы быть реализована для узлов со степенями больше двух, основным ограничением в таких случаях является количество портов, доступных в WSS линейных блоков. В четырехуровневом узле этот подход позволяет обеспечить доступ только к шести каналам (в общей сложности, по всему местоположению ROADM) для локального использования.

Современные когерентные системы обладают возможностью настройки своих приемников на определенную частоту. Такая конструкция по своей сути исключает другие сигналы, которые могут присутствовать на оптическом входе приемника. Следовательно, нет необходимости в реализации фильтрации WSS на пути прохождения сигналов для этих приемопередатчиков. Однако эти приемопередатчики накладывают определенные ограничения на сигнал и количество нефильтрованных каналов, которые включают пороговые значения потери входной мощности,

которые должны учитывать наличие нескольких одновременных сигналов, а также широкополосный шум и перекрестные помехи.

В этом контексте может быть использована методология, включающая пассивные соединители и разветвители. По мере увеличения количества узлов или клиентских портов потери превышают оптические характеристики, обеспечиваемые линейными уровнями, а наличие сигнала превышает возможности когерентных приемников. Экономичный узел добавления и удаления, вмещающий до восьми клиентских портов, может быть собран с помощью четырех разветвителей 1 на 8, двухкаскадного EDFA и матрицы PD. В отличие от других типов ROADMs, упомянутых в этой работе, этот конкретный сетевой элемент еще не был создан. Новым компонентом, ранее не использовавшимся в рассматриваемых активных узлах, является матрица со встроенным фотодиодом и цифровым считыванием данных по шине I2C. Выбор остановлен на серии ITMA от Oplink из-за их доступности в однозначных количествах.

Был выбран оригинальный усилитель, оснащенный двумя независимо функционирующими каскадами. Физическое подключение аналогично вышеупомянутому модулю WSS. Ленточный кабель передает различные сигналы GPIO для внеполосного управления, критически важного для безопасности (например, APR и ALS), последовательный интерфейс UART для целей управления, а также источник питания. Этот модуль усилителя способен работать в режиме автоматической регулировки усиления (AGC) с подавлением переходных процессов. Он включает в себя несколько отводов с фотодетекторами (PDS) для внутреннего контура управления и внешнего доступа. Для управления функциями безопасности предназначены специальные входные сигналы.

Для правильного энергопитания оборудования необходимо разместить всю необходимую электронику, включая термоплавкие соединения и резервную длину оптоволоконка, в имеющемся в продаже корпусе 1U или больше. Важно обрабатывать переднюю и заднюю панели водоструйной резкой, чтобы создать воздухозаборники для вентиляции, а также пространства для оптоволоконных и кабельных соединений. Необходимо обеспечить возможность использования ROADM в реальных условиях, требующих высокого уровня отказоустойчивости. Поэтому важно обеспечить потребность резервных источников питания с возможностью горячего подключения и установки вентиляторных модулей. Мы решили использовать источники питания, соответствующие промышленному стандарту PMBus. Выбранная модель поддерживает цифровое считывание температуры, частоты вращения вентилятора, всех напряжений, а также измерение потребляемой мощности и выходного тока. В качестве дополнительной функции скорость вращения вентилятора может быть увеличена с помощью программной команды. С вентиляторами ситуация может оказаться более сложной. В связи с тем что нету возможности поставлять вентиляторные модули с возможностью горячего подключения

для стоечных шкафов 1U небольшими партиями на рынок необходимо использовать заднюю панель доступа к корпусу в качестве единого устройства для горячего подключения. Во время тестирования таких устройств, было продемонстрировано достаточная тепловую инерционность, чтобы выдержать кратковременную работу без установленного вентиляторного поддона и при охлаждении только одним блоком питания.

Вентиляторы, которые практичны для использования в мультиплексорах, - это бесщеточные модели с питанием от постоянного тока напряжением 12 Вольт с использованием всего двух электрических проводов. Устройство подключенный к сети переменного тока ADT7463 обеспечивает считывание частоты вращения вентилятора, обнаружение зависания вентилятора и управление скоростью вращения вентилятора с помощью ШИМ для снижения акустического шума. Этот чип также обеспечивает дополнительный контроль напряжения в дополнение к тому, который доступен в модулях питания PMBus.

2.2 Оптоволокно для физической среды передачи

Оптоволокно — это технология передачи данных, которая использует световые сигналы для перемещения информации через тонкие стеклянные или пластиковые нити. Его работа основана на фундаментальных принципах оптики, таких как полное внутреннее отражение света, что позволяет световому сигналу перемещаться на большие расстояния практически без потерь.

Суть работы оптоволоконной системы начинается с источника света, например, лазера или светодиода, который генерирует световые импульсы. Эти импульсы кодируют информацию, будь то данные, аудио или видео. Световой сигнал модулируется, что означает, что его параметры, такие как интенсивность, частота или фаза, изменяются в соответствии с передаваемой информацией. Этот модулированный световой сигнал затем вводится в сердцевину оптоволоконного кабеля.

Оптоволокно состоит из двух основных слоёв: сердцевины и оболочки. Сердцевина представляет собой тонкую стеклянную или пластиковую нить, по которой непосредственно передаётся свет. Вокруг сердцевины находится оболочка, которая имеет меньший показатель преломления. Это различие в оптических свойствах между сердцевиной и оболочкой создаёт условие для полного внутреннего отражения. Когда световой сигнал попадает на границу между сердцевиной и оболочкой под углом, превышающим критический, он полностью отражается обратно в сердцевину. Таким образом, свет "зигзагообразно" движется по волокну, не выходя за его пределы.

Поскольку свет движется в оптоволокне на больших скоростях, он может передавать огромные объёмы данных с минимальными задержками. Это делает оптоволоконные линии связи особенно подходящими для

высокоскоростных сетей, таких как магистральные линии передачи данных, интернет и телекоммуникационные системы.

Одной из уникальных особенностей оптоволоконна является его способность передавать сигналы на большие расстояния практически без затухания. Однако, несмотря на это, определённые потери энергии всё же происходят, в основном из-за рассеяния света и поглощения материала сердцевины. Для компенсации этих потерь в сети часто используются усилители, такие как EDFA (усилители на основе эрбиевого волокна), которые увеличивают мощность светового сигнала, позволяя ему преодолевать ещё большее расстояние.

Оптоволоконно также обладает способностью передавать несколько сигналов одновременно, используя технологию, известную как мультиплексирование по длине волны (WDM). В этом случае в одном волокне передаётся несколько длин волн света, каждая из которых несёт свой поток данных. Эта технология значительно увеличивает пропускную способность оптоволоконных линий, позволяя передавать терабиты данных в секунду.

Ещё одним важным аспектом работы оптоволоконна является его устойчивость к внешним помехам. В отличие от металлических кабелей, которые подвержены влиянию электромагнитных полей, оптоволоконно передаёт данные в форме света, что делает его нечувствительным к электромагнитным помехам и радиоизлучению. Это особенно важно в условиях, где требуется высокая надёжность и качество связи, например, в промышленных или военных приложениях.

Когда световой сигнал достигает конца оптоволоконного кабеля, он преобразуется обратно в электрический сигнал с помощью фотодетектора, такого как фотодиод. Этот детектор улавливает световые импульсы и преобразует их в электрические сигналы, которые затем декодируются и обрабатываются для восстановления переданной информации. Таким образом, данные, переданные в оптической форме, становятся доступными для конечного пользователя.

Одним из главных преимуществ оптоволоконна является его высокая пропускная способность и эффективность передачи. Это делает его идеальным выбором для передачи больших объёмов данных, особенно на большие расстояния. При этом оптоволоконно остаётся компактным и лёгким, что упрощает его установку и обслуживание. Однако важно отметить, что оно требует тщательного обращения, так как стеклянные волокна могут быть хрупкими.

Таким образом, оптоволоконно работает за счёт использования световых сигналов, которые движутся внутри сердцевины благодаря полному внутреннему отражению. Эта технология сочетает в себе высокую скорость, минимальные потери и устойчивость к помехам, что делает её основой современных систем связи.

С ростом уровня использования и запросов на связь традиционные кабельные коммуникации оказались неспособны удовлетворить потребности людей. В настоящее время оптоволоконные коммуникации стали основным способом передачи данных в мире. В эпоху передачи данных использования оптоволокна внутри оборудования связи имеют ряд преимуществ, таких как надежная защита от электромагнитных помех, меньшее использование ресурсов и высокая скорость передачи данных. Таким образом, в основе непрерывного развития и совершенствования мультиплексоров лежат инновации, которые быстро появятся в будущем. Оптическое волокно для передачи информации чаще всего состоит из трех составных частей, как иллюстрировано на рисунке 2.1. Между внешним и внутренним слоями находятся сердечник, оболочка и защитное покрытие. Покрытие защищает оптическое волокно от разрушения водяным паром и в то же время улучшает адаптивность оптического волокна, что позволяет в определенной степени обезопасить оптическое волокно и продлить срок службы оптического волокна. Центральная часть волокна - это оболочка и сердечник, где потери света внутри центра ниже, чем внутри оболочки, поэтому световая волна в основном передается в пределах центра [17].

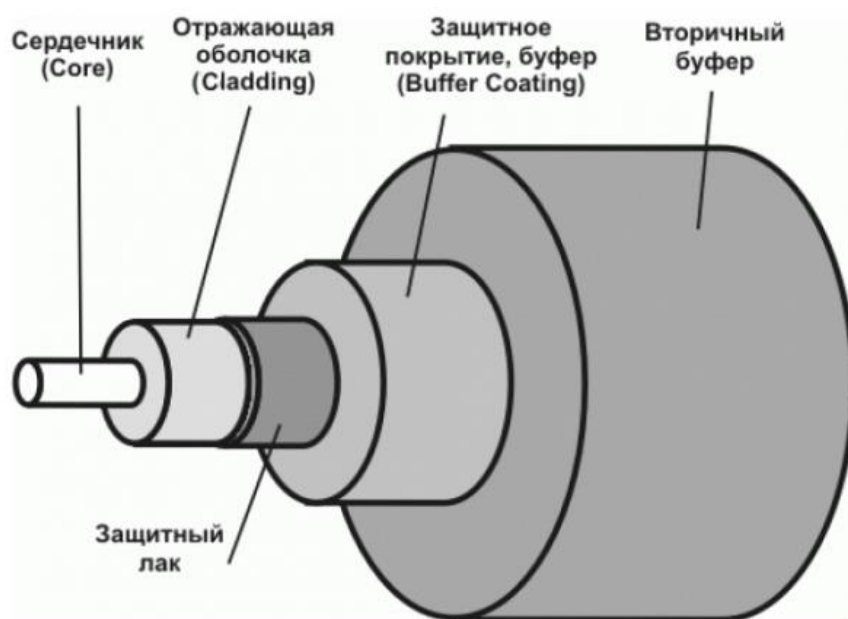
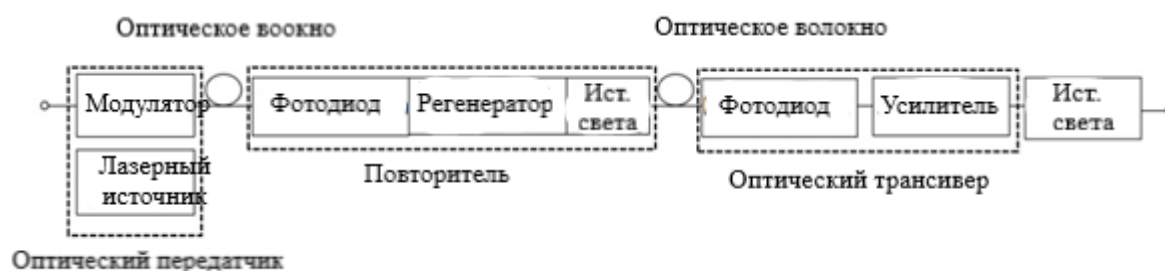


Рисунок 2.1 – Устройство оптического волокна

Волоконно-оптическая связь использует световую волну в качестве несущей и свет в оптическом волокне в качестве среды передачи данных, что называется проводной оптической связью.

В передатчике пакет данных, передаваемый с помощью информации, преобразуется в электрический сигнал для модуляции световой волны, излучаемую источником света, так что интенсивность света изменяется в соответствии с амплитудой и частотой электрического сигнала, и после этого

передается с помощью оптического сигнала в оптоволоконная сеть. При завершении приема оптический сигнал, передаваемый по оптоволокну или кабелю преобразуется в электрический сигнал через оптический приёмник, и после этого слабый электрический сигнал повышается до соответствующего уровня через плату усиления, чтобы создать исходный сигнал передачи. Его структура показана на рисунке 2.2, на котором ретранслятор используется для компенсации ослабления оптического сигнала при его передаче при формировании ближних импульсов искажения формы сигнала [3-4].



Рисуно 2.2 – Оптическая телекоммуникация

Кварц обычно используется в качестве основного материала для изоляции оптических волокон, обеспечивая превосходную изоляцию для эффективной защиты оптического волокна. В результате при передаче информации по оптоволоконной сети связи обеспечивается превосходная защита от электромагнитных помех по сравнению с традиционной кабельной связью. Несмотря на грозы и суровые природные условия, качество и скорость передачи информации сохраняются. Кроме того, чувствительность изоляционного материала к специфическим акустическим сигналам повышает точность использования волоконно-оптических технологий связи.

В волоконно-оптической связи используется незаметный человеческому зрению свет с длинами волн 850 нм и 1310 нм, и частота сигнала является исключительно высокой в пределах 195 тГц в системах DWDM. Следовательно, пропускная способность связи исключительно высока, а скорость передачи данных также значительно выше по сравнению с обычным медным проводом [18].

В настоящее время диоксид кремния является основным сырьем для изготовления волокон в системах связи. Повышение чистоты стекловолокна может значительно снизить потери в волокне. Для этого используется синтезированный кремний с низким коэффициентом примесей. Такое снижение потерь в оптическом волокне позволяет увеличить расстояние между ретрансляционными станциями, тем самым эффективно снижая производственные затраты и повышая качество информационно-коммуникационных услуг.

Оптоволоконная связь в основном использует оптические волны для передачи сигнала. Структура оптического сигнала ограничивается

направлением этих волн, которые полностью содержатся в сердцевине волокна. Любой выходящий свет поглощается оболочкой, окружающей волокно, предотвращая электромагнитное излучение и тем самым достигая цели минимизации перекрестных помех и утечек. Спектр электромагнитного излучения значительно отличается от спектра света, что затрудняет проникновение внешних электромагнитных помех в сердцевину оптоволокна и нарушение передачи световых сигналов. Следовательно, технология оптоволоконной связи обеспечивает уровень конфиденциальности, не сравнимый с традиционными методами кабельной связи.

Все виды электронных коммуникаций, независимо от того, проводные они или беспроводные, требуют значительного количества цветных металлов. В отличие от этого, кварцевое стекло, используемое при производстве оптических волокон, в изобилии содержится в природных ресурсах на Земле, однако его добыча сопряжена с трудностями.

Диаметр волокна довольно мал и составляет около 50 мкм для многомодовых или 9 мкм для одномодовых оптических волокон, что сравнимо с толщиной человеческого волоса. Следовательно, оно очень удобно как при упаковке, так и при транспортировке, и может храниться отдельно. Его легкий вес, компактные размеры и гибкость, а также поверхность пластиковой оболочки, которая может быть изготовлена из прочного гибкого кабеля, позволяют с большой легкостью устанавливать его вдоль различных наземных линий связи.

В настоящее время технологии волоконно-оптической связи стали важной областью исследований и разработок в области науки и техники, а их технические возможности постоянно расширяются. Кроме того, в этой работе рассматриваются будущие тенденции в развитии волоконно-оптической связи с учетом общего состояния волоконно-оптических технологий.

Поскольку спрос на коммуникационные сети продолжает расти, современные технологии могут с трудом удовлетворить потребности в хранении информации в будущем. Следовательно, волоконно-оптическая связь призвана способствовать техническому прогрессу и увеличению скорости передачи, особенно в связи со сверхбольшой пропускной способностью, что представляет собой ключевое направление будущего развития. Чтобы приспособиться к растущему объему передаваемой информации, необходимо разработать новые волны передачи и интегрировать их с многоцелевыми методами разделения волн. Такой подход облегчит переход от одноволновых к многоволновым приложениям, позволяя объединять и разделять множество сигналов. Кроме того, существует острая необходимость в постоянном увеличении емкости хранилища информации.

Потенциал для развития системы, использующей технологию мультиплексирования с временным разделением, был полностью реализован. Тем не менее, в настоящее время для управления полосой пропускания 200

нм, доступной по оптоволокну, используется менее 1% ресурсов, и 99% ресурсов еще предстоит полностью изучить. Фундаментальная концепция, лежащая в основе мультиплексирования с разделением длин волн (WDM), заключается в том, что при одновременной передаче сигналов от нескольких источников света с соответствующим распределением длин волн по полярному волокну пропускная способность волокна может быть значительно увеличена. Интеграция технологии оптического мультиплексирования с временным разделением в систему WDM позволяет расширить канал передачи информации, увеличить пропускную способность и скорость передачи.

Целью разработки оптоэлектронных устройств является интеграция оптических компонентов. Это предполагает объединение лазеров, детекторов, модуляторов и других отдельных микросхем в единый чип. Интеграция этих оптических устройств имеет решающее значение для создания полностью оптических сетей и представляет собой фундаментальную техническую проблему для предприятий.

2.3 Оборудование для ввода, вывода, мультиплексирования и демультимплексирования оптических каналов

Оборудование для ввода, вывода, мультиплексирования и демультимплексирования оптических каналов представляет собой ключевой элемент современных оптических сетей связи. Оно обеспечивает эффективную передачу данных, гибкость в управлении каналами и высокую пропускную способность, что особенно важно в условиях растущего спроса на интернет-трафик и передачу данных на высоких скоростях. В основе работы такого оборудования лежат сложные оптические и электронные технологии, которые обеспечивают преобразование, обработку и распределение оптических сигналов.

Основой для ввода и вывода оптических сигналов являются транспондеры, которые осуществляют преобразование электрических сигналов в оптические и наоборот. Эти устройства принимают электрический сигнал от источника, например, от серверов или сетевых коммутаторов, преобразуют его в световой с использованием лазеров или светодиодов и передают в оптическую сеть. В обратном направлении транспондер принимает световой сигнал, преобразует его в электрический и передаёт конечным устройствам. Транспондеры поддерживают различные форматы модуляции, такие как QPSK или 16QAM, что позволяет увеличивать скорость передачи данных и повышать пропускную способность сети. Некоторые модели оснащены функциями адаптации, которые автоматически регулируют параметры передачи в зависимости от состояния линии связи, что особенно важно для дальних магистральных линий, где потери сигнала могут быть значительными.

Важной функцией оборудования является мультиплексирование, которое позволяет объединять несколько оптических каналов в один. Это достигается за счёт технологии WDM, которая использует разные длины волн света для передачи отдельных потоков данных по одному волокну. Мультиплексоры объединяют сигналы с различных длин волн, создавая единый мультиплексированный поток. Эта технология позволяет существенно увеличивать пропускную способность оптических сетей, минимизируя потребность в дополнительной инфраструктуре. В DWDM-системах, которые представляют собой более плотный вариант WDM, используется множество близко расположенных длин волн, что позволяет передавать до нескольких сотен каналов одновременно. В таких системах применяются лазеры высокой точности и оптические фильтры, которые обеспечивают стабильность работы и минимальные потери сигнала. CWDM, в отличие от DWDM, использует меньшую плотность каналов, что делает его более экономичным решением для сетей с меньшей интенсивностью передачи данных.

Демультимплексирование представляет собой обратный процесс, при котором объединённый поток разделяется на отдельные длины волн. Это позволяет направлять каждый сигнал в соответствующий транспондер для дальнейшей обработки. Для этого используются устройства с высокой спектральной селективностью, такие как тонкоплёночные фильтры или дифракционные решётки, которые разделяют оптические сигналы с минимальными потерями. Демультимплексоры обеспечивают точное разделение каналов, исключая смешивание данных между соседними длинами волн, что особенно важно в системах с высокой плотностью каналов.

Современные оптические сети также используют устройства ROADM, которые объединяют функции ввода, вывода, мультиплексирования и демультимплексирования в одном решении. Эти устройства позволяют динамически изменять маршруты оптических каналов, добавлять или извлекать определённые длины волн без необходимости вмешательства в физическую инфраструктуру. Это достигается благодаря использованию WSS, которые являются ключевым элементом ROADM. WSS позволяют управлять направлением и состоянием отдельных длин волн в реальном времени, что делает такие системы невероятно гибкими и эффективными для крупных магистральных сетей.

Особенностью работы всего оборудования является необходимость обеспечения высокой точности и минимальных потерь при обработке оптических сигналов. Оптические сигналы подвержены затуханию и другим эффектам, таким как интерференция или рассеяние, что может ухудшать качество передачи данных. Для минимизации этих эффектов в сетях используются усилители, такие как EDFA, которые увеличивают мощность сигнала на промежуточных этапах передачи. Кроме того, оборудование оснащается системами контроля параметров сигнала, которые отслеживают

его мощность, соотношение сигнал/шум и другие ключевые показатели. Это позволяет своевременно обнаруживать и исправлять ошибки, возникающие при передаче.

Ещё одним важным аспектом является изоляция каналов, особенно в системах DWDM, где плотность длин волн крайне высока. Для предотвращения интерференции между соседними каналами используются специальные фильтры, которые обеспечивают надёжную изоляцию и предотвращают смешивание сигналов. Такие фильтры работают на основе прецизионной оптики, что позволяет сохранять качество сигнала даже в условиях интенсивной эксплуатации.

Современные системы также включают цифровые модули управления, которые интегрируются с сетевыми протоколами и позволяют автоматически оптимизировать работу оборудования. Это включает настройку параметров передачи, мониторинг состояния оборудования и управление маршрутизацией сигналов в зависимости от загрузки сети. Такие функции особенно важны для крупных операторов связи, где необходимо обеспечивать надёжность и высокую производительность на глобальном уровне.

Всё оборудование для ввода, вывода, мультиплексирования и демультиплексирования оптических каналов проектируется с учётом требований к высокой пропускной способности, надёжности и долговечности. Однако внедрение таких технологий требует значительных инвестиций и квалифицированного персонала для их эксплуатации. Несмотря на это, преимущества оптических систем, такие как высокая скорость передачи данных, устойчивость к помехам и масштабируемость, делают их неотъемлемой частью современных телекоммуникаций.

В качестве альтернативы SDH последнего поколения были внедрены мультиплексоры волновых каналов, соответствующие стандартам плотного мультиплексирования DWDM и грубого мультиплексирования CWDM. Процесс мультиплексирования и демультиплексирования оптического сигнала осуществляется одновременно для 1, 2, 4, 32 или 40 каналов, с возможностью выделения каждого отдельного канала или групп каналов. В этом оборудовании предусмотрены функции усиления мощности оптического уровня, компенсации дисперсии и упреждающей коррекции ошибок FEC. Схема терминального мультиплексора с линейными портами WDM иллюстрируется на рисунке 1. В данной схеме транспондерные устройства осуществляют преобразование оптических сигналов STM-N или Ethernet в оптические сигналы на фиксированных несущих волнах $\lambda_1 \dots \lambda_n$. Транспондеры функционируют в одном из режимов трансляции электрических сигналов: 1R, 2R или 3R. В режиме 1R происходит лишь усиление сигнала. В режиме 2R входной сигнал не только регенерируется, но и усиливается, однако восстановление синхронизации не выполняется. В режиме работы 3R транспондеры осуществляют полную регенерацию, усиление и восстановление входного сигнала[1].

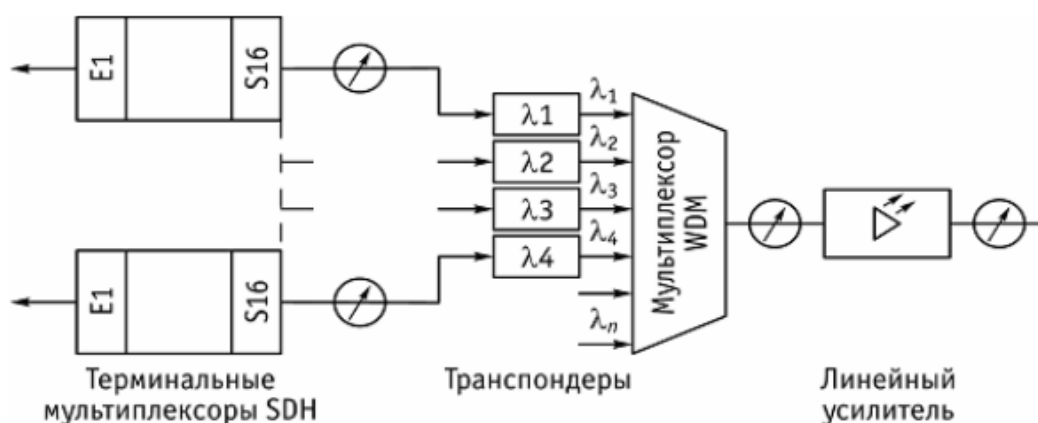


Рисунок 2.3 – Схема работы терминального мультиплексора WDM

2.4 Плата транспондера для преобразования длины волны

Транспондер ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) представляет собой ключевой элемент оптической сети, обеспечивающий преобразование и передачу данных в оптическом формате. Внутри этого устройства находится сложный набор компонентов, которые работают вместе, чтобы преобразовывать электрические сигналы в оптические, а также обратно, обеспечивая передачу данных на большие расстояния и их точное распределение в сети.

Центральной частью транспондера является оптический модуль, в котором осуществляется преобразование электрического сигнала в световой и передача его по оптическому волокну. В этом процессе участвуют лазеры, которые генерируют свет определённой длины волны, и модуляторы, изменяющие характеристики светового сигнала в соответствии с входными данными. Эти модули рассчитаны на работу в условиях высокой плотности информации, поддерживая сложные форматы модуляции, такие как QPSK или 16QAM, для увеличения пропускной способности без увеличения спектральной ширины сигнала.

После генерации сигнала оптический модуль соединён с элементами усиления и фильтрации. Эти компоненты необходимы для минимизации потерь, которые неизбежно возникают при передаче данных через волоконно-оптическую линию. В транспондере используются усилители, такие как EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier), которые увеличивают мощность оптического сигнала, компенсируя затухание, возникающее в процессе передачи. Фильтры, в свою очередь, обеспечивают изоляцию сигналов на различных длинах волн, устраняя интерференцию и предотвращая смешивание данных из соседних каналов.

Ключевую роль играет и цифровой процессор сигналов (DSP). Этот компонент обеспечивает обработку входных и выходных данных, выполняя коррекцию ошибок, сжатие информации и адаптацию сигналов к характеристикам линии связи. DSP также управляет форматом модуляции и скоростью передачи данных, оптимизируя их параметры в зависимости от условий сети. Это позволяет транспондеру адаптироваться к изменениям среды, таким как длина линии, уровень затухания или наличие шумов.

Для управления работой транспондера используется встроенный модуль контроля, который взаимодействует с внешними системами управления сетью. Этот модуль обеспечивает мониторинг состояния устройства, включая уровень мощности сигнала, температуру, параметры модуляции и другие ключевые показатели. Он также отвечает за настройку параметров работы транспондера, обеспечивая согласованность его действий с остальными элементами сети.

Внутри устройства также располагаются механизмы охлаждения и энергоснабжения, которые обеспечивают стабильную работу всех компонентов. Из-за высокой плотности интеграции и значительного тепловыделения системы охлаждения играют важную роль в поддержании работоспособности транспондера, предотвращая перегрев и связанные с ним сбои.

Таким образом, транспондер ROADM объединяет в себе множество технологически продвинутых компонентов, которые работают в тесной связке для преобразования, передачи и обработки оптических сигналов. Его сложная архитектура обеспечивает надёжность, гибкость и высокую производительность, что делает его важнейшим элементом современных оптических сетей связи.

Транспондеры переключают оптические сигналы с одной входной в оборудование длины волны на другую исходящую из оборудования длину волны, подходящую для применения в DWDM. Транспондеры представляют собой оптико-электрооптические преобразователи длин волн (О-Е-О). Транспондер выполняет операцию О-Е-О для изменения длины волны света, поэтому иногда она указывается как "ОЕО". В рамках DWDM транспондер меняет оптический флаг клиента обратно на электрический флаг (О-Е) и после этого выполняет либо 2R (Повторное усиление, изменение формы), либо 3R (повторное усиление, изменение формы и изменение фазы сигнала) регенерацию пропускной способности. На рисунке ниже показана работа двунаправленного транспондера [19]. WDM-транспондер находится между клиентским устройством и DWDM-платформой. Слева направо транспондер получает оптический поток битов, работающий на одной определенной длине волны (1310 нм). Ретранслятор изменяет рабочую длину волны приближающегося потока битов на длину волны, соответствующую требованиям ITU. Он передает свои данные в DWDM-систему. На принимающей стороне метод меняется. Транспондер получает битовый

поток, соответствующий требованиям ITU, и изменяет сигналы обратно на длину волны, используемую клиентским устройством.

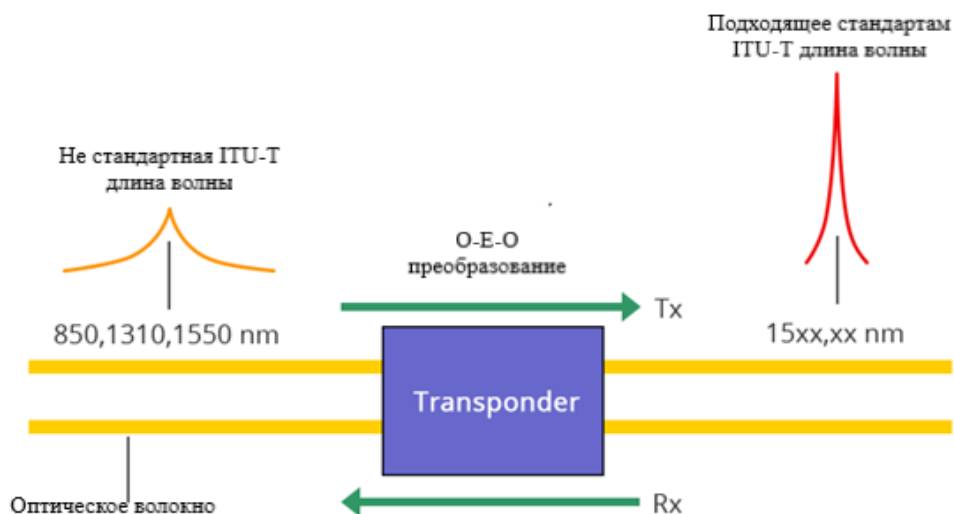


Рисунок 2.4 – Принцип работы О-Е-О транспондера

При осуществлении транспондером преобразования сигнала из оптической в электронную у каждого входного порта имеется устройство приема трафика (Rx), а у каждого выходного порта - устройство передачи трафика (Tx). На каждом конце пути между узлами потребуется передатчик (для передачи сигнала по длине волны) и приемник (для приема сигнала по длине волны). Комбинация передатчика и приемника определяется как приемопередатчик. Он выполняет функцию излучения оптического сигнала с помощью генератора инфракрасного лазера и приёма с помощью фотодиода и адаптации сигнала для передачи по оптическому каналу. Транспондеры в основном используются в системах WDM (от 10 до 400 Гбит/с), включая не только DWDM-системы, но и CWDM-системы. А транспондеры WDM (преобразователи OEO) могут поставляться с различными модулями портов (SFP в SFP, SFP+ в SFP+, SFP28 в SFP28, QSFP28 в QSFP28 и т.д.)[6].

В контексте ROADM транспондеры играют ключевую роль в обеспечении гибкости и масштабируемости сети. Компоненты, из которых состоят эти элементы, показаны на рисунке Рис. 2.5.

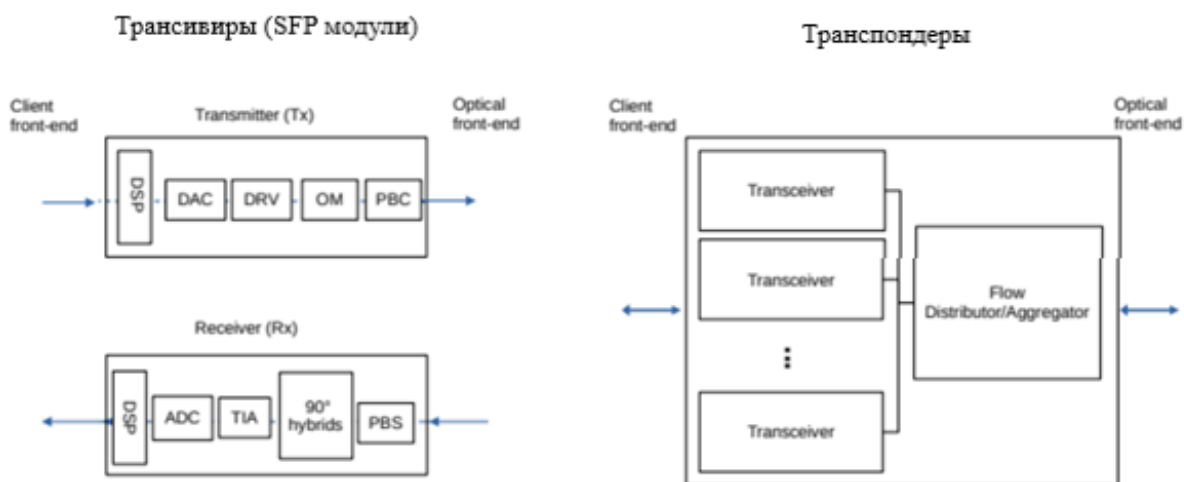


Рисунок 2.5 – Принцип работы трансивиров и транспондеров

В передатчике сигнал обрабатывается с помощью цифровой обработки сигналов (DSP), что позволяет повысить его эффективность. Этот сигнал преобразуется в аналоговый сигнал с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП) и модулируется с помощью драйвера модулятора (DRV), чтобы избежать ухудшения качества. Затем сигнал модулируется оптическим модулятором (OM), синфазным и квадратурным компонентами, а их компоненты объединяются с помощью Преобразователь поляризационного луча (PBC) для передачи в оптической области. В приемнике поляризационный расщепитель луча (PBS) разбивает сигнал на составляющие, которые направляются на разделение мощности. Затем сигнал усиливается с помощью трансимпеданса Усилители (TIA) гарантируют стабильность и позволяют преобразовать сигнал в цифровую форму, после чего он проходит через аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Затем сигнал отправляется в DSP для настройки ожидаемой скорости передачи данных. Задача обработки сигнала в приемнике заключается в создании сигнала, равного переданному сигналу, чтобы можно было определить разницу между переданным и принятым сигналом и правильная скорость передачи данных, формат модуляции.

Транспондер выполняет следующие основные задачи:

- 1) Преобразование сигнала при котором входной электрический сигнал преобразуется в оптический для дальнейшей передачи по волокну;
- 2) Модуляция и демодуляция: транспондеры обеспечивают модуляцию сигнала, например, с использованием технологий QPSK, QAM и др., а также демодуляцию на приемной стороне;
- 3) Управление длинами волн: преобразует сигнал в конкретную длину волны, соответствующую определенному каналу в WDM-системе;
- 4) Устранение шумов: улучшает качество сигнала за счет ретрансляции, устраняя накопившиеся шумы и искажения.

2.5 Оптический усилитель мощности сигнала

Оптический усилитель — это устройство, используемое для увеличения мощности оптического сигнала без его преобразования в электрическую форму. Они играют ключевую роль в оптических сетях связи, позволяя передавать данные на большие расстояния без существенного ухудшения качества сигнала.

Простейшим решением проблемы было бы увеличить мощность, с которой оптические сигналы передаются по волокну. Однако резкое увеличение мощности усиливает нелинейные эффекты в волокне, которые снижают производительность системы. Альтернативным решением, применяемым в оптических системах дальнего действия, является периодическая установка оптических усилителей вдоль линии связи. Среди существующих решений наиболее широко используется волоконный усилитель, легированный эрбием 27 (EDFA - Erbium Doped Fiber Amplifier). EDFA обычно работают в С-диапазоне (1530-1565 нм), но в продаже также имеются модели с L-диапазоном (1565-1625 нм). Оптическое усиление в EDFAS основано на процессе стимулированного излучения, как и в лазерах. Выбор иона эрбия (Er^{3+}) в качестве легирующей добавки обусловлен тем фактом, что разница между двумя его энергетическими уровнями соответствует длинам волн, близким к 1550 нм, что является самой низкой полосой ослабления в волокне. Типичная архитектура EDFA представлена на рис. 2.2.3.1(b). Лазер с накачкой, работающий на длинах волн 980 или 1480 нм, представляет собой подключается к легированному волокну с помощью мультиплексора WDM. И сигнал, и накачка распространяются через EDF, что приводит к усилению сигнала. Наконец, накачка снова отделяется от сигнала с помощью демультиплексора WDM. Обычно на выходе усилителя устанавливается изолятор, предотвращающий попадание света обратно в усилитель из-за высокой выходной мощности. Назначение оптических усилителей заключается в придании оптического усиления входным сигналам. Естественно, это усиление ограничено сигналом накачки и свойствами усиливающей среды [20].

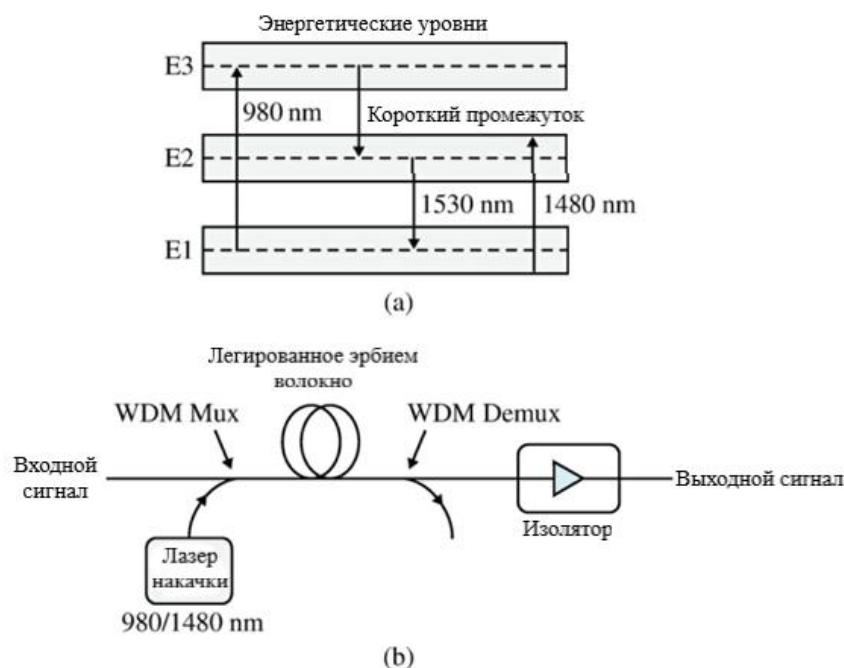


Рисунок 2.6 – Усилитель EDFA: степень энергии (а), архитектура (б)

На рис. 2.6 (а) показаны уровни энергии ионов Er^{3+} на кремнеземе, участвующих в процессе усиления EDFA. Необходимо получить большую плотность в уровне E2, чтобы способствовать процессу стимулированного излучения при переходе от уровня E2 к уровню E1. Такая инверсия населенности может быть достигнута двумя способами. Первый способ заключается в перекачке ионов с уровня E1 на уровень E3 при длине волны 980 нм. Поскольку время жизни ионов в уровне E3 невелико ($\tau_{32} = 10$ мкс), ионы быстро переходят в уровень E2 в процессе спонтанного излучения. Второй способ заключается в перекачке ионов непосредственно в уровень E2 при 1480 нм, где время жизни ионов больше ($\tau_{21} = 10$ мс). В целом, накачка при длине волны 980 нм более эффективна, обеспечивая больший коэффициент усиления и снижая уровень шума. Кроме того, 980 нм накачка также облегчает мультиплексирование накачки, поскольку она находится дальше от сигнальных каналов с длиной волны 1550 нм. С другой стороны, поскольку оптоволокно имеет меньшее затухание при длине волны 1480 нм, чем при длине волны 980 нм, накачка на длине волны 1480 нм рекомендуется в конкретных приложениях, связанных с дистанционной накачкой, например, во враждебных зонах, где оптические накачки распространяются вдоль сигнала по передающему волокну.

Рамановский оптический усилитель (ROA) представляет собой устройство, которое использует эффект комбинационного рассеяния света, известного как рамановское рассеяние, для усиления оптического сигнала. Этот физический процесс происходит в оптическом волокне, выступающем как нелинейная среда. Основной принцип работы основан на взаимодействии

между мощным накачивающим лазерным излучением и сигналом, распространяющимся по волокну. Благодаря этому взаимодействию энергия от накачки передается сигналу, увеличивая его мощность.

Рамановское рассеяние — это нелинейный оптический процесс, при котором свет взаимодействует с молекулами среды, вызывая их вибрационные возбуждения. При этом происходит сдвиг частоты фотонов света, который может быть либо в сторону меньшей энергии (стоксовый сдвиг), либо в сторону большей (антистоксовый сдвиг). В рамановских усилителях используется именно стоксовое рамановское рассеяние, так как оно позволяет передать энергию от лазерного накачивающего излучения к оптическому сигналу, усиливая его.

Для работы рамановского усилителя в качестве среды используется оптическое волокно, поскольку оно обладает высоким уровнем нелинейности и обеспечивает достаточную длину взаимодействия света с материалом. Лазерная накачка вводится в волокно либо в том же направлении, что и усиливаемый сигнал (совпадающая накачка), либо в противоположном (встречная накачка). Выбор направления накачки зависит от требований к системе, таких как стабильность усиления, уровень шума и протяженность линии связи.

Когда накачивающий лазер испускает световую волну определенной частоты, этот свет взаимодействует с атомами в волокне, вызывая их колебания. Если одновременно с этим через волокно проходит слабый оптический сигнал с частотой, сдвинутой на рамановскую частоту (которая определяется материалом волокна), энергия накачивающего света частично передается этому сигналу, усиливая его. Этот процесс распространяется по всей длине волокна, что делает рамановский усилитель эффективным для использования на больших расстояниях.

Одним из ключевых преимуществ рамановского усилителя является его широкополосность. В отличие от других типов усилителей, таких как эрбиевые волоконные усилители (EDFA), которые работают в фиксированных диапазонах длин волн, рамановские усилители могут быть настроены на усиление в любом диапазоне, соответствующем частоте накачивающего лазера. Это особенно важно для современных оптических систем связи, где требуется одновременно усиливать множество каналов, передаваемых на различных длинах волн в рамках технологии мультиплексирования с разделением по длине волны (WDM).

Еще одним важным аспектом работы рамановского усилителя является то, что его усиление может быть распределенным. В этом случае накачка вводится в волокно, используемое непосредственно для передачи сигнала. Это позволяет уменьшить потери сигнала на больших расстояниях, улучшить отношение сигнал/шум и повысить общую пропускную способность системы связи. В отличие от точечного усиления, распределенное усиление снижает необходимость установки дополнительных усилительных станций на магистральных линиях связи.

Однако рамановские усилители имеют свои особенности и ограничения. Эффективность усиления зависит от мощности накачивающего лазера, длины взаимодействующего волокна и параметров материала, таких как нелинейный коэффициент. Для достижения высокого уровня усиления требуется мощная накачка, что может приводить к нежелательным эффектам, таким как стимулированное комбинационное рассеяние или перегрев волокна. Также важно учитывать, что рамановское усиление сопровождается генерацией шума, известного как рамановский шум, который может ограничить качество сигнала в системе.

В современных телекоммуникационных системах рамановские усилители находят применение в магистральных линиях связи, подводных кабелях и в сетях с высокой плотностью каналов. Они особенно полезны для компенсации потерь сигнала в длинных сегментах оптического волокна, где установка традиционных усилителей невозможна или экономически нецелесообразна. Использование рамановских усилителей позволяет увеличить дальность передачи сигнала, повысить энергоэффективность систем связи и поддерживать стабильную работу в условиях высокой нагрузки.

Для оптимальной работы рамановского усилителя требуется точная настройка параметров накачки, включая мощность и длину волны, а также выбор подходящего волокна. Например, стандартные одномодовые волокна часто используются для передачи сигнала, однако специально разработанные нелинейные волокна могут значительно повысить эффективность рамановского усиления за счет увеличенного нелинейного коэффициента. Кроме того, в системах с распределенным усилением важно учитывать длину волокна и потери накачки, чтобы обеспечить равномерное усиление по всей линии.

Таким образом, принцип работы рамановского оптического усилителя основан на передаче энергии от накачивающего лазера к усиливаемому сигналу через рамановское рассеяние в волокне. Это делает его мощным инструментом для современных телекоммуникационных сетей, предоставляя гибкость, широкополосность и возможность работы на больших расстояниях. Однако для эффективного использования этой технологии требуется тщательное проектирование и учет ее особенностей, таких как нелинейные эффекты, шумы и потери.

Одной из распространённых конфигураций усилителя является рамановский усилитель. Для обеспечения усиления в диапазоне длин волн, который зависит от длины волны накачки, в этом усилителе используется обычное легированное волокно, которое может быть с одновременной или встречной накачкой. В основе усилителя комбинационного рассеяния света лежит прямое или обратное комбинационное рассеяние света. Длина волны источника накачки обычно выбирается примерно на 100 нм ниже длины волны, на которой требуется усиление.

Фотоны, излучаемые лазером накачки, сталкиваются и поглощаются молекулами или атомами волокна при прохождении через него. В результате атомы или молекулы возбуждаются до более высоких энергетических уровней. Поскольку они являются нестабильными состояниями, более высокие энергетические уровни быстро переходят в более низкие промежуточные энергетические уровни, высвобождая энергию на более низких частотах в виде фотонов, распространяющихся в любом направлении. Это усиливает шум в волокнах и часто называется спонтанным комбинационным рассеянием или Стоксовым рассеянием [21].

Изменение энергии меньше, чем первоначальная энергия, поглощенная при возбуждении молекул, поскольку молекулы распадаются до промежуточного энергетического уровня колебаний. Поскольку $\Delta f = \Delta E/h$, частота фотонов определяется этим переходом энергии из возбужденного состояния на промежуточный уровень. Это влияет на форму и расположение зависимости комбинационного усиления от частоты и известно как стоксовский сдвиг частоты. Оставшаяся энергия волокон высвобождается в виде фоонов, которые представляют собой молекулярные колебания, от промежуточного уровня до основного. Кривая усиления имеет широкий спектральный диапазон - около 30 ТГц, поскольку существует большой диапазон более высоких уровней энергии [21]. Во время вынужденного комбинационного рассеяния сигнальные фотоны совместно распространяются по спектру кривой усиления частоты и получают энергию от волны Стокса, что приводит к усилению сигнала.

2.6 Селективный переключатель длины волны (WSS)

Передача светового потока между узлами осуществляется по оптическому мультиплексору ввода и вывода. Основным компонентом ROADM является переключатель с выбором длины волны (WSS), логическая работа которого показана на рис. 2.7

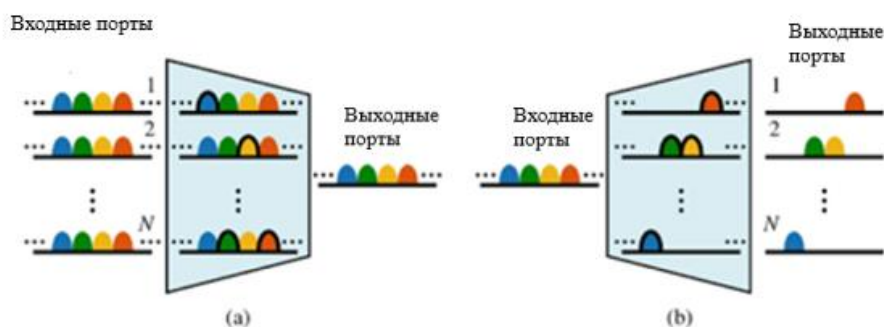


Рисунок 2.7 - Мультиплексор WSS (a) и демультиплексор WSS (b)

Работая как мультиплексор, WSS может выбирать любой набор длин волн из любого из своих входных портов и направлять его на уникальный

выходной порт. Работая в качестве демультиплексора, WSS способен выбирать любой набор длин волн из уникального входного порта и направлять его в выходные порты [21].

Плата WSS также включает различные защитные механизмы, такие как изоляция оптических каналов и фильтры для подавления нежелательных сигналов. Это предотвращает интерференцию между длинами волн и минимизирует влияние внешних факторов, таких как электромагнитные помехи. Эти защитные меры особенно важны в условиях высокой плотности сигналов, где даже небольшие ошибки могут приводить к значительным потерям данных.

Важной характеристикой конструкции платы является её модульность. Это позволяет интегрировать её в системы различного масштаба и конфигурации, начиная от простых точек подключения до сложных магистральных сетей. Модульная архитектура также облегчает обслуживание, так как отдельные компоненты могут быть заменены или обновлены без необходимости замены всей платы. Например, если какой-либо элемент перестаёт работать или его характеристики устаревают, он может быть заменён более современным аналогом без ущерба для работы всей системы.

С точки зрения физической конструкции плата WSS представляет собой компактное устройство, способное работать в сложных условиях. Её корпус обычно выполнен из материалов, устойчивых к воздействию внешних факторов, таких как вибрации, пыль или повышенная температура. Это особенно важно для использования в магистральных узлах связи, где оборудование может подвергаться воздействию неблагоприятных условий. Компактность и высокая плотность интеграции позволяют использовать плату в условиях ограниченного пространства, что также является важным фактором для современных операторов связи.

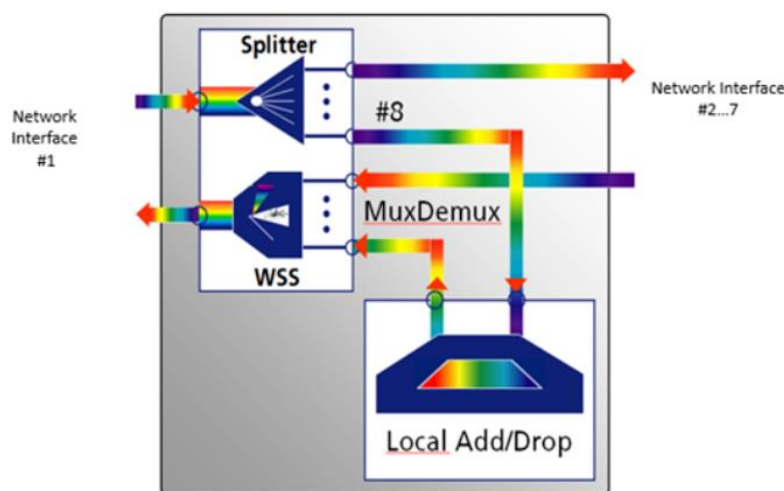


Рисунок 2.8 – Принцип работы ROADM

На рис. 2.8, реконфигурируемый оптический мультиплексор как правило, состоит из двух основных функциональных элементов: разделителя длин волн и WSS. В каждом узле соединения имеется столько модулей ROADM, сколько ступеней в узле. (Узел с 5 градусами равняется модулю ROADM 5 в узле). Среди нескольких желаемых свойств ROADM классифицируются в соответствии с конкретными признаками: бесцветные, всенаправленные и бесконфликтные.

Простые ROADM содержат по одному WSS для каждого направления, также называемому «один градус». Длины волн по-прежнему назначаются, и используются фиксированные приемопередатчики для добавления/удаления. Бесцветные ROADM устраняют это ограничение: с помощью таких мультиплексоров любой порт может иметь любую длину волны или цвет. Для работы с бесцветными фильтрами не требуется никаких рулонов, так как вся настройка осуществляется с помощью программного обеспечения. Для работы с бесцветными фильтрами необходимо установить фильтрующие модули. [21]

Всенаправленная конструкция устраняет дополнительные ограничения ROADM. При использовании всенаправленных ROADM отпадает необходимость в физическом повторном подключении волокон передачи, поскольку нет ограничений в отношении направления, например, на юг или север. Всенаправленные ROADM являются наиболее распространенной конструкцией ROADM, поскольку они позволяют добавлять/отбрасывать длину волны из поддерживаемой сети ITU на любом линейном интерфейсе. В случае варианта только с всенаправленным интерфейсом порты добавления и отбрасывания зависят от определенной длины волны. При использовании опции «бесцветный», порты также могут не зависеть от длины волны. Всенаправленная технология в основном используется для перенаправления длин волн на другие порты, необходимые для восстановления. Возможны и другие применения, например, в ситуациях, когда полоса пропускания зависит от потребности. Мобильные устройства, не поддерживающие функцию всенаправленности, имеют некоторые ограничения в отношении гибкости

Несмотря на то, что ROADM - бесцветные и всенаправленные, они уже обладают большой гибкостью, две длины волн, использующие одну и ту же частоту, все еще могут сталкиваться на реконфигурируемом оптическом мультиплексоре. Бесконфликтные ROADM обеспечивают специальную внутреннюю структуру, позволяющую избежать такой блокировки [21].

Плата WSS (Wavelength Selective Switch) для ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) представляет собой сложное инженерное решение, которое играет ключевую роль в современных оптических сетях связи. Она предназначена для управления оптическими сигналами, позволяя перенаправлять и фильтровать различные длины волн в многоканальных системах передачи данных. Основная функция платы заключается в обеспечении гибкости сети, позволяя операторам настраивать маршруты

трафика и перераспределять ресурсы без необходимости физического вмешательства. Рассмотрим, из чего состоит такая плата и как взаимодействуют её компоненты.

Центральным элементом платы WSS является оптический коммутатор, который управляет сигналами на уровне отдельных длин волн. Этот компонент позволяет направлять определённые длины волн в различные направления в зависимости от заданных параметров. Коммутатор включает сложные механизмы для анализа и управления оптическими сигналами, такие как дифракционные решётки и зеркальные системы. Дифракционные решётки разделяют входящие оптические сигналы на отдельные длины волн, а зеркала, управляемые микромеханическими системами или другими технологиями, перенаправляют эти длины волн в заданные направления. Это позволяет выбирать и маршрутизировать определённые длины волн, обеспечивая высокую степень контроля над оптическими потоками.

Другим ключевым элементом является модуль управления. Этот блок отвечает за обработку команд, поступающих от оператора сети или автоматизированных систем управления. Модуль управления включает специализированные микроконтроллеры или процессоры, которые анализируют текущую конфигурацию сети и принимают решения о перенастройке маршрутов. Этот процесс включает сложные алгоритмы обработки данных, которые учитывают такие параметры, как загруженность каналов, приоритеты трафика и текущая топология сети. Модуль управления также координирует работу других компонентов платы, включая механические и оптические элементы, что обеспечивает синхронизацию их действий.[21]

Оптические входы и выходы платы играют важнейшую роль в обеспечении её функциональности. Эти элементы включают оптические разъёмы и волоконно-оптические компоненты, которые передают сигналы с минимальными потерями. Входные элементы принимают оптические сигналы из линий связи, после чего они проходят через дифракционные решётки и другие обработчики. Выходные элементы обеспечивают передачу обработанных сигналов в другие части сети. Для обеспечения высокой производительности плата включает системы компенсации потерь, такие как усилители на основе волокон с добавлением редкоземельных элементов, например, эрбия. Это позволяет минимизировать затухание сигнала, возникающее при прохождении через оптические и механические компоненты.

Система охлаждения и энергоснабжения также являются важной частью конструкции платы. Работа микромеханических систем и модулей управления требует подачи электрической энергии, а интенсивная обработка сигналов может приводить к выделению тепла. Поэтому плата оснащается системами отвода тепла, такими как радиаторы или активные охлаждающие элементы. Эти системы обеспечивают стабильность работы платы в условиях высоких нагрузок, что особенно важно для её использования в центрах

обработки данных или магистральных линиях связи, где стабильность и надёжность критически важны.

Ещё одним важным элементом платы является программное обеспечение, встроенное в модуль управления. Оно играет роль интерфейса между пользователем и аппаратной частью платы, позволяя конфигурировать её параметры, контролировать состояние и вносить изменения в маршрутизацию. Программное обеспечение также может включать элементы машинного обучения для прогнозирования изменений нагрузки и оптимизации работы сети. Например, оно может анализировать исторические данные о трафике и предсказывать пиковые нагрузки, позволяя заранее перенаправлять ресурсы и избегать перегрузок.

Система мониторинга и диагностики на плате обеспечивает контроль над состоянием устройства и сети в целом. Оптические датчики измеряют такие параметры, как уровень мощности сигнала, соотношение сигнал/шум и температура. Эти данные передаются в модуль управления, где анализируются в реальном времени. Если система обнаруживает аномалии, такие как снижение уровня сигнала или превышение температуры, она может автоматически инициировать корректирующие действия или оповестить оператора. Это повышает надёжность сети и уменьшает время простоя, поскольку проблемы могут быть выявлены и устранены до их эскалации.[21]

3 Рефлектометрический анализ и расчет бюджета мощности оптической линии.

3.1 Рефлектометрический анализ оптического волокна. Расчет вносимого затухания для оптического сигнала

При построении любого оптического канала особенно для мультиплексированного WDM сигнала и на дальних расстояниях необходимо производить расчет запаса мощности оптического сигнала. Для того что бы подобрать необходимые характеристики усилителя, компенсатора дисперсии, лазерного излучателя и других компонентов ROADM мультиплексора важно произвести анализ существующей оптической среды. Для произведения таких расчетов оптимальным является оптический рефлектометр.

Важно использовать оптический рефлектометр (OTDR – optical time domain reflectometr), чтобы убедиться в исправности волоконно-оптической сети. Благодаря тестированию различных компонентов кабеля, таких как точки подключения, изгибы и стыки, OTDR-тестирование позволяет оценить производительность волоконно-оптических кабелей от начала до конца. Рефлектометрия является эффективным методом для инженеров и техников, позволяющий оценить состояние волоконно-оптических кабелей. В рефлектометрах используются специализированные лазерные диоды для подачи мощных световых импульсов в волокно. Эти световые импульсы проходят через соединители, разрывы, трещины, сращивания и конец волокна, проходя вниз по волокну. Такие события приводят к обратным отражениям в рефлектометре, поскольку они изменяют показатель преломления. Рефлектометр тщательно измеряет эти отражения, также называемые отражениями Френеля, для определения точного местоположения этих явлений в оптоволоконной линии связи. Небольшой процент светового импульса рассеивается в разных направлениях из-за естественной структуры волокна и микроскопических дефектов в стекле. Мы называем это явление обратным рассеянием. Рефлектометр собирает подробную информацию о свойствах волокна, таких как затухание (вносимые потери) и возможные дефекты, путем измерения возвращающегося рассеянного света в дополнение к отражениям.

В данной работе были произведен экспериментальный анализ образца оптического волокна используемой в Казахстанской сети. Для этого подобран отрезок оптоволоконна в 2,787 км в качестве искусственной линии. Данный предмет изображен на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Искусственная оптоволоконная линия

Согласно ГОСТ 52266-2020 максимальное значение коэффициента затухания оптического кабеля с одномодовыми волокнами имеют следующие показатели, указанные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Требования к затуханию оптоволоконного кабеля

Назначение оптоволоконного кабеля	Коэффициент затухания на разных длин волн, не более дБ/км, нм	
	1310	1550
Для линии с повышенным требованием к коэффициенту затухания	0,34	0,19
Для других применений	0,40	0,22
Для оптического кабеля в буферном покрытии	0,6	0,4

Значения, представленные в таблице, могут варьироваться в незначительных пределах. Например, для сигнала, передаваемого на длине волны 1550 нм, нормальным считается километрическое затухание в диапазоне от 0,18 до 0,23 дБ/км, в то время как для сигнала на длине волны 1310 нм допустимым будет затухание в пределах 0,32 – 0,36 дБ/км.

Диаметр модового поля одномодовых ОВ на длине волны 1310 нм должен быть, мкм:

- для ОВ категории G.652;
- для подкатегории G.652D — $(9,2 \pm 0,4)$;
- подкатегории G.652B — $(9,2 \pm 0,5)$;
- для ОВ категории G.657;
- для подкатегории G.657A1 — $(9,2 \pm 0,4)$;
- подкатегорий G.657A2, G.657B2 и G.657B3 — $(8,6 \pm 0,4)$.

Для исключения воздействия нежелательных затуханий в связи с повреждениями или загрязнениями наконечника оптоволокну необходимо произвести предварительную проверку микроскопом и очистку сердцевины волокна. Для этого был использован цифровой микроскоп и получен следующий результат, изображенный на рисунке 3.2.

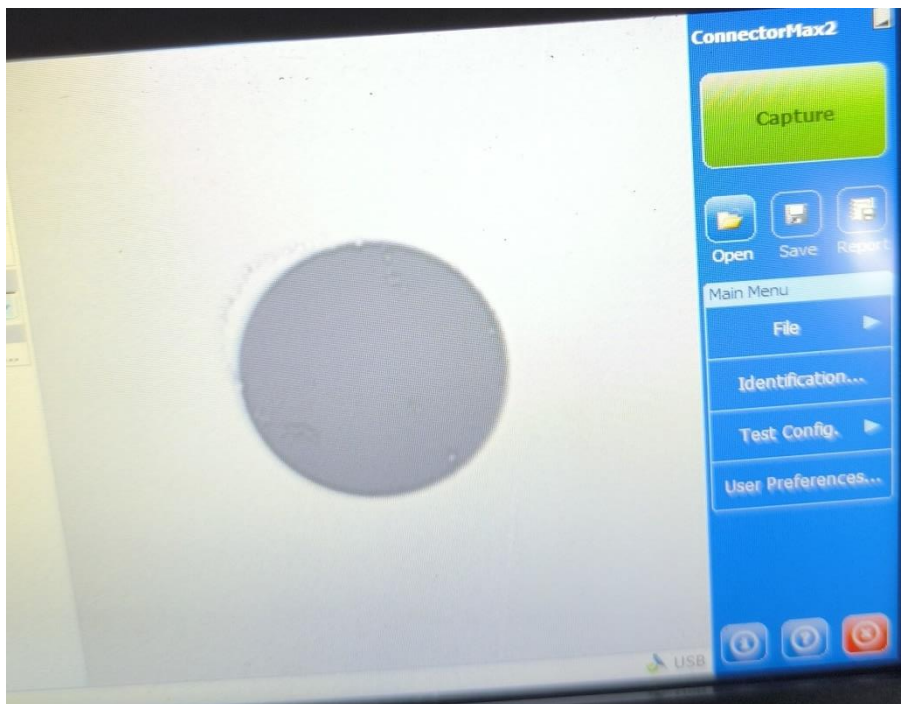


Рисунок 3.2 – Сердцевина оптоволокну под микроскопом

Убедившись в целостности сердцевины оптоволокну можно приступить к измерениям его характеристик. Для расчёта затухания оптического сигнала на линии длиной 2787 м (2,787 км) при длине волны 1550 нм, необходимо использовать известные коэффициенты затухания для длины волны 1550 нм в стандартном одномодовом оптическом волокне (SMF – single mode fiber).

Стандартный коэффициент затухания для оптического волокна типа SMF при длине волны 1550 нм составляет примерно:

$$a = 0.19$$

где a – коэффициент затухания в оптоволокну при 1550 нм.
Затухание рассчитывается по формуле:

$$S = a \times L \quad (3.1)$$

где L – длина оптической линии = 2,787 км.

a – коэффициент километрического затухания = 0.19

Подставляем значения оптической линии в нашу формулу (3.1):

$$S = 0,19 \times 2,787 \text{ км} = 0.52953 \text{ дБ} \quad (3.2)$$

В итоге получаем что для данной искусственной линии затухание мощности оптического сигнала составит около 0.53067 дБ не учитывая вносимые затухания на стыках патчкордов и погрешности самого прибора.

Точный анализ данной искусственной линии оптического волокна можно получить применив ранее описанный рефлектометр, для этого воспользуемся лазерным источником с выходным сигналом в 1550нм и прибором MTS8000. Результаты рефлектометрического анализа указаны на рисунке 3.3.

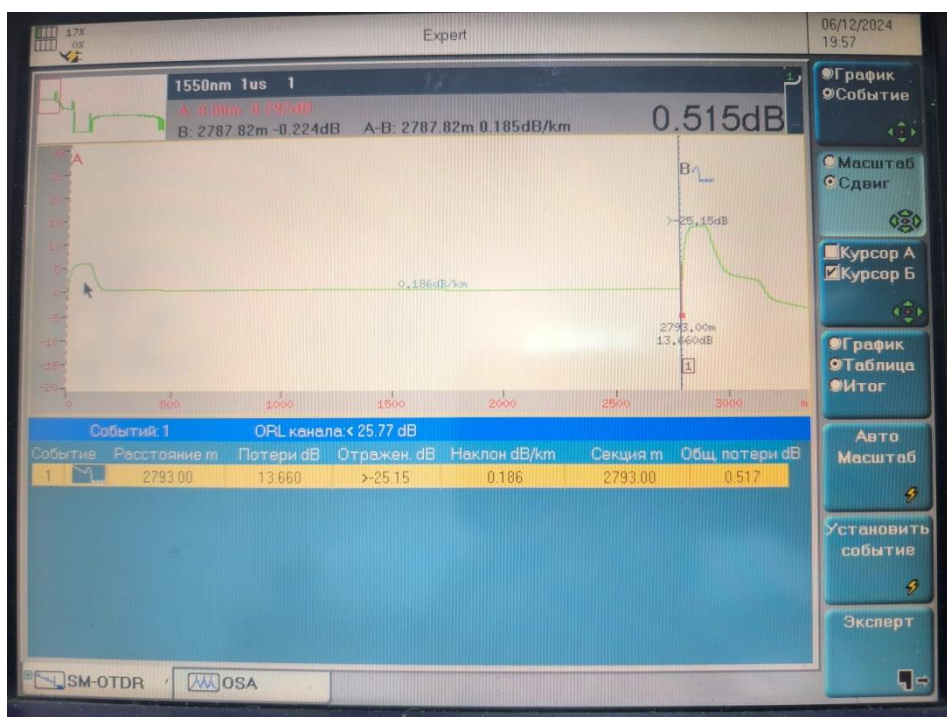


Рисунок 3.3 – Показатели с рефлектометрического анализа искусственной линии

В данном графике курсоры А и Б указывают на отрезок в котором происходит измерения затухания оптической мощности. Курсор А установлен на начальной отметке – 0 м. Курсор Б установлен на конечной отметке – 2,787 км. Таким образом, общие потери для этой искусственной линии на длине волны 1310 полученные с помощью рефлектометрии показывают уровень сигнала в 0.517 дБ. Измерим погрешность сравнив результаты рефлектометрии и расчета:

$$\Delta = X - X_{\text{д}} = 0.52953 - 0,517 = 0,001253 \text{ дБ} \quad (3.3)$$

В итоге погрешность составила 0,001253 дБ что является незначительным для такого расстояния и считается приемлемым при составлении запаса мощности для DWDM сети.

Далее необходимо рассчитать затухание мощности оптического сигнала при длине волны 1310 нм, что является часто используемой длиной волны на коротких дистанциях. Стандартный коэффициент затухания на километр для оптического кабеля одномодового типа SMF при длине волны 1310 нм составляет примерно:

$$a = 0,34$$

где a – коэффициент затухания в оптоволокне при 1310 нм.
Подставляем значения оптической линии в нашу формулу (3.1):

$$S = 0,34 \times 2,787 \text{ км} = 0,94758 \text{ дБ} \quad (3.4)$$

В результате получаем что для данной длины оптоволокна затухание мощности оптического сигнала составит 0.94758 дБ не учитывая вносимые затухания на стыках патчкордов и погрешности самого прибора. Можно заметить что затухания мощности оптического сигнала при 1310 нм выше чем вносимые при длине волны 1550 нм что делает длину волны 1550 нм оптимальным для мультиплексирования WDM.

3.2 Расчет бюджета мощности для ROADM сети

Развитие сетей DWDM помогло решить проблему нехватки спектра. Проектирование сетей DWDM - это сложная задача. Область проектирования линий связи DWDM связана с проектированием линии связи с соответствующим размещением компонентов и последующим обеспечением того, чтобы эта линия была приемлемой с точки зрения значений мощности в каждом месте соединения. На рисунке ниже приведено краткое схематическое изображение расположения компонентов в сети DWDM.

Термин "уровень" узла в ROADMs относится к количеству сетевых подключений, которые исходят от узла или заканчиваются на нем. Порты добавления и удаления карт ROADM могут быть либо подключены к локальному порту добавления и удаления, либо соединены между собой для обеспечения сквозного трафика в обоих направлениях. Нам нужны N карт ROADM для каждого градуса узла ROADM, в дополнение к другой карте ROADM в локальном направлении добавления/удаления, которая обеспечивает функциональность без указания направления. С помощью карты ROADM без указания направления можно динамически добавлять или удалять канал в любом направлении (градусах). Например, чтобы сформировать центральное оптическое перекрестное соединение, нам нужно

$4+1$ (ненаправленное) = 5 дорожных узлов, если у нас есть ненаправленный дорожный узел степени 4. Сигнал от MDU передается во всех направлениях с помощью всенаправленного

EDFA, известные как усилители-бустеры, расположены перед каждым участком ROADM для повышения уровня сигнала перед передачей по оптоволоконной линии связи. Для усиления сигнала, прошедшего по длинному каналу связи и затем поданного на принимающий узел ROADM, перед узлами ROADM устанавливаются предварительные усилители. Вход и выход сигнала должны соответствовать требованиям, предъявляемым к ограничениям усилителя. ROADM, и в сети можно выделить определенные каналы.

Технические характеристики системы DWDM в первую очередь оцениваются в зависимости от соответствующих характеристик длины волны. Обсуждаемая система DWDM работает в диапазоне 1550 нм, который охватывает диапазон от 1530 до 1565 нм в диапазоне C. 50 ГГц - это интервал для анализа производительности 80 каналов. Первая принимаемая во внимание частота канала составляет 192 ТГц. Это конечная частота канала.

$$W_{80} = 192 \text{ ТГц} + 50 \text{ ТГц} \times 79 = 195,95 \text{ ТГц} \quad (3.5)$$

При характеристике волокна используются коэффициент цветовой дисперсии и коэффициент затухания, измеренные на километр длины волокна.

Когда сигнал передается от порта ввода и вывода каждого компонента к общему порту на другом конце компонента, спецификация ввода и вывода к общему порту включает вносимые потери в MDU, ROADM. Значения вносимых потерь приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Потери от порта ввода и вывода к общему порту

Степени ROADM	Параметры потерь в узлах		
	MDU (dB)	Всенаправленный ROADM (dB)	ROADM (dB)
2	14	4	4
4	14	7	7
8	14	7	7

Не менее важными параметрами которые стоит учитывать являются вносимые потери на коннекторах и чувствительность XFP модуля который принимает оптический сигнал. Вносимые потери на коннекторах составляет 0,5 дБ, а чувствительность модуля достигает -15 дБ и – 25дБ в пределах нормы.

В таблице 3.3 приведены технические характеристики усилителей, которые действительны для комбинированных значений мощности. например, общие значения мощности после объединения всех 80 каналов,

проходящих через EDFA. Для улучшения работы системы необходимо следить за тем, чтобы мощность не превышала указанных граничных условий, которые являются всего лишь номинальными значениями. Выходная мощность EDFA должна находиться в пределах диапазона насыщения.

Таблица 3.3 – Технические характеристики усилителя

Типы мощности усилителя	Значения мощности
Фиксированный прирост	22 дБ
Диапазон усиления	от 15 дБ до 30 дБ
Показатель шума	5.5 дБ
Максимальная входная мощность ($P_{\text{вх макс}}$)	5 дБ
Максимальная исходящая мощность ($P_{\text{ис макс}}$)	20 дБ
Минимальная входная мощность ($P_{\text{вх мин}}$)	-35 дБ
Минимальная исходящая мощность ($P_{\text{ис мин}}$)	-5 дБ

Чтобы компенсировать рассеивание сигнала в приемнике, используются компоненты DCM (Dispersion compensation module – компенсатор дисперсии). В таблице 5 представлен ряд спецификаций DCM, доступных на рынке. Для каждого модуля, используемого в конструкции, учитываются типичные потери в DCM, составляющие 4 дБм. Коэффициент дисперсии волокна, используемого в DCM, составляет 17 пс/нм-км. После компенсации остаточная дисперсия должна составлять от -510 до 1020 пс/нм. Характеристики компенсаторов дисперсии указаны в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Характеристики компенсаторов дисперсии

Модули DCM	Компенсация Дисперсии (пс/нм)	Вносимые потери (дБ)
30 км	-510	4
40 км	-680	4
60 км	-1020	4
80 км	-1360	4
120 км	-2040	4

3.3 Расчет необходимого мощности исходящего сигнала для каждого канала

Проектирование линий связи предполагает размещение контроллеров постоянного тока и оптических усилителей (ОА) для каждой оптоволоконной линии, чтобы гарантировать адекватное снижение всех оптических помех. Центральный офис с площадкой ROADM и промежуточной последовательностью волоконных линий с известными потерями и длиной - это то место, где начинается и заканчивается оптоволоконная линия. Промежуточными конечными точками пролетных строений являются автодороги, OAS и DCM. Общая цель заключается в снижении потерь электроэнергии и затрат на оборудование.

Основной задачей этого расчета является проектирование сети DWDM на 80 каналов, каждый из которых передает данные со скоростью 10 Гбит/с. С учетом расчетов для каждого канала, для определения выходной мощности усилителя на канал в N-канальной сети DWDM используется следующая формула:

$$P_{ис} = P_{вх} + G_{прием} \quad (3.6)$$

$$P_{ис/к} = P_{ис макс} - 10 \log_{10} K \quad (3.7)$$

при значении $K = 80$ каналов получаем:

$$P_{ис/к} = 20 - 10 \log_{10} 80 \quad (3.8)$$

$$P_{ис/к} = 20 - 19.03 = 0.97 \approx 1$$

Формула для расчета выходной мощности на канал такова: выходная мощность (дБм) + коэффициент усиления (дБ) = 1 дБм.

Следовательно, максимальная выходная мощность для расчета по одному каналу в 80-канальном DWDM-канале должна составлять 1 дБм. Регулировка усиления необходима для поддержания выходной мощности на уровне 1 дБм на канал в соответствии с входной мощностью EDFA. Кроме того, при типичном NF (показатель шума – Noise Figure) 5.5 дБ коэффициент усиления должен составлять от 15 до 30 дБ.

Рассмотрим канал связи DWDM с двумя узлами ROADM на концах передатчика и приемника и промежуточным проходным узлом ROADM. Степень проходных узлов ROADM на Tx и Rx равна 2, в то время как степень проходного узла ROADM равна 4. Линия связи состоит из двух отрезков SMF-волокна длиной L1 и L2. Как указывалось ранее, ROADM обычно используются в сочетании с усилителями и предварительными усилителями. В то время как P1 и P2 являются предварительными

усилителями, В1 и В2 являются усилителями-бустерами. Транспондер обеспечивает мультиплексор с входным сигналом 0 дБм. Для отрезков L1 И L2 с расстоянием 80 и 120 км затухание оптической мощности будет следующей:

$$L1_{\text{затухание}} = 0.19 \frac{\text{дБ}}{\text{км}} \times 80 \text{ км} = 15,2 \text{ дБ} \quad (3.9)$$

$$L2_{\text{затухание}} = 0.19 \frac{\text{дБ}}{\text{км}} \times 120 \text{ км} = 22,8 \text{ дБ} \quad (3.11)$$

Дисперсия для данных отрезков оптического волокна рассчитывается по формуле:

$$D = L \times f \quad (3.12)$$

где L - длина оптического волокна.

f – коэффициент дисперсии равный $17 \frac{\text{пс}}{\text{нс} \times \text{км}}$

Подставляя наши значения в формулу 3.12 мы получаем:

$$D1 = 80 \text{ км} \times 17 \frac{\text{пс}}{\text{нс} \times \text{км}} = 1360 \frac{\text{пс}}{\text{нс}} \quad (3.13)$$

$$D2 = 120 \text{ км} \times 17 \frac{\text{пс}}{\text{нс} \times \text{км}} = 2040 \frac{\text{пс}}{\text{нс}} \quad (3.14)$$

В таком случае общая дисперсия связи для всего пути оптического волокна составит:

$$D_{\text{общ}} = D1 + D2 = 1360 \frac{\text{пс}}{\text{нс}} + 2040 \frac{\text{пс}}{\text{нс}} = 3400 \frac{\text{пс}}{\text{нс}} \quad (3.15)$$

Конец L1 имеет 80-километровый компенсатор дисперсии DCM, что компенсирует высокую дисперсию в 3400 л.с./нм. Для проектирования системы WDM необходимо разместить DCM на выводах L1 и L2. Следовательно, дисперсия в приемном узле с DCM теперь равна;

$$D = D_{\text{общ}} - 2 \times L \times f \quad (3.16)$$

$$D = 3400 \frac{\text{пс}}{\text{нс}} - 2 \times 80 \text{ км} \times 17 \frac{\text{пс}}{\text{нс} \times \text{км}} = 680 \frac{\text{пс}}{\text{нс}} \quad (3.17)$$

Потеря мощности сигнала в диапазоне определяет, куда поместить усилители EDFA. Максимальное усиление EDFA составляет 30 дБ, т.е. для достижения выходной мощности 1 дБм на канал требуется минимальная входная мощность -29 дБм (-29 дБ + 30 дБ = 1 дБ). Выходные сигналы В1,

B2, P1 и P2 должны поддерживаться на уровне 1 дБ на канал, поскольку все они являются усилителями EDFA.

Потери для канала B1 рассчитываем по формуле:

$$B1 = P_{\text{вх1}} - MDU_{\text{потери}} - ROADM_{\text{потери}} - ROADM_{\text{всн}}_{\text{потери}} \quad (3.18)$$

$$B1 = 0 - 14\text{дБ} - 4\text{дБ} - 4\text{дБ} = -22\text{дБ} \quad (3.19)$$

В итоге получаем что для канала B1 необходимо усилитель с усилением в 23дБ что бы получить удовлетворительное значение.

Потери для канала P1 рассчитываем соответственно специфики нашей сети, учитывая коннекторы:

$$P1 = 0 - L1_{\text{затухание}} - DCM_{\text{потери}} - 2 \times \text{коннектор}_{\text{потери}} \quad (3.20)$$

$$P1 = 0 - 15,2\text{дБ} - 4\text{дБ} - 1\text{дБ} = -20,2\text{дБ} \quad (3.21)$$

В итоге получаем что для канала P1 необходимо усилитель с усилением в 21,2дБ что бы получить удовлетворительное значение.

Характеристики оптической мощности для канала B2 получаем следующим образом учитывая архитектуру нашей сети:

$$B2 = P_{\text{вх1}} - ROADM_{\text{потери}} - ROADM_{2\text{стп}}_{\text{потери}} \quad (3.22)$$

$$B2 = 1\text{дБ} - 7\text{дБ} - 9\text{дБ} = -15\text{дБ} \quad (3.23)$$

В результате нам необходимо для канала B2 усилитель с усилением в 16дБ что бы получить удовлетворительное значение.

Далее рассчитаем потери для канала P2:

$$P1 = 0 - L1_{\text{затухание}} - 2 \times \text{коннектор}_{\text{потери}} \quad (3.24)$$

$$P1 = 0 - 22,8\text{дБ} - 1\text{дБ} = -23,8\text{дБ} \quad (3.25)$$

В результате получаем что для канала P2 нам необходим усилитель с значением в 24,8дБ что бы получить удовлетворительный сигнал.

3.4 Подбор необходимых компонентов и дизайн сети для компенсации дисперсии, затухания в сети ROADM

При рассмотрении значения усиления, требуемого для P1 EDFA, становится очевидным, что потребляемая мощность превышает допустимый предел и что для второго диапазона линии требуется второй линейный усилитель. Теперь решающее значение имеет определение места установки линейного усилителя. Значение OSNR на приемнике должно быть адекватным и находиться в пределах диапазона, а расположение усилителя должно исключать необходимость в дополнительных избыточных линейных усилителях в дальней части диапазона.

Стратегия, предполагающая чрезмерную нагрузку, приводит к оптимизации конфигурации интерфейса DWDM, достигаемой за счет расчета бюджета управления интерфейсом во всех диапазонах интерфейса. Представленные расчеты основаны на идеальных сценариях, без учета нелинейностей оптоволокна.

На рисунке 4 представлен подробный обзор модифицированного примера подключения, включая расположение всех необходимых компонентов. В таблице 3.5 представлены подробные результаты по мощности, OSNR и рассеиванию в каждом узле. Результаты расчета мощности основаны на одном канале. Конструкция оптимизирована с учетом будущих обновлений, что позволяет системе поддерживать 80 длин волн на волокно, пропускная способность каждой из которых составляет 10 Гбит/с.

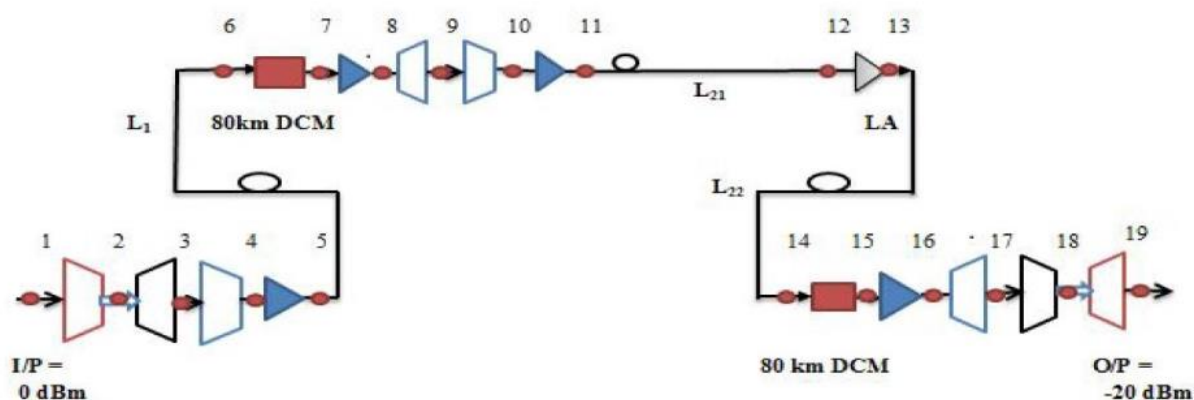


Рисунок 3.4 – Расположение компонентов ROADW сети

Таблица 3.5 – Результаты характеристик для сегментов сети ROADW

Номер Узла	Мощность (дБ)	OSNR (дБ)	Дисперсия (пс/нм)
1	0	NA	0
2	-14	NA	0
3	-18	NA	0

Продолжение таблицы 3.5

4	-22	NA	0
5	1	30.4628	0
6	-22	30.4628	1360
7	-26	30.4628	0
8	1	25	0
9	-6	25	0
10	-15	25	0
11	1	24.766	0
12	-14	24.766	865.3
13	1	24.584	865.3
14	-19	24.584	2040
15	-23	24.584	680
16	1	23.361	680
17	-6	23.361	680
18	-13	23.361	680
19	-20	23.361	680

При проектировании сетей DWDM крайне важно достичь оптимальных уровней мощности на узлах EDFA, гарантируя, что они останутся в пределах заданного диапазона. Выходная мощность на оптических усилителях должна соответствовать количеству проходящих через них каналов. Компенсация дисперсии также необходима для обеспечения надежного обнаружения сигнала на приемнике. Для достижения лучшего качества сигнала на приемнике необходимо поддерживать OSNR на уровне выше 17 дБ. Подход к проектированию, представленный в этой работе, описывает процесс проектирования канала DWDM и расчет энергопотребления. Описанный метод дает идеализированные результаты, не учитывающие потери мощности, вызванные нелинейными эффектами в волокне. Система DWDM спроектирована таким образом, чтобы охватывать все 80 длин волн, что позволяет в будущем увеличить пропускную способность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенного исследования был разработан и исследован реконфигурируемый оптический мультиплексор ввода и вывода (ROADM), предназначенный для применения в современных и будущих телекоммуникационных системах. Результаты работы показали высокую актуальность и перспективность применения таких устройств в условиях растущих требований к пропускной способности, гибкости и адаптивности телекоммуникационных сетей.

В ходе исследования были проведены эксперименты с рефлектометрией оптического волокна и расчеты, направленные на оптимизацию параметров реконфигурируемых мультиплексоров. Результаты показали, что с помощью методов многоканального мультиплексирования и применения интеллектуальных систем управления можно существенно повысить производительность устройства и его способность к эффективному управлению оптическими потоками.

Разработанные рекомендации и алгоритмы могут быть использованы для проектирования и внедрения реконфигурируемых оптических мультиплексоров в телекоммуникационные сети следующего поколения, включая сети 5G, а также в будущих сетях с высокой плотностью трафика и высоким уровнем надежности. Эти разработки позволят улучшить экономическую эффективность эксплуатации оптических сетей, снизив потребность в аппаратных ресурсах и повысив гибкость их функционирования.

Таким образом, проведенное исследование подтверждает высокую эффективность и перспективность использования реконфигурируемых оптических мультиплексоров в современных телекоммуникационных системах. Разработанные методы и алгоритмы могут существенно улучшить характеристики передачи данных в сетях связи, обеспечить более высокую гибкость и адаптивность, а также способствовать повышению экономической и эксплуатационной эффективности телекоммуникационных инфраструктур будущего.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 D. Liang, Y. Bai, P. Zhang, X. Xu and W. Cheng, "Research method for redundant optical transmission network mapping based on SDH/OTN," 2024 6th International Conference on Internet of Things, Automation and Artificial Intelligence (IoTAAI), Guangzhou, China, 2024, pp. 407-410.
- 2 L. Ma, D. Li, D. Nan and L. He, "Troubleshooting and Maintenance of SDH Optical Transmission System," 2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), Chongqing, China, 2022, pp. 1629-1632, doi: 10.1109/ITOEC53115.2022.9734655.
- 3 Daigond, Anjana & Rani.K.R, Usha & Aski, Akshata. (2021). A Review on Importance of DWDM Technology in Optical Networking.. 23. 640-646. 10.51201/JUSST/21/05298.
- 4 Diksha Sharma, Ashish Sachdeva, "Wavelength Division Multiplexing", International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE) Volume 5, Issue 5 (2016).
- 5 Joseph M. Kahn, Keang-Po Ho, "Spectral Efficiency Limits and Modulation/Detection Techniques for DWDM Systems", IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 10, NO. 2 (2014).
- 6 Samael Sarmiento, Jose A. Altabas, David Izquierdo, Ignacio Garces, Salvatore Spadaro, and Jose A. Lazaro, " Cost-Effective DWDM ROADM Design for Flexible Sustainable Optical Metro–Access Networks" J. OPT. COMMUN. NETW./VOL. 9 (2017).
- 7 M. Nooruzzaman and X. Fernando, "Simplified Nodes with Low Complexity ROADMs for Ultra-High-Capacity Networks," 2021 IEEE Photonics Conference (IPC), Vancouver, BC, Canada, 2021, pp. 1-2, doi: 10.1109/IPC48725.2021.9593026.
- 8 T. Kabilan, N. Victor jaya, "Performance Analysis of 48 Channels DWDM System using EDFA for Long Distance Communication", - Global Research and Development Journal for Engineering, volume 2, issue 3 (2017).
- 9 Sandis Spolitis, Inna Kurbatska, Vjaceslavs Bobrovs, "Comparison of C-band and Lband WDM-PON systems performance with PAM-4 modulation format", (2017).
- 10 A. Dochhan, H. Griesser, M. H. Eiselt, J.-P. Elbers, "Solutions for 80 km DWDM Systems", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGIES (2015).
- 11 Vivek Kachhatiya, Shanthi Prince, " Wavelength Division Multiplexing-Dense Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network (WDM-DWDM-PON) for Long Reach Terrain Connectivity", International Conference on Communication and Signal Processing (2016).
- 12 Pravesh Kumar Chaudhary, Ravi Kumar, Sumit Kaushik, "Review Paper on DWDM Technology", International Journal of Engineering Science and Computing, volume 8, issue 12 (2018).

13 S. Papaioannou D. Fitsios G. Dabos, " On-Chip Dual-Stream DWDM EightChannel-Capable SOI-Based MUXs/DEMUXs With 40-GHz Channel Bandwidth", IEEE photonics journal (2015).

14 J. Kundrát, O. Havliš, J. Jedlinský and J. Vojtěch, "Opening up ROADMs: Let Us Build a Disaggregated Open Optical Line System," in Journal of Lightwave Technology, vol. 37, no. 16, pp. 4041-4051, 15 Aug.15, 2019, doi: 10.1109/JLT.2019.2906620.

15 D. J. Elson et al., "Continuous 16.4-THz Bandwidth Coherent DWDM Transmission in O-band using a Single Fibre Amplifier System," in Journal of Lightwave Technology, doi: 10.1109/JLT.2024.3503764.

16 R. Parsons et al., "Silicon Photonic Integration of DWDM and Mode-Division Multiplexing for Advancing Multi-Dimensional Data Transmission," 2024 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), Charlotte, NC, USA, 2024, pp.

17 D. J. Elson et al., "115.2-THz Aggregate Bandwidth O-band Coherent DWDM Transmission over a High-density 250- μ m Coating Multicore Fibre," in Journal of Lightwave Technology, doi: 10.1109/JLT.2024.3486339.

18 J. Chen et al., "8 $\times$ 100Gbps O-band DWDM Transmitter Empowered by Comb Laser and Micro-ring Modulator Array for Optical Interconnects," 2024 IEEE 29th International Semiconductor Laser Conference (ISLC), Orlando, FL, USA, 2024, pp. 1-2, doi: 10.1109/ISLC57752.2024.10717384.

19 H. Hasegawa, "Optical networking that exploits massive wavelength/spectrum and spatial parallelisms," in Journal of Optical Communications and Networking, vol. 16, no. 11, pp. H27-H39, November 2024, doi: 10.1364/JOCN.532594.

20 T. Muciaccia, F. Gargano and V. M. N. Passaro, "A reconfigurable optical metro-access network and an innovative ROADM for efficient dynamical bandwidth allocation," 2015 Fotonica AEIT Italian Conference on Photonics Technologies, Turin, 2015, pp. 1-4, doi: 10.1049/cp.2015.0124.

21 T. Ye, J. Luo, H. Li and Y. Yao, "Design of Large-Scale OXC for the Next-Generation ROADM, Incheon, Korea, Republic of, 2024, pp. 1-6.

РЕЦЕНЗИЯ

на диссертационную работу

Сағынай Сағи Болатұлы

по ОП 7М06202 – Телекоммуникация

На тему: «Исследование реконфигурируемого оптического мультиплексора с вводом и выводом для применения в системах телекоммуникации»

Выполнено:

- а) теоритическая и практическая часть на 54 листах
- б) графическая часть 17 рисунков

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Диссертация посвящена актуальной и востребованной теме, связанной с развитием оптоволоконных систем передачи данных. Быстрое увеличение объемов передаваемой информации требует внедрения новых технологий, способных обеспечить высокую пропускную способность, надежность и гибкость в эксплуатации. В этом контексте исследование систем мультиплексирования и технологии ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) в DWDM-сетях представляет значительный научный и практический интерес.

Актуальность работы обусловлена широким распространением технологий Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM), которые являются основой современных магистральных и региональных телекоммуникационных сетей. Использование технологии ROADM позволяет повысить гибкость управления трафиком, снизить эксплуатационные затраты и увеличить масштабируемость сетей. В условиях роста потребности в высокоскоростной передаче данных исследование направлений оптимизации DWDM-сетей с применением ROADM представляется своевременным и значимым.

Оценка работы

Работа оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к научным диссертациям. Работа демонстрирует высокий научный уровень, глубину исследования и практическую значимость. Автору удалось внести вклад в развитие технологий DWDM с применением ROADM, что подтверждается результатами исследования и предложенными рекомендациями.

Магистерская диссертационная работа оценивается на оценку "отлично" (А, 90%) и магистрант Сағынай Сағи Болатұлы предлагается на академическую степень "магистра техники и технологии" по ОП 7М06202 Телекоммуникации.

Рецензент

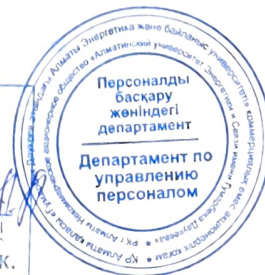
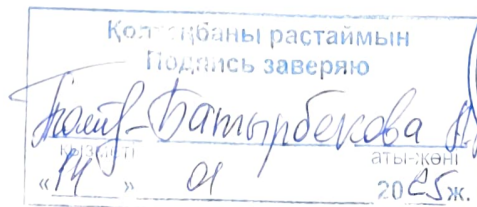
асс. проф. К.Т.К. АСЖС

(должность, уч. степень, звание)

С.Г. Ермаков Ф.И.О.

(подпись)

«14» 01 2025 г.



ОТЗЫВ

НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на диссертационную работу

Сағынай Сағи Болатұлы

по ОП 7M06202 – Телекоммуникация

На тему: «Исследование реконфигурируемого оптического мультиплексора с вводом и выводом для применения в системах телекоммуникации»

Данная магистерская диссертация посвящена актуальной проблеме, связанной с развитием технологий в области оптической связи. Работа направлена на исследование и разработку реконфигурируемого оптического мультиплексора, который способен повысить эффективность и гибкость телекоммуникационных систем. Тема исследования имеет высокую практическую и научную значимость, учитывая растущие требования к пропускной способности современных сетей.

Автор продемонстрировал глубокие теоретические знания и высокий уровень профессиональной подготовки. В работе проведен тщательный анализ современных технологий оптической мультиплексирования, рассчитаны линейные затухания для оценки параметров устройства и проведены экспериментальные исследования, подтвердившие теоретические выводы. Исследование отличается ясной структурой, четкой постановкой задач и обоснованностью выводов.

Отдельно стоит отметить способность автора критически анализировать научную литературу, выделять ключевые проблемы и предлагать оригинальные решения. Результаты исследования могут быть полезны как в научной, так и в прикладной сфере, что подтверждает практическую ценность проделанной работы.

Диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к магистерским работам, и получает оценку «отлично» (А, 90%). Магистрант Сағынай Сағи Болатұлы достоин присуждения академической степени «магистра техники и технологии» по ОП 7M06202 – Телекоммуникации.


Научный Руководитель
Аспирантура
(должность, уч. степень, звание)
Ф. И. О.
(подпись)
2025 г.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Сағынай Сағи Болатұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Исследование реконфигурируемого оптического мультиплексора с вводом и выводом для применения в системах телекоммуникации

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 2.8

Коэффициент Подобия 2: 0.5

Микропробелы: 1

Знаки из здругих алфавитов: 4

Интервалы: 8

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

09.01.2025 г.

Дата

Марксұлы С.
проверяющий эксперт

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Сағынай Сағи Болатұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Исследование реконфигурируемого оптического мультиплексора с вводом и выводом для применения в системах телекоммуникации

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 2.8

Коэффициент Подобия 2: 0.5

Микропробелы: 1

Знаки из здругих алфавитов: 4

Интервалы: 8

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

09.01.2025 г.

Дата



Таштай Е.

Заведующий кафедрой

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Сағынай Сағи Болатұлы

Тақырыбы: Исследование реконфигурируемого оптического мультиплексора с вводом и выводом для применения в системах телекоммуникации

Жетекшісі: Нуржигит Смайлов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 2.8

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0.5

Дәйексөз (35): 0.4

Әріптерді ауыстыру: 4

Аралықтар: 8

Шағын кеңістіктер: 1

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

09.01.2025 г.
Күні



Таштай Е.
Кафедра меңгерушісі