

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К. И. Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Абдувалиев Дынмухамед Абдумухамедович

Анализ многосерцевидных волокон в оптических системах дальней передачи

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

специальность 5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникация

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К. И. Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ЭТ и КТ

канд. техн. наук
Е. Таштай
"25" 05 2022 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: Анализ многосердцевидных волокон в оптических системах дальней
передачи

По специальности: Радиотехника, электроника и телекоммуникации

Выполнил:



Абдувалиев Д.А.

Рецензент
Профессор, кандидат тех-х наук

Байкенов А. С.
"25" 05 2022 г.



Научный руководитель
Лектор

Джунусов Н. А.
"23" 05 2022 г.

Қолтаңбаны растаймын
Подпись заверяю

Солтангазиев
Қызметі "25" 05 аты-жөні 2022 ж.

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Казахский национальный исследовательский технический университет имени
К.И.Сатпаева
Институт автоматизации и информационных технологий
Кафедра «Электроники, телекоммуникаций и космических технологий»
5B071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой ЭТиКТ
Е.Таштай
“ 21 “ 1811 2022г

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающемуся *Абдувалиеву Дынмухамеду Абдумухамедовичу*

Тема: *Анализ многосерцевинных волокон в оптических системах дальней передачи*

Утверждена приказом Ректора Университета № 140 от «24» 01 2022г.

Срок сдачи законченной работы «31» 05 2022г.

Исходные данные к дипломной работе: многосерцевинные волокна со скоростью 100 Тбит/с; показатель затухания волокна 0,158 дБ/км; рабочий диапазон 1260 – 1625 нм; -диаметр оболочки волокна MCF D = (140 - 240) мкм в зависимости от числа сердцевин; -расстояния между центрами сердцевин $L = (35 - 70)$ мкм в зависимости от числа сердцевин; -расстояния до защитной оболочки $d = (30 - 50)$ мкм; -радиусы конструкции цилиндрической сердцевины $r_1 = (4,1 - 5,7)$ мкм, $r_2 = (9-12)$ мкм, $r_3 = (13 - 18)$ мкм в зависимости от числа сердцевин.

Краткое содержание дипломной работы:

- Сравнительный анализ многосерцевинных волокон в оптических системах
- Реализация схемы многосерцевинных волокон в оптических системах дальней передачи
- Выбор оборудования для анализа многосерцевинных волоконных световодов
- Расчеты основных параметров волоконных световодов с множеством сердцевин

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

- Рисунок многосерцевинных волокон
- Схема многосерцевинных волокон в оптических системах дальней передачи

ГРАФИК

подготовки дипломной работы (проекта)

| Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов | Сроки представления научному руководителю и консультантам | Примечание |
|---|---|------------|
| Сравнительный анализ многосердцевидных волокон в оптических системах | 01.02.2022-01.03.2022 | Выполнено |
| Реализация схемы многосердцевидных волокон в оптических системах дальней передачи | 01.03.2022-25.03.2022 | Выполнено |
| Выбор оборудования для анализа многосердцевидных волоконных световодов | 25.03.2022-15.04.2022 | Выполнено |
| Расчеты основных параметров волоконных световодов с множеством сердцевин | 15.04.2022-10.05.2022 | Выполнено |

ПОДПИСИ

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу (проект) с указанием относящихся к ним разделов работы (проекта)

| Наименования разделов | Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание) | Дата подписания | Подпись |
|-----------------------|--|-----------------|---------|
| Нормоконтролер | Досбаев Ж.Н. | 23.05.2022 | |

Научный руководитель  Джунусов Н.А.

Задание принял к исполнению обучающийся  Абдувалиев Д.А.

Дата « 25 » 05 2022 г.

АННОТАЦИЯ

Дипломная работа на тему «Анализ многосердцевидных волокон в оптических системах дальней передачи».

Дипломная работа состоит из введения, трех глав, заключения, а также списка литературы, которая была использована во время написания дипломной работы.

Целью дипломной работы является проведение сравнительного анализа многосердцевидных волокон в оптических системах дальней передачи.

Отличительные черты работы заключаются в исследовании взаимного влияния между сердцевинами оптического волокна, а так же расчета параметров многосердцевидного волокна методом оптического временного рефлектометра.

Решены вопросы построения схем и расчета систем передачи с оптическим усилением на основе эрбия и рамановского излучения.

Волоконно-оптическая система с многосердцевидными волокнами рекомендуется к применению в современных высокоскоростных и широкополосных сетях связи и телекоммуникации.

АҢДАТПА

Алыс қашықтықтағы оптикалық жүйелердегі көп жүрек талшықтарын талдау"тақырыбындағы тезис.

Дипломдық жұмыс кіріспеден, үш тараудан, қорытындыдан, сондай-ақ дипломдық жұмысты жазу кезінде пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады.

Диссертацияның мақсаты-алыс қашықтықтағы оптикалық жүйелердегі көп жүрек талшықтарына салыстырмалы талдау жүргізу.

Жұмыстың ерекшелігі-оптикалық талшықтың өзектері арасындағы өзара әсерді зерттеу, сонымен қатар оптикалық уақытша рефлектометр көмегімен көп жүрек талшығының параметрлерін есептеу.

Эрбий мен Раман радиациясының негізінде оптикалық күшейткіші бар тарату жүйелерін есептеу және схемаларды құру мәселелері шешілді.

Көп жүрісті талшықтары бар талшықты-оптикалық жүйе қазіргі заманғы жоғары жылдамдықты және кең жолақты байланыс және телекоммуникация желілерінде пайдалануға ұсынылады.

ANNOTATION

Thesis on the topic "Analysis of multicore fibers in optical systems of long-distance transmission".

The thesis consists of an introduction, three chapters, a conclusion, as well as a list of literature that was used during the writing of the thesis.

The purpose of the thesis is to conduct a comparative analysis of multicore fibers in optical long-distance transmission systems.

The distinctive features of the work are the study of the mutual influence between the cores of the optical fiber, as well as the calculation of the parameters of the multi-core fiber by the optical time reflectometer method.

The problems of constructing schemes and calculating transmission systems with optical amplification based on erbium and Raman radiation are solved.

Fiber-optic system with multi-core fibers is recommended for use in modern high-speed and broadband communication and telecommunications networks.

СОДЕРЖАНИЕ

| | | |
|----------------------------------|---|----|
| Введение | | 10 |
| 1 | Сравнительный анализ многосердцевидных волокон в оптических системах | 11 |
| 1.1 | Основные понятия многосердцевидных волокон в оптических системах | 11 |
| 1.2 | Аналитический обзор многосердцевидных волокон | 12 |
| 1.3 | Экспериментальные передачи большой мощности с использованием MCF волокна | 15 |
| 1.4 | Постановка задачи исследования | 18 |
| 2 | Выбор оборудования и реализация схем для систем с многосердцевидными волокнами | 19 |
| 2.1 | Мультиплексор/демультиплексор с разделением пространства для многосердцевидных оптических волокон | 19 |
| 2.2 | Соединители многосердцевидных оптических волокон | 20 |
| 2.3 | Усилители многосердцевидной оптической сети | 22 |
| 2.4 | Коммутатор для многосердцевидной оптической сети | 23 |
| 2.5 | Обоснование выбора оборудования многосердцевидной оптической системы с оптическим усилением на основе эрбия | 26 |
| 2.6 | Обоснование выбора оборудования многосердцевидной оптической системы с оптическим рамановским усилением | 28 |
| 3 | Расчеты основных параметров для многосердцевидного оптического волокна | 33 |
| 3.1 | Постановка задачи расчета основных параметров | 33 |
| 3.2 | Анализ перекрестных помех между сердцевинами | 33 |
| 3.3 | Анализ дисперсии для многосердцевидного оптического волокна | 35 |
| 3.4 | Расчет взаимного влияния между сердцевинами | 35 |
| 3.5 | Расчет дисперсии для многосердцевидного волокна | 39 |
| Заключение | | 42 |
| Список использованной литературы | | 43 |
| Приложение А | | 44 |
| Приложение В | | 45 |

ВВЕДЕНИЕ

Целью исследования является разработка волоконно-оптической системы дальней передачи с многосерцевидными волокнами, обеспечивающие высокочастотную передачу сигналов с большей скоростью передачи битов и большей пропускной способностью данных на большие расстояния с меньшими потерями и помехами.

Задача работы заключается в проведении анализа волоконно-оптических систем с многосерцевидными волокнами, с целью построения схем оптических усилителей легированных эрбием, с последующим выбором оборудования и оценка основных параметров многосерцевидных оптических систем дальней передачи расчетным путем.

Актуальность работы заключается в том, что появляется возможность понимания многосерцевидных волокон, которые еще полностью не исследованы и внедрены. Представляет практический интерес изучение возможностей волокон нового типа, прежде всего MCF-SM, MCF-FM. Эти волокна могут послужить основой построения систем передачи со скоростными режимами более 100 Тбит/с, т.е. до 1 Пбит/с и выше.. Поэтому передача данных информации по сети связи с использованием многосерцевидных волокон носит актуальный характер.

Теоретическая и методологическая основа исследования. В данной работе использовались уравнения для оценки взаимного влияния сердцевин в оптическом волокне

Практическая база написания. Результаты работы рекомендуются для применения в многосерцевидных волокнах при передаче для повышенной пропускной способности, в городских и магистральных, международных и трансконтинентальных сетях.

Обоснование необходимости выполнения. Чтобы справиться с быстрым увеличением пропускной способности передачи и оптические нелинейные эффекты стали проблемой. Из-за этих эффектов пропускная способность обычного волокна приближается к своему фундаментальному пределу. Поэтому исследование многосерцевидной оптической системы на сегодняшний день представляет широкий интерес как для разработчиков, так и пользователей услуг связи и телекоммуникаций.

1. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МНОГОСЕРДЦЕВИННЫХ ВОЛОКОН В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

1.1 Основные понятия многосердцевинных волокон в оптических системах

Первое предложение по применению волоконных световодов с множеством сердцевин для OSDM направили в 1979 году компания Furukawa Electric, далее детальные исследования волокон произведены в компании France-Telecom в 1980-1990-х годах. В то же время определились направления создания данных волокон различных видов:

- волокна на фотонных кристаллах PCF с различным числом сердцевин в полых областях;
- много сердцевинные волокна с единой оболочкой MCF (multi core fiber) с числом сердцевин от трех до несколько десятков;
- мало модовые волокна FMF (few mode fiber) с одной сердцевинной, но числом мод передачи 2,3,4 и более и так же с множеством сердцевин.

Нам необходимо уточнить что состоялись новые классы волоконных направляющих сред с SDM (Space Division Multiplexing).

MCF делятся на несборные и сборные оболочки. В сборных оболочках используются определенные конфигурации сердцевин в пространстве оболочки.

Именно волокна передачи обеспечивают одновременную параллельную передачу данных по нескольким ядрам в одной оболочке для повышения скорости передачи данных.

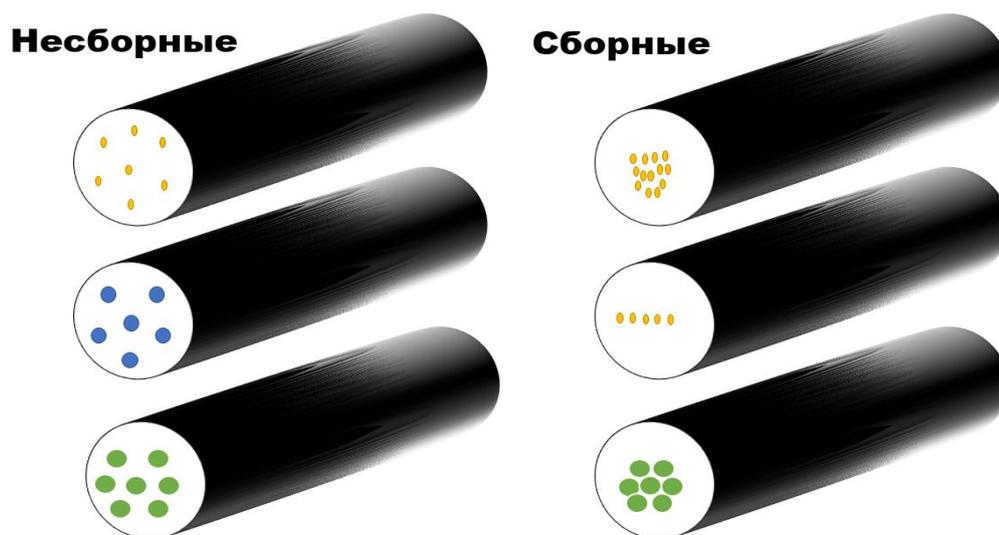


Рисунок 1.1 – Типы волоконных световодов и их конструкций

В данной таблице показаны характеристики 7-ми сердцевинного волокна на волнах 1550нм и 1625нм, относящиеся к С и L с нормированными значениями дисперсии.

Таблица 1.1 Характеристики многосердцевинного волокна

| Наименование | Волна отсечки, нм | Поле моды, нм | Площадь моды, мкм ² | ХД, пс/нм×км | Наклон ХД, пс/нм ² ×км | ПМД, пс/√км | Потери на изгибе, R=5мм, дБ/виток |
|--------------|-------------------|---------------|--------------------------------|--------------|-----------------------------------|-------------|-----------------------------------|
| λ, нм | | 1550 | | | | C+L | 1625 |
| Мин. | 1483 | 9.72 | 78.2 | 22.1 | 0.062 | 0.044 | 0.019 |
| Макс. | 1509 | 9.88 | 81.2 | 22.2 | | 0.205 | 0.022 |

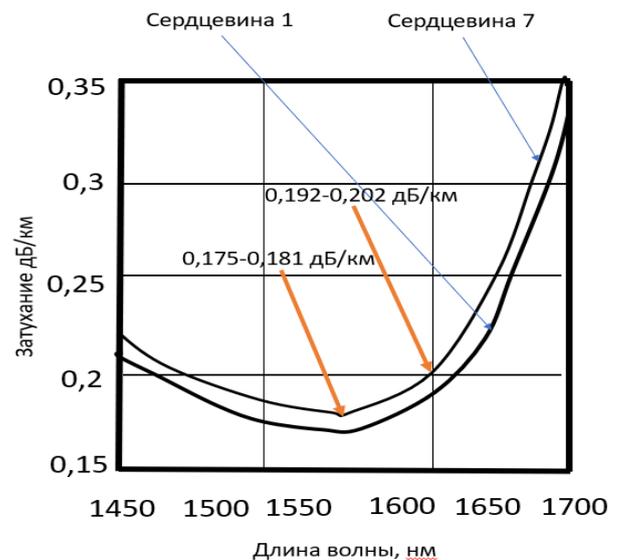
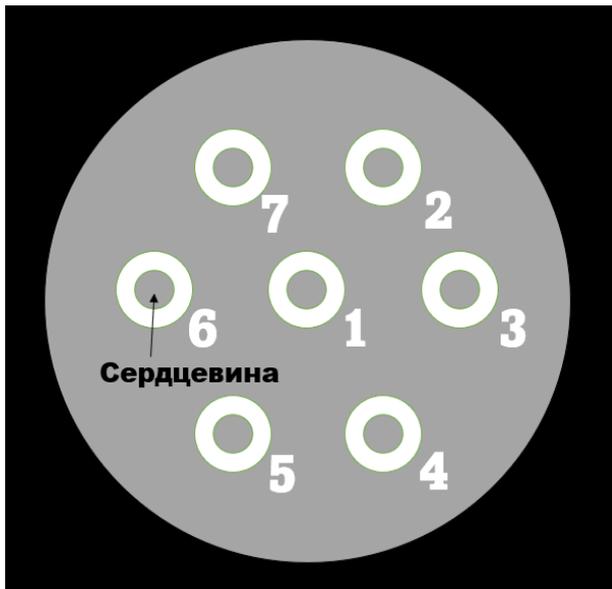


Рисунок – 1.2 Конструкция волокна MCF с семью одномодовыми сердцевинами

1.2 Аналитический обзор многосердцевинных волокон

MCF в настоящее время активно исследуется для SDM. Для передачи данных на большие расстояния на основе SDM требуется архитектура с низким уровнем перекрестных помех (ХТ). Передача MCF представляет огромную

трудность из-за перекрестных помех, которые могут снизить качество оптических данных, вызванных непреднамеренной связью между ядрами, работающими в одном направлении и с одинаковой длиной волны, как показано на рисунке 1.3.

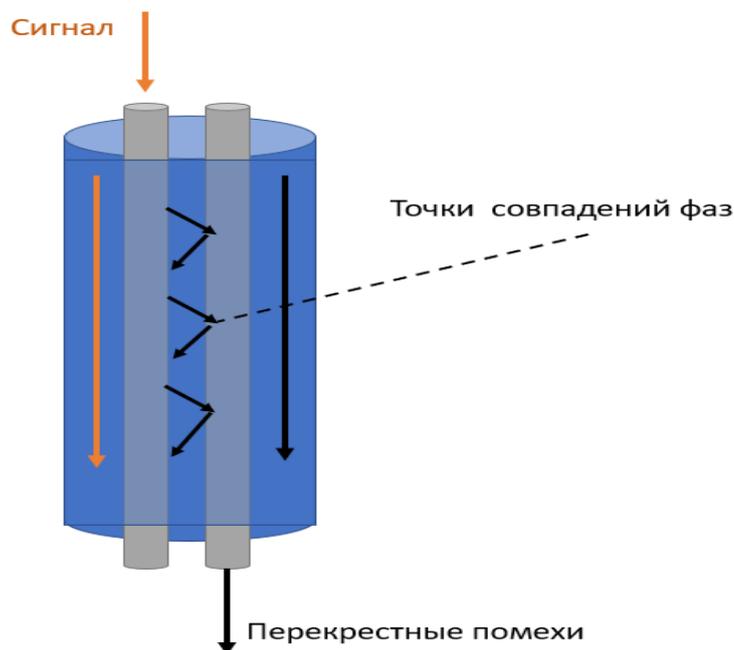


Рисунок 1.3 – Механизм перекрестных помех между ядрами

Передача затруднена перекрестными помехами в оптической сети на основе MCF, которые могут быть уменьшены с помощью связи по мощности и режиму. Таким образом, ширина облицовки варьируется. Прочность оболочки уменьшается с увеличением диаметра. Каждый из этих параметров должен быть изменен. Перекрестные помехи MCF между ядрами теперь рассчитываются с использованием теорий связанных режимов и связанных мощностей. Во-первых, системы MCF должны согласовать допустимые перекрестные помехи для каждой длины. Современные когерентные оптические системы связи предъявляют требования к перекрестным помехам MCF независимо от расстояния передачи. Допустимые перекрестные помехи имеют ограничения на пропускную способность, охват, универсальность установки транспондера и внедрение системной связи.

Величина перекрестных помех между сердцевинами волокна может быть оценена аналитически из соотношения при наличии соответствующих данных.

Мы можем заметить, что переходные помехи между сердцевинами становятся сопоставимыми с помехами от оптического усиления при числе сердцевин более 7 (13,19) в одной оболочке.

Общую оценку ухудшения (worst) ХТ можно записать:

$$X_{T_{wrost}} = X_T + 10 \log n \quad (1.2)$$

где n - число влияющих сердцевин.

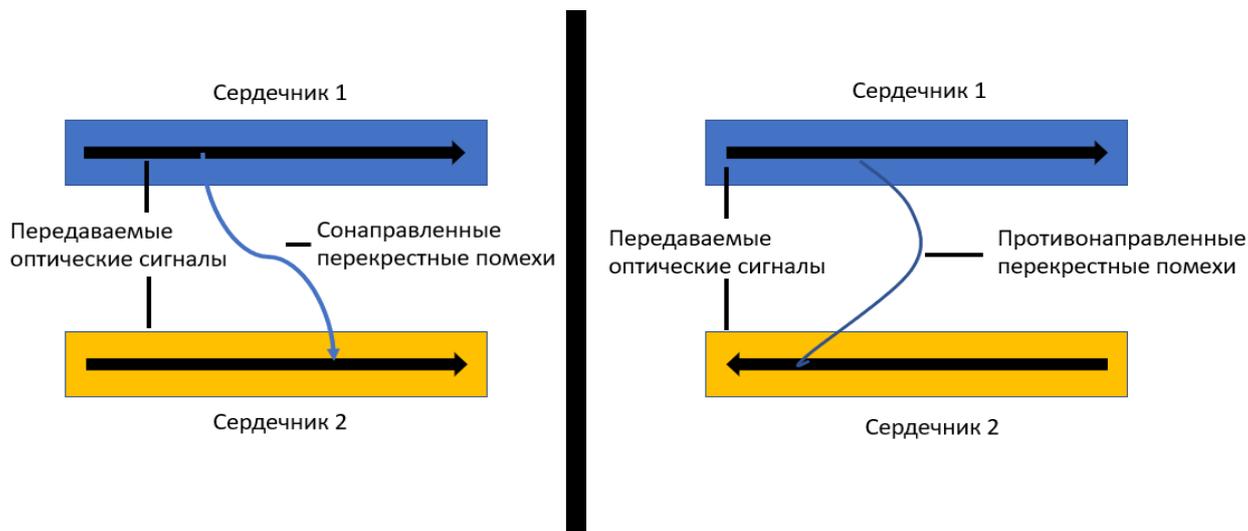


Рисунок 1.4 – Образование помех между сердцевинами MCF.

Дистанция передачи сигналов в сердцевинах при наличии взаимных перекрёстных влияниях будет зависеть от формата кодирования. Усложнение форматов кодирования требует увеличения OSNR, т. е. снижения перекрёстных помех. Нетрудно отметить, что наибольшей устойчивостью к перекрёстным помехам обладает канальный оптический сигнал в формате QPSK. В общую оценку OSNR для MCF вместе с шумом спонтанной эмиссии P_{ASE} , вызванным активными оптическими компонентами, и шумом из-за нелинейных оптических эффектов P_{NLI} включается составляющая мощности шумов переходных влияний P_{XT} для одного оптического канала в полосе частот для его организации:

$$OSNR = \frac{P_{och}}{P_{ASE} + P_{NLI} + P_{XT}} \quad (1.3)$$

Для сравнительных оценок волокон MCF с различной геометрической структурой предложен специальный показатель для систем передачи (SSE), учитывающий спектральную эффективность (SE) оптических сердцевин, число сердцевин N , эффективную площадь (A_{eff}):

$$SSE = (SE/core) \times (N/A) \text{ бит/с/Гц/мм}^2 \quad (1.4)$$

Мы можем понять, что при больших геометрических размерах сердцевин возрастает расстояние, на которое могут проектироваться системы передачи с меньшей спектральной эффективностью. Высокая спектральная эффективность

не способствует увеличению дистанций передачи. Измеренные характеристики затухания сердцевин позволяют выбрать сердцевины с наименьшими потерями оптической мощности для построения протяженных оптических соединений. Наилучшие сердцевины по затуханию имеют потери в пределах 0,16 дБ/км - 0,19 дБ/км для диапазонов С и L.

1.3 Экспериментальные передачи большей мощности с использованием MCF волокна

Ограниченная полоса пропускания передачи с низкими потерями, а также ограничения мощности передачи нелинейности волокна делают расширение пропускной способности одного оптического волокна сложной задачей. Учитывая это, растет потребность в оптоволоконной связи с большей пропускной способностью, на рисунке 1.3 показаны результаты испытаний передачи по оптоволокну с высокой пропускной способностью. Из-за ограничений одномодового волокна с одной сердцевиной максимальная пропускная способность составляет 100 Тбит/с. С помощью MCF, MMCF и SDM могут быть превзойдены одножильные волоконные системы передачи.

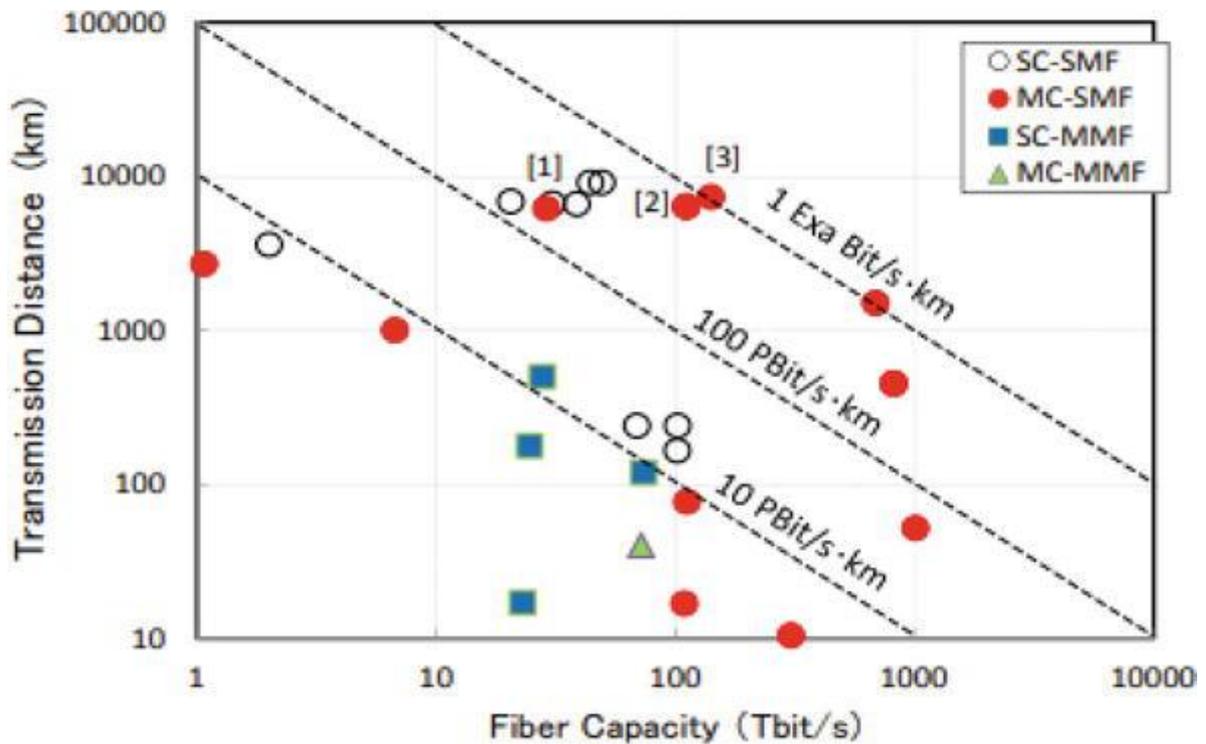


Рисунок 1.3 Экспериментальная передача с высокой пропускной способностью.

Из-за истощения полосы пропускания оптоволокна разработка SDMF является возможной альтернативой для решения проблемы дополнительной пропускной способности так как пропускная способность SSMF приближается к концу. Долгосрочная цель SDM - увеличить количество волоконных сердечников, управляемых режимов или того, и другого.

MCF имеет много жил в одном оптическом кабеле. Сердцевина обычного одножильного волокна расположена в центре оболочки диаметром 125 м, что ограничивает свободу проектирования. Успех MCF зависит не только от количества ядер, MCF позволяют разработчику оптимизировать конструкцию сердечника, количество сердечников, расположение сердечника, толщину внешней оболочки и диаметр оболочки с точки зрения оптических и механических свойств.

Конструкция волокна зависит от области применения, поскольку желаемые характеристики различаются. SMF в настоящее время имеют единую волоконную сердцевину, окруженную 125-миллиметровой оболочкой. Большие сердечники с такой же оболочкой или большим диаметром сердечника обеспечивают большую пропускную способность волокна. Добавление сердечников может повысить пропускную способность, но для этого могут потребоваться изменения в архитектуре системы передачи.

Эксперименты по передаче SM-MCF на FMFS показали волокна с 32 и всего 45 модами. Добавление многожильных волокон, которые позволяют соединять волокна с многомодовым ядром, приводит к дополнительным 100 оптическим каналам в каждой передаче и пропускной способности более 10 Пб/с.

Несмотря на то, что ядро простое, парный MCF более плотный. Кроме того, случайная связь в подключенном MCF предотвращает возникновение ухудшения нелинейности, SMD и зависящих от режима потерь / усиления. При междугородной связи точка-точка используется связанный MCF.

MCF обладает потенциалом для улучшения передачи данных и мощности для мощных устройств. PoF, с другой стороны, нуждается в MCF из-за его нелинейных аберраций. Внутри MCF недавно была обнаружена привлекательная мощность передачи электроэнергии. Расположение сердечников оказывает влияние на производительность MCF.

Многоядерные волоконные архитектуры, такие как треугольник, кольцо, квадрат, прямоугольник и шестиугольник, были разработаны после анализа количества ядер, шага и спектра мощности. Многие люди интересуются волоконно-оптической структурой MCF, и вопрос заключается в том, как она позволяет передавать мощные сигналы. Одномодовое волокно имеет нижний предел, налагаемый MCF, и в настоящее время ограничено анализом MCF и обработкой изображений. Расположение сердечников влияет на производительность MCF.

Сильно связанный MCF имеет наименьшее расстояние от ядра до ядра, в то время как слабо связанный MCF имеет наибольшее расстояние от ядра до ядра. Размер сердечника может варьироваться в зависимости от шага

сердечника. Эффективная площадь (A_{eff}) зависит от количества ядер, и их конфигурация влияет на выходную мощность приема. МСФ содержит несколько сердечников с увеличенными эффективными площадями, что приводит к минимальному рассеиванию и потерям на изгибах. На рисунке 1.5 показаны шесть различных структур МСФ.

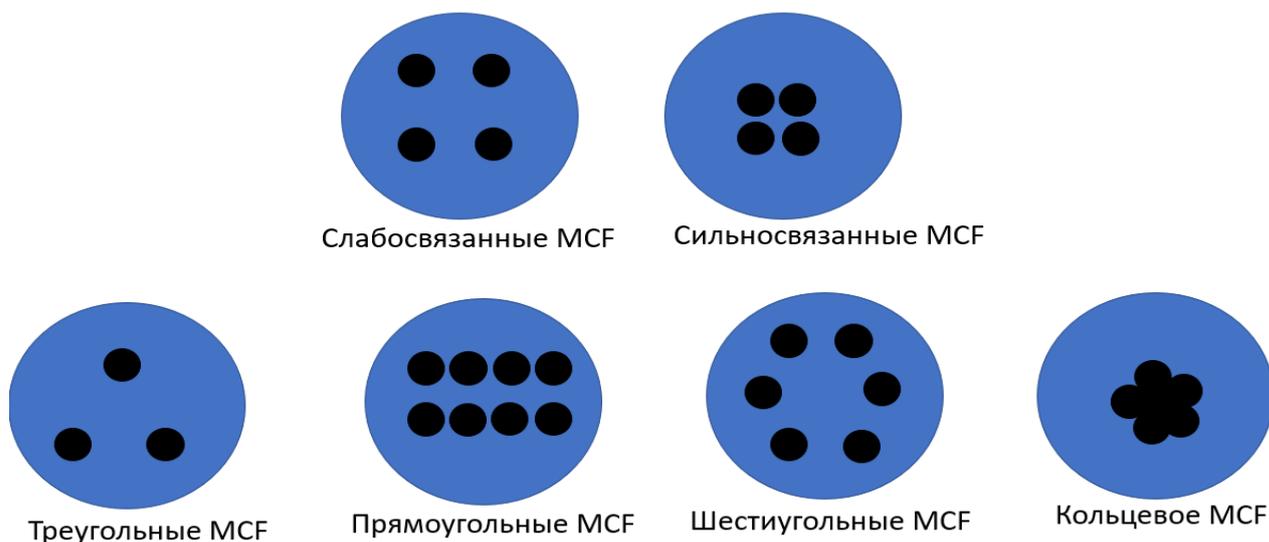


Рисунок 1.5 Примеры конструкции волокон МСФ

Чтобы обеспечить надежную передачу сигнала на большие расстояния, ХТ должен быть менее -30 дБ/100 км. Чтобы получить сверхнизкие уровни ХТ, можно внести изменения в структуры МСФ, например, проложить траншеи вокруг сердечников.

По сути, траншеи представляют собой профили с более низким показателем преломления, чем сердцевина и оболочка. Траншейный метод является одним из заслуживающих внимания методов, который снижает связь между соседними сердечниками, тем самым помогая свести к минимуму существующие перекрестные помехи.

В МСФ если количество сердечников в ограниченной области оболочки увеличивается, подавление перекрестных помех становится проблемой. ХТ в МСФ уменьшается за счет уменьшения коэффициента связи между ядрами. Базовая конструкция с сильным сдерживанием мод имеет решающее значение для подавления коэффициента связи мод. Для более высокого A_{eff} и меньшего нелинейного шума предлагаю выбрать сердечник с более высоким индексом и меньшим диаметром.

Он имеет три важных геометрических элемента, как показано на рисунке 1.6 Толщина внешней оболочки — это расстояние между центром внешней сердцевины и периметром оболочки. Механическая надежность оптического волокна тесно связана с диаметром оболочки D . Более высокое значение D увеличивает деформации МСФ. Межжильный зазор может быть уменьшен

путем регулировки радиуса сердечника и стержня, разницы относительных показателей преломления оболочки и стержня и расстояния от сердечника до сердечника.

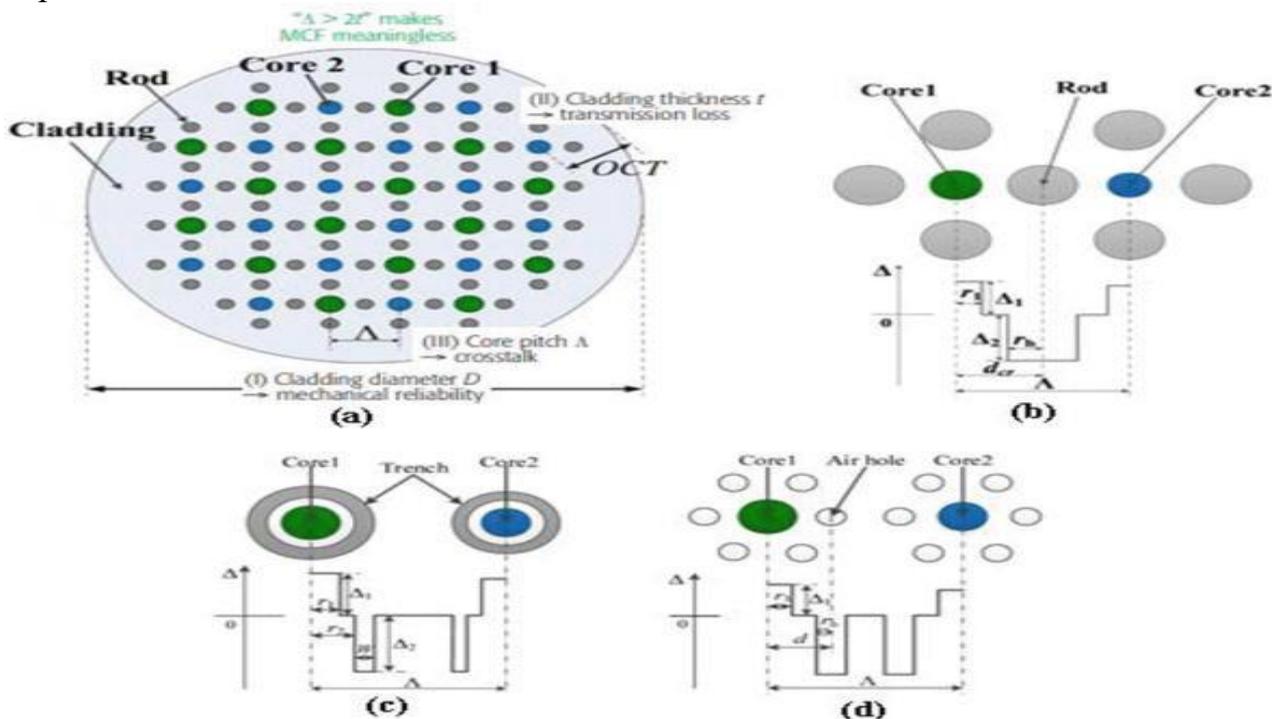


Рисунок 1.6

- (a) Схематическая структура из 32 ядер показывает три ключевых геометрических параметра в MCF.
- (b) Принципиальные схемы профиля индекса сердечника гетерогенного стержневого волокна с 32 сердечниками,
- (c) Схема с траншеей (ТА),
- (d) Схема с отверстиями (НА)

1.4 Постановка задачи исследования

Работа посвящена исследованию волоконно-оптической системы с многосердцевинными волокнами.

Необходимо разработать схемы построения и блок-схемы многосердцевинных волоконно-оптических систем для дальней передачи с оптическим усилением на основе эрбия.

Провести выбор оборудования для многосердцевинных волокон дальней передачи с обоснованием выбора устройств и характеристик многосердцевинных волокон с оптическим усилением на основе эрбия.

Провести расчеты основных параметров многосерцевинных волокон дальней передачи, анализ взаимного влияния между сердцевинами. Определить расчетные коэффициенты, построить характеристики дисперсии и сделать анализ полученных результатов расчета.

2. ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИЯ СХЕМ ДЛЯ СИСТЕМ С МНОГОСЕРДЦЕВИННЫМ ВОЛОКНОМ

2.1 Мультиплексор/демультиплексор с разделением пространства для многосердцевидных оптических волокон

Технология MCF использует SDM MUX/DEMUX. В настоящее время существует множество вариантов, каждый из которых имеет свои собственные размеры, стоимость, возможности, многорежимность и т. д. Мультиплексор или демультиплексор SDM эффективно связывает свет между волокнами SMF и модами или ядрами SDM-волокон. Пространственные мультиплексоры необходимы для исследований SDM и могут быть использованы для соединения сетей SMF и SDM в будущем.

Оптический сигнал полностью ограничен внутри волновода во время подключения. На рисунке 2.1 показаны два типичных макета, диаметр оболочки SMF сужается для соединения пучка SMF с волокном SDM. Фотонный световод изготавливается путем сжатия сердечников MCF или SMF в FMF. Вписанные световодные сердечники на крошечном стеклянном блоке образуют волновод.

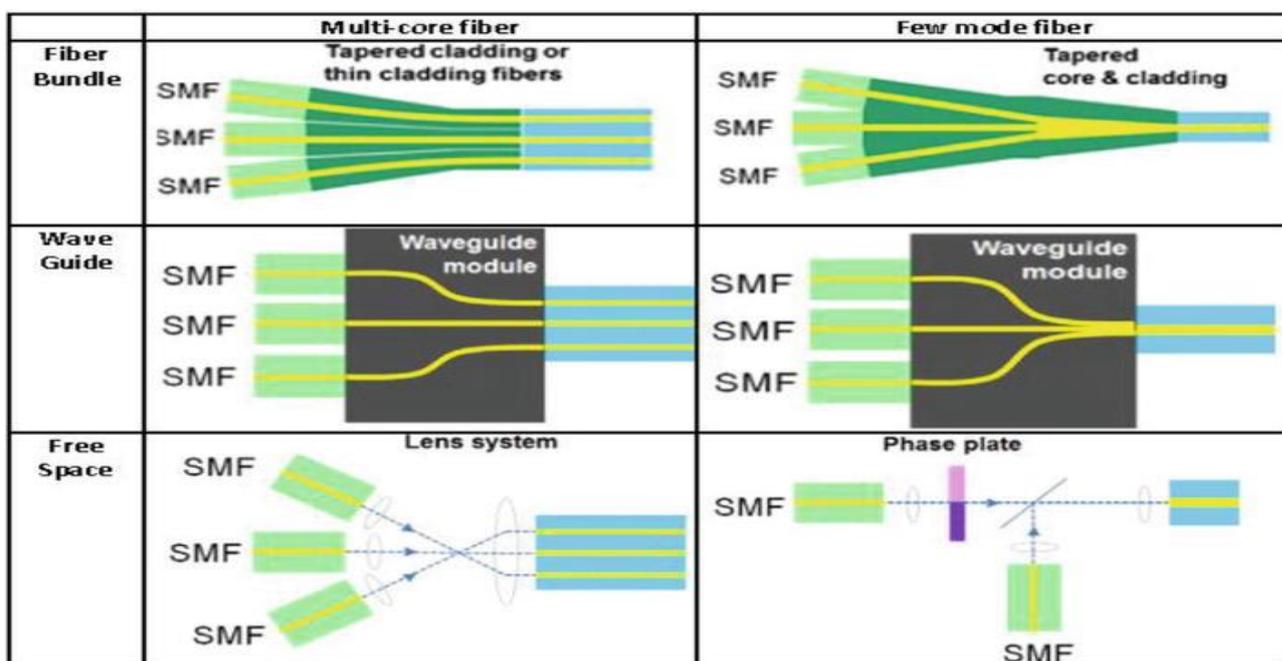


Рисунок 2.1 – Пучок волокон, волновод и мультиплексор свободного пространства для MCF и FMF соответственно.

На рисунке 13 показаны вписанные сердечники в выходной плоскости волновода, разделением сердечников MCF. Входные и выходные SMF-матрицы соединены с помощью УФ-отвержденного клея. В дополнение к

производителям волокон, технологию 3D-волноводов Oproscribe легко интегрировать с фотонными интегральными схемами. Непрямое соединение использует объёмную оптику, такую как линзы и призмы

2.2 Соединители многосердцевинных оптических волокон

Так как нам необходимо подключить MCF к аппаратуре систем передачи и другой измерительной аппаратуре, так же требуется разделение сердцевин с подходящими окончаниями, используются соединители.

Соединители — это устройства, которые соединяют оптические провода. Потери на стыке составляет от 0,38 дБ до 1,8 дБ исходя из данных 2010 года. При сварке волокон потери не составляют более 0,1 дБ.

Соединители так же требуются для систем SDM, таких как термоядерное соединение в наземных и подводных магистральных сетях. Для различных типов кабелей и способов передачи было создано множество типов соединений. Из-за разрыва волокна передача по каналу связи происходит с потерями. Линзы, торцевая полировка и формы используются для уменьшения затухания. Соединения М-типа использовались для 7-ядерных MCF с IL 0,13 дБ и 500-кратным улучшением наработки на отказ. В работе также показано 7-жильное MCF-соединение с обратными потерями 45 дБ и разъем MPO для четырех 7-жильных волокон с обратными потерями 0,3 дБ.

Аппарат Fujikura 100, чаще всего рекомендован для сварки волокон. Данный аппарат рассчитан на сварку волокон с диаметром оболочки до 2000 мкм и использованием технологии выравнивания по сердцевине волокна. Неточности выравнивания на стыке волокна сказывается на величине потери мощности.

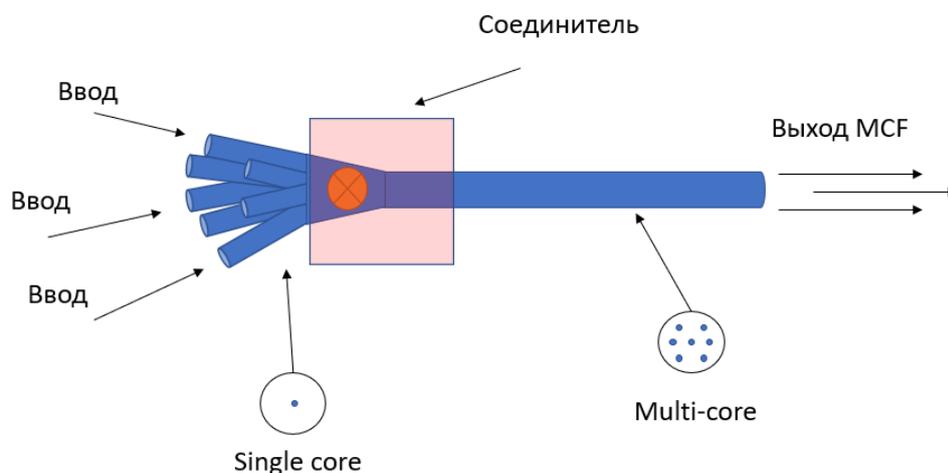


Рисунок 2.1 - Структура соединителя FBF односердцевинных и многосердцевинных волокон

В стыках сердцевин могут происходить отражения оптических волн с их возвращением к передатчикам, что может ухудшить параметры передачи сигналов, привести к помехам и снижению OSNR. Стык каждой сердцевин является предметом нормирования на отражение волн.

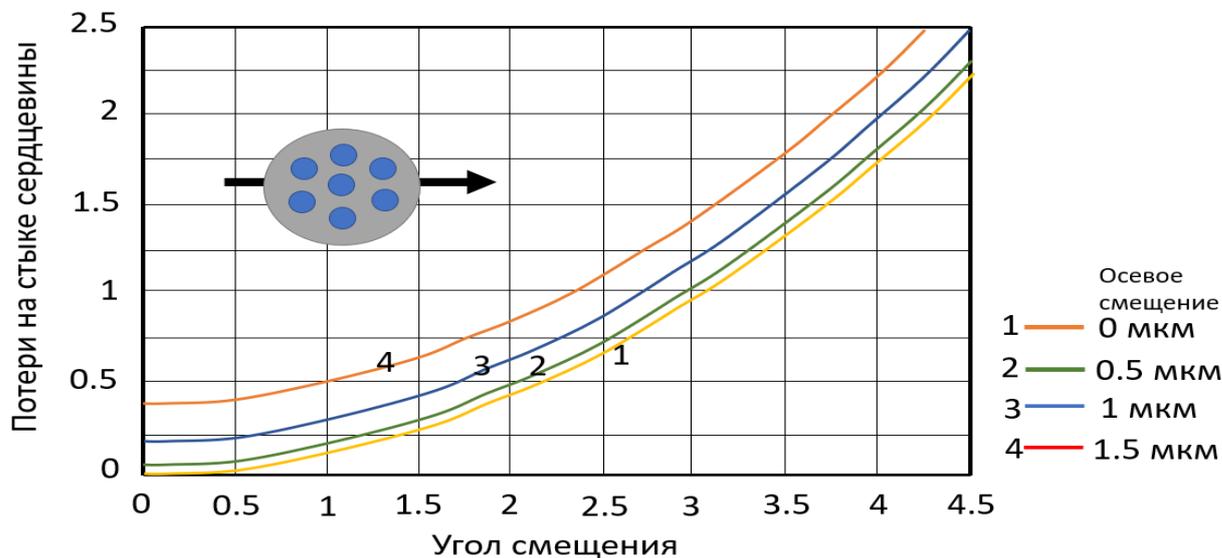


Рисунок 2.2 - Зависимость потерь оптической мощности на стыке MCF при осевых смещениях

2.3 Усилители многосердцевинной оптической сети

Учитывая то, что сигнал со временем ослабевает, для поддержки передачи сигнала на дальних линиях с MCF должны быть предусмотрены оптические усилители для каждой сердцевин. В основном используются усилители на основе эрбия EDFA и рамановских DRA усилителей с согласованной встречной накачкой.

Усилители MCF, легированные эрбием, могут быть сконструированы с использованием отдельных лазеров накачки. Другой подход заключается в накачке оболочки MCF, которая оснащена многорежимными лазерами. Для достижения большей эффективности, чем массив SSMF EDFA, необходимо вводить больше энергии.

Для объединения излучения сигнала и накачки обычно используется тонкоплёночная сборка оксидных пленок в виде пластины, она пропускает излучение сигнальных компонент и отражает излучения накачки

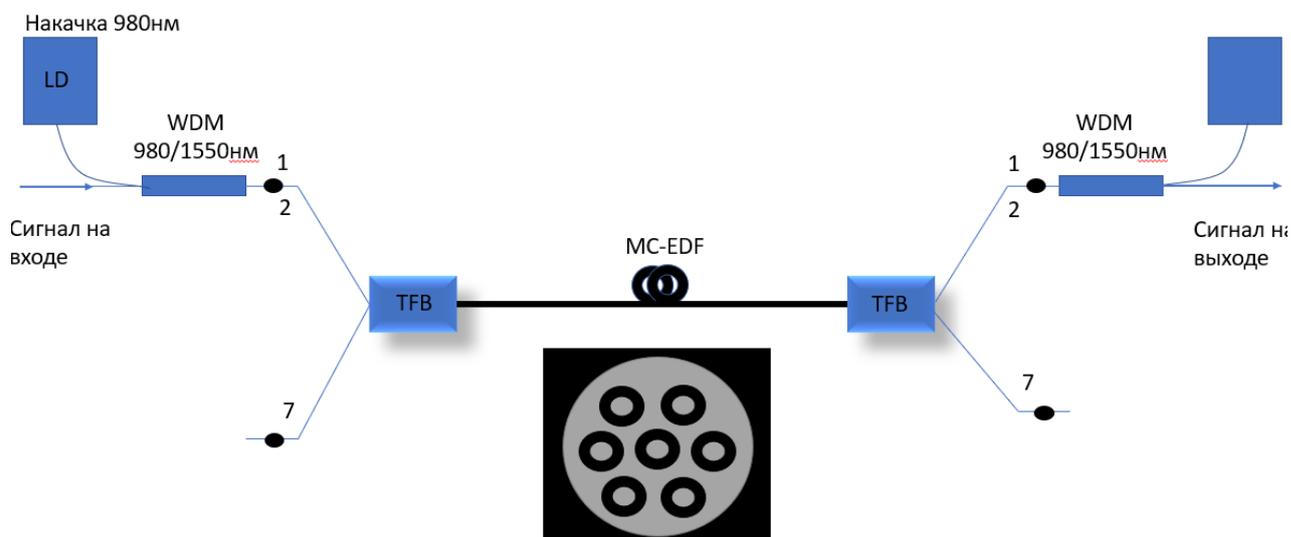


Рисунок 2.3 - Структура оптического усилителя на основе MC-EDFA

Когда луч света, несущий сигналы, проходит через легированное эрбием оптическое волокно, лазер накачки обеспечивает энергию усилителя на пиках поглощения эрбия 980 и 1480 нм с помощью WDM-ответвителей. Затем оптический фильтр удаляет оставшиеся следы луча накачки, чтобы он не мешал приему сигнала. Изоляторы вставляются в усилители для минимизации отражений от EDFA. Блоки TFB (коннектор-разветвитель связки волокон) позволяют подключить к оптическому усилителю отдельные волокна для ввода сигналов информации, накачки и их разделения после усиления.

В таких усилителях многосердцевинное волокно, в которых сконцентрированы добавки эрбия, может использоваться как с системами, в которых одна сердцевина, так и в системах MCF.

Нужно учитывать то, что влияние между усиливающими сердцевинами при различных способах накачки, предельные значения по коэффициентам усиления, величинам шума спонтанной эмиссии и нелинейные эффекты, продолжают исследовать

2.4 Коммутатор для многосердцевинной оптической сети

Коммутаторы управляют путями передачи сигналов между узлами. В традиционных медных сетях эта маршрутизация основана на идентификаторах пакетов данных. Маршрутизация в оптических сетях, с другой стороны, может основываться на физических свойствах сигнала. Это может быть, например, длина волны в WDM или сердцевина при передаче по многожильному волокну.

Оптические блоки для разделения сердцевин MCF и объединения отдельных волокон для ввода сигналов в сердцевинки MCF строятся в виде монолитных конструкции со стабильными температурными и механическими характеристиками. Данные конструкции используются для реализации управляемых мультиплексоров выделения/ввода сердцевин и коммутаторов сердцевин. К примеру, коммутаторы с управляемыми микро зеркала микро электромеханических коммутационных систем MEMS (microelectromechanical systems).

На рисунке 2.4 показан пример маршрута сигнала в коммутаторе. Все соединенные провода имеют семь жил. Каждый сигнал имеет свое собственное ядро. При маршрутизации сигнала это может выполняться динамически или статически. Метод физической маршрутизации зависит от коммутатора, что означает, что разные типы коммутаторов будут иметь разные методологии. Из-за эффектов физической связи между различными ядрами диапазон применения многоядерной волоконной технологии ограничен километрами. Ограниченная гибкость одножильных волокон отличается от гибкости многожильных волокон.

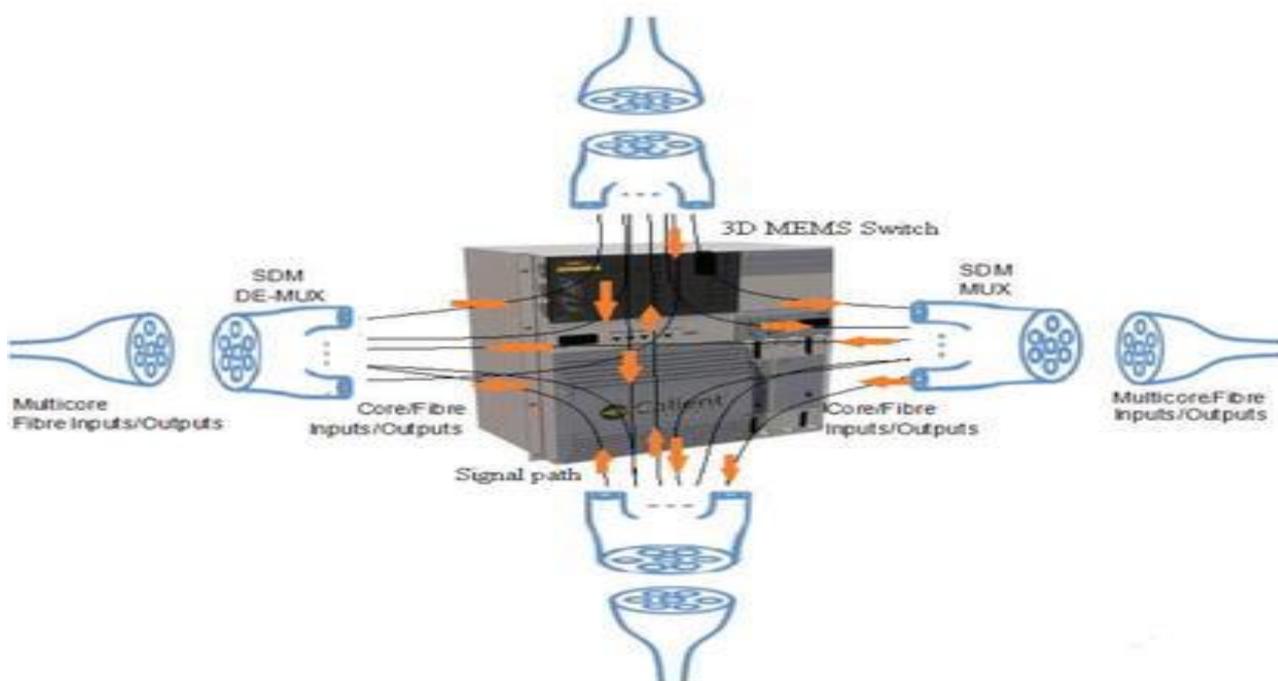


Рисунок 2.4 - Коммутация ядер с непрерывностью спектра в оптической сети, использующей многосерцевинную оптоволоконную передачу.

На основе MEMS могут строиться 2-х и 3-х мерные матрицы коммутации с минимальными потерями оптической мощности в широком диапазоне оптических частот, которые перекрывают волны 1260-1675 нм и обеспечивают равномерность коэффициента передачи 0,5 дБ.

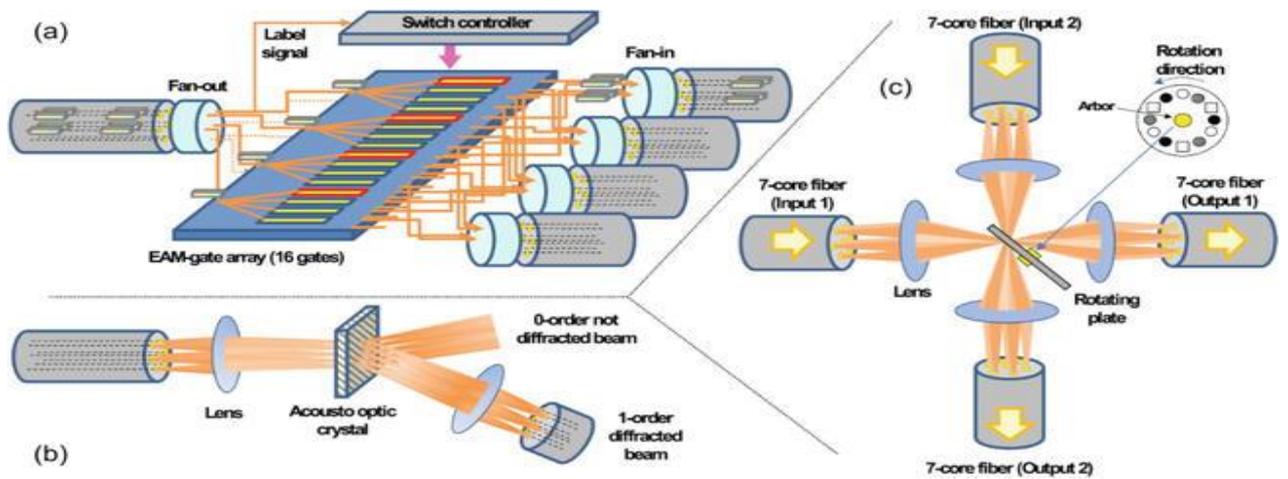


Рисунок 2.5 – Переключатель CJ-AOM для 7 пространственных каналов

- (а) схема электропоглощающего переключателя с сердечником;
- (б) схема переключения акустооптического модулятора с сердечником;
- (в) схема зеркального переключателя с сердечником.

В SDM-EONs в каждом ядре есть ресурсы спектра. Все слоты спектра созданы равными. Соблюдение требования о непрерывности спектра подразумевает, что вся служба должна использовать одни и те же интервалы спектра вдоль светового пути. Чтобы сохранить ограничение непрерывности спектра в волокне, интервалы спектра обслуживания должны быть непрерывными в спектральном измерении.

Оптические коммутационные волокна с пространственным и спектральным разрешением выполнены так, как показано на рисунке 2.6. В оптической коммутационной сети может быть выполнено переключение ядра, волокна и спектра, что обеспечивает гибкое добавление, удаление каналов и переключение каналов детализации на уровне длины волны.

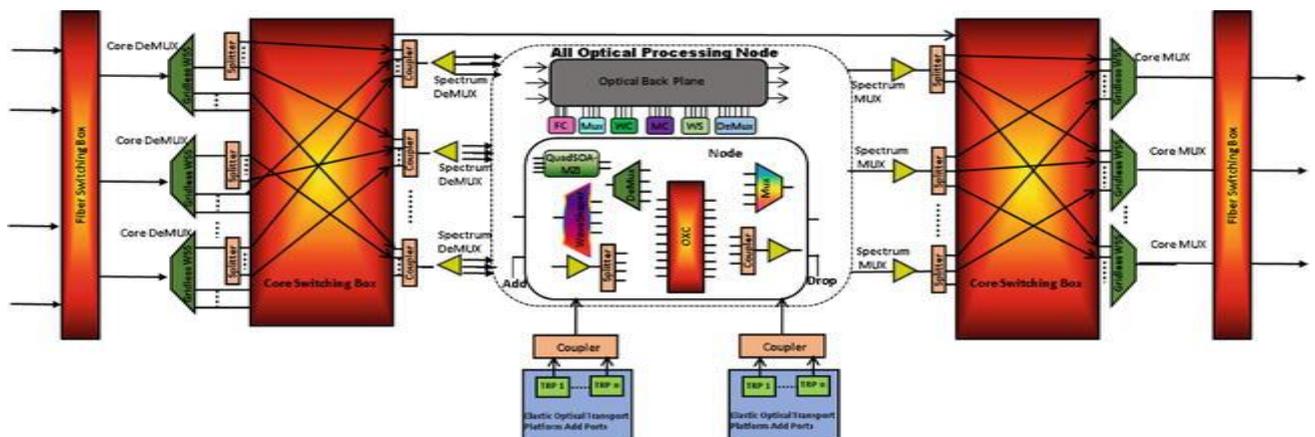


Рисунок 2.6 – Оптическая коммутационная ткань с пространственным и спектральным разрешением.

Исследователи по всему миру работают над уменьшением проблем, чтобы достичь сверхнизких искажений сигнала в волоконно-оптических технологиях. Однако системы передачи данных с высокой пропускной способностью придают особое значение надежности сети. MCF обеспечивают резервные сигнальные линии и первичные сигнальные линии, что позволяет им создавать чрезвычайно надежные сети.

2.5 Обоснование выбора оборудования многосерцевинной оптической системы с оптическим усилением на основе эрбия

Оптический усилитель на основе оптического волокна, легированного эрбием усиливает оптические сигналы без преобразования их в электрическую форму. К таким относятся EDFA усилители, которые используют полупроводниковые лазеры для накачки легированного эрбием волокна для усиления света в области длин волн 1,5 мкм, где телекоммуникационные волокна имеют минимальные потери.

EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) – оптоволоконный усилитель для оптического волокна, легированный ионами эрбия.

DWDM (Dense Wavelength-Division Multiplexing) – плотное спектральное уплотнение, одна из современных технологий передачи в одном волокне больших количеств оптических каналов.

Он обладает низким уровнем шума и может усиливать множество длин волн одновременно, что делает DWDM-сеть возможной и становится ключевой технологией для оптических сетей связи.

С момента реализации EDFA усилители быстро развиваются и для большинства применений в оптической связи стал единственным выбором.

Структура и принцип работы EDFA показаны на рисунке 2.8. EDFA состоит из стеклянного оптического волокна, легированного ионами эрбия, WDM-муфты, изоляторов, оптического фильтра и источника накачки.

Когда луч света, несущий сигналы, проходит через легированное эрбием оптическое волокно, лазер накачки обеспечивает энергию усилителя на пиках поглощения эрбия 980 и 1480 нм с помощью WDM-ответвителей. Затем оптический фильтр удаляет оставшиеся следы луча накачки, чтобы он не мешал приему сигнала. Изоляторы вставляются в усилители для минимизации отражений от EDFA.

Для правильного выбора EDFA прежде всего, убедитесь в типе сети, в которой нужно использовать EDFA. В зависимости от сетевого приложения EDFA обычно подразделяются на следующие типы:

– DWDM EDFA: для этого типа сети EDFA должна быть не только высокой мощностью с низким уровнем шума, но и сглаженным коэффициентом усиления, чтобы все каналы длин волн могли быть усилены одинаково;

– SDH EDFA: для сети SDH конструкция EDFA должна обеспечивать максимальный бюджет мощности для достижения максимальной чувствительности обнаружения;

– CATV EDFA: Существует также EDFA, предназначенный для применения в кабельном телевидении CATV, который имеет низкий уровень шума с учетом тепловыделения и вентиляции для обеспечения длительного срока службы.

EDFA – это оптический усилитель на основе оптического волокна, легированного эрбием, который усиливает оптические сигналы без преобразования их в электрическую форму. EDFA используют полупроводниковые лазеры для накачки легированного эрбием волокна для усиления света в области длин волн 1,5 мкм, где телекоммуникационные волокна имеют минимальные потери. Он обладает низким уровнем шума и может усиливать множество длин волн одновременно, что делает DWDM-сеть возможной и становится ключевой технологией для оптических сетей связи. С момента реализации EDFA он быстро развивался и стал выбором усилителя для большинства применений в оптической связи.

Структура и принцип работы EDFA просты. EDFA состоит из стеклянного оптического волокна, легированного ионами эрбия, WDM-муфты, изоляторов, оптического фильтра и источника накачки.

Прежде всего, вы должны убедиться в типе сети, в которой вам нужно использовать EDFA. В зависимости от сетевого приложения EDFA обычно подразделяются на следующие типы:

DWDM EDFA: для этого типа сети EDFA должна быть не только высокой мощностью с низким уровнем шума, но и сглаженным коэффициентом усиления, чтобы все каналы длин волн могли быть усилены одинаково.

SDH EDFA: Для сети SDH конструкция EDFA должна обеспечивать максимальный бюджет мощности для достижения максимальной чувствительности обнаружения.

CATV EDFA: Существует также EDFA, предназначенный для применения CATV, который имеет низкий уровень шума с учетом тепловыделения и вентиляции для обеспечения длительного срока службы.

Способ, которым EDFA используется для повышения производительности оптических каналов передачи данных, также важен при выборе EDFA. В зависимости от этого на рынке можно найти три типа EDFAS:

- усилитель EDFA: используется для увеличения оптического выхода оптического передатчика непосредственно перед тем, как сигнал поступает в оптическое волокно;

- встроенный EDFA: оптический сигнал ослабляется по мере его перемещения по оптическому волокну и используется для восстановления оптического сигнала до его первоначального уровня мощности;

- предварительный усилитель EDFA: используется в конце оптического канала для повышения чувствительности оптического приемника.

Перед выбором EDFA нужно учитывать ряд других важных элементов.

Длины волн: нужно убедиться, сколько длин волн пройдет через EDFA, а также начальные и конечные длины волн, например от 1530 до 1562 нм. Для связи с одной длиной волны нужно четко знать точную длину волны.

Бюджет мощности или потерь: бюджет определяет сколько усиления требуется для всей линии связи.

Расположение EDFA: после передатчика, перед приемником или в середине пролета.

EDFA оптоволоконный усилитель показан на рисунке 2.9.

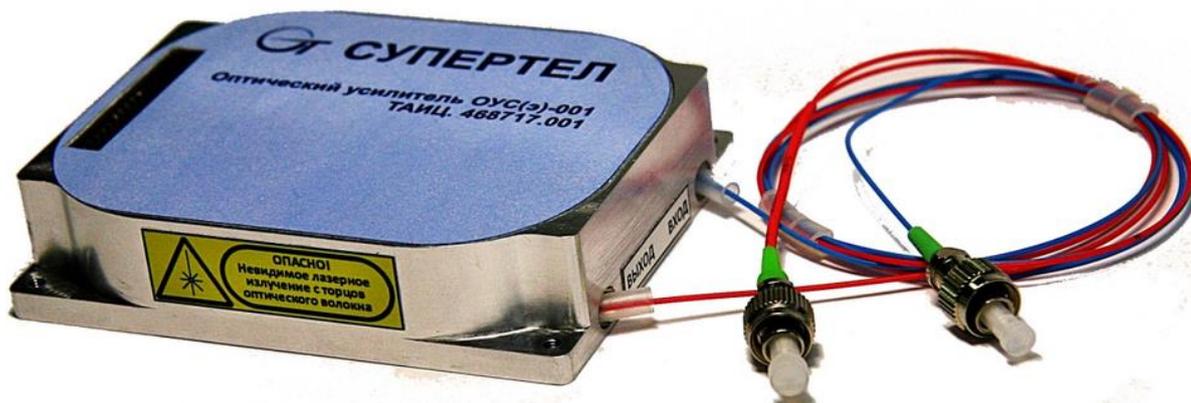


Рисунок 2.7 – EDFA оптоволоконный усилитель

Выбор правильного EDFA требует тщательного подхода. Для уверенности в типах и количестве EDFA нужно изучить рынок производителей, которые поставляют различные EDFA с высоким качеством и низкой ценой, а также бесплатные решения EDFA, удовлетворяющие запросы клиентов.

2.6 Обоснование выбора оборудования многосерцевинной оптической системы с оптическим рамановским усилителем

Поскольку ограничения рабочей полосы и полосы пропускания усилителя EDFA становились все более очевидными, рамановский усилитель был выдвинут в качестве усовершенствованного оптического усилителя, усиливающего сигналы за счет стимулированного рамановского рассеяния. Для удовлетворения будущих потребностей сети он может обеспечить усиление на любой длине волны.

В настоящее время на рынке доступны два вида комбинационных усилителей:

– сосредоточенный рамановский усилитель, который всегда использует DCF (волокно компенсации дисперсии) или высокое нелинейное волокно в качестве среды усиления. Его волокно усиления относительно короткое, как правило, в пределах 10 км;

– распределенный рамановский усилитель. Его усилительной средой является обычное волокно, которое гораздо длиннее, как правило, на десятки километров.

Когда рамановский усилитель работает, лазер накачки может быть подключен к передающему волокну в том же направлении, что и сигнал (сонаправленная накачка), в противоположном направлении (противонаправленная накачка) или в обоих направлениях. Тогда сигналы и лазер накачки будут нелинейно взаимодействовать внутри оптического волокна для усиления сигнала. В целом, противонаправленная накачка более распространена, так как передача шума от насоса к сигналу уменьшается, как показано на рисунке.

Изучив основную информацию о EDFA и рамановских оптических усилителях, нужно учитывать, что рамановский усилитель работает лучше по двум основным причинам:

– имеет широкую полосу, в то время как полоса EDFA составляет всего от 1525 нм до 1565 нм и от 1570 нм до 1610 нм;

– обеспечивает распределенное усиление внутри передающего волокна.

Поскольку передающее волокно используется в качестве усилительной среды в рамановском усилителе, оно может увеличить длину промежутков между усилителями и участками регенерации. За исключением двух преимуществ, упомянутых выше, рамановский усилитель также может быть использован для расширения EDFA.

В таблице 2.1 приведены различия между EDFA и рамановскими оптическими усилителями.

Таблица 2.1 – Сравнительные характеристики EDFA и рамановских усилителей

| Параметр | EDFA усилитель | Рамановский усилитель |
|------------------------|----------------------|-----------------------|
| Длина волны (нм) | 1525÷1565, 1570÷1610 | Все длины волн |
| Усиление (дБ) | > 40 | > 25 |
| Показатель шума (дБ) | 5 | 5 |
| Мощность накачки (дБм) | 25 | > 30 |
| Фактор затрат | Относительно низкий | Относительно высокий |

Наравне с рамановским усилителем много пользователей выбирают и усилители EDFA. По сравнению с рамановским усилителем, усилитель EDFA также имеет много преимуществ,:

- низкая стоимость;
- высокое использование мощности насоса;
- высокая эффективность преобразования энергии;

- хорошая стабильность усиления;
- высокий коэффициент усиления с небольшим количеством перекрестных помех.

2.7 Выбор оборудования многосердцевинной оптической системы

При проектировании многосердцевинной оптической системы для выбора оборудования исходными условиями являются требования к значениям основных показателей, которые должны обеспечиваться в своей работе в период эксплуатации.

Выбор оборудования Alcatel-Lucent 1625 Lambda Extreme Transport (1625 LambdaXtreme ®) – это новое поколение основного транспортного решения от компании Alcatel-Lucent Technologies, предлагающее одну общую платформу.

Основанный на революционных технологиях Bell Labs, 1625 LambdaXtreme помогает упростить и значительно снизить затраты на проектирование, установку и управление сложными сетями.

Для многосердцевинной оптической системы с оптическим усилением на основе эрбия выбран оптический усилитель EDFA-1550/23 (2x19). +23 дБм, 2 выхода по 19 дБм. Волокно оптическое легировано эрбием JDSU (США), лазер накачки JDSU (США), SNMP, вход: -5 ÷ +10дБм, 2 блока питания по 220VAC (опционально 48VDC), 1U, 19".

Основные характеристики оптического усилителя EDFA-1550/23 (2x19) приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Основные характеристики оптического усилителя EDFA-1550/23 (2x19)

| Наименование характеристики | | Показатели  | | | | | | | |
|---|-----------|--|----|----|----|----|----|----|--|
| Категория исполнения | | стандартное | | | | | | | |
| Длина волны оптического диапазона, нм | | 1535÷1565 | | | | | | | |
| Оптические выходы, шт. | | 2 | | | | | | | |
| Мощность оптическая на 1 выход, дБм | | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | |
| Мощность оптическая выходная, общая, дБм | | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | |
| Мощность оптическая входная (дБм) | | -5 ÷ +10 | | | | | | | |
| Стабильный диапазон мощности на выходе, дБм | | ± 0,2 | | | | | | | |
| Шумовой коэффициент | | не более 5.5 | | | | | | | |
| Потери обратного характера, дБм | на входе | не менее 45 | | | | | | | |
| | на выходе | не менее 45 | | | | | | | |
| Оптический разъем | | SC/APC (опционально FC/APC) | | | | | | | |
| Уровень «сигнал/шум» (С/Н), дБ | | не менее 50 | | | | | | | |
| Композитная интермодуляция (СТВ), дБ | | не менее 63 | | | | | | | |
| Дискретная интермодуляция (CSO), дБ | | не менее 63 | | | | | | | |
| Интерфейс сетевой | | RJ45, RS232 | | | | | | | |
| Питающее напряжение, В | | 160÷250 В перем. (48 В пост.) | | | | | | | |

Таблица 2.2 - Продолжение

| | |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Блоки питания, шт. | 2 |
| Диапазон температур – рабочее, °С | -5 ÷ +55 |
| Относительная влажность, % | max 95% (без конденсации) |
| Температура хранения, °С | -30 ÷ +70 |
| Тип корпуса | 1U |
| Масса, кг | менее 6 |
| Габаритные размеры, мм | 483(ширина)×340(глубина)×44(высота) |

Для многосердцевинной оптической системы с рамановским усилением выбран усилитель Raman Optilab (RA-R).

Основные характеристики оптического усилителя Raman Optilab (RA-R) приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Основные характеристики оптического усилителя Raman Optilab (RA-R)

| Наименование характеристики | Показатели  |
|---------------------------------------|--|
| Длина волны оптического диапазона, нм | для RA-C 1525÷1565, для RA-CL 1528÷1605 |
| Среднее значение усиления сигнала, дБ | для RA-C 11÷13, для RA-CL 10÷12 |
| Усиление в плоскости, дБ | для RA-C ± 0.75, для RA-CL ± 0.90 |
| Количество лазера накачки, шт. | для RA-C – 4, для RA-CL – 6 |
| Уровень входного сигнала, дБ | - 40 ÷ +5 |
| Эффективный показатель шума, дБ | - 1.3 |
| Поляризационная модовая дисперсия, пс | max 0.2 |
| Коэффициент усиления поляризации, дБ | max 0.2 |
| Стабильная мощность, дБ | ±0.1 более 8 часов |
| Изоляция входа и выхода, дБ | min 30 |
| Оптические входные разъемы | волокно SMF-28 со стандартом 3 мм. |
| Высокая мощность номинальная | SC/APC, FC/APC, LC/APC (опционально) |
| Оптический выходной порт | SC/APC коннектор, FC/APC, LC/APC (опционально) |
| Рабочая температура, °С | 0° ÷ +50 |
| Температура хранения, °С | - 10 ÷ +70 |
| Источник питания, В/Гц | 80÷240 В, 43÷63 Гц перем, 40 ÷ 58 В пост. (опционально) двойной стандарт питания |
| Потребляемая мощность, Вт | max 80 |
| Контроль/Мониторинг | температура и ток лазера накачки |
| Коммуникационный интерфейс | Кабель интерфейса RS232 от компьютера к блокам монтажа в стойку |
| Сигнализация | Перегрев, перегрев по току |
| Габаритные размеры, дюйм | 19 (ширина)×20.5 (глубина)×3.5 (высота) |

Учитывая, что EDFA и рамановские оптические усилители имеют свои преимущества, стоит вопрос: какой из них следует использовать для усиления сигналов. Это строго зависит от требований волоконно-оптической связи. Нужно учитывать характеристики волоконно-оптической линии связи, такие как длина, тип волокна, затухание и количество каналов при проектировании

сети. Когда усилитель EDFA удовлетворяет потребность, тогда не нужен рамановский усилитель, т.к. рамановский усилитель стоит дороже.

В качестве самого волокна выбираем одномодовое специализированное (SM) волокно 7-ю сердцевинами, серия SSM-7C1500(6.1/125) компании FIBERCORE

Данное волокно выделяется следующими особенностями:

- Одновременная передача различных сигналов по разным сердцевинам
- Возможность использования конструкции с фоточувствительными сердцевинами для записи ВБР
- SSM-7C1500 (6.1 / 125), SPUN - волокно, идеально подходящее для изготовления датчиков 3D-формы;
- Может использоваться для увеличения потенциального объёма передаваемых данных по одному волокну

Таблица 2.4 Характеристики волокна SSM-7C1500(6.1/125)

| Параметр | Значение | Ед. измерения |
|---------------------|-----------------|---------------|
| Длина волны | 1550–1650 | нм |
| Длина волны отсечки | 1300–1500 | нм |
| Числовая апертура | 0,20–0,22 | - |
| Диаметр поля моды | 5,7–6,5 | мкм |
| Тип покрытия | Двойной акрилат | - |
| Рабочая температура | От -55 +85 | °С |
| Диаметр покрытия | 200 ±7 | мкм |

3 РАСЧЕТЫ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ МНОГОСЕРДЦЕВИННОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

3.1 Постановка задачи расчета основных параметров

Теория связанных мощностей (СРТ) – полностью основан на принципе измерения мощности сигнала, когда мощность, введенная в одну сердцевину на входе волокна, переносится в соседние сердцевинки и выходит из них.

Мы выбрали методику измерения параметров продольного волокна и перекрестных помех MCF.

Мы показываем точность измерения распределения MFD в зависимости от коэффициента модовой связи с помощью моделирования.

Исходные данные:

- Многосердцевинные волокна со скоростью 100 Тбит/с;
- показатель затухания волокна 0,158 дБ/км;
- рабочий диапазон 1260 – 1625 нм;
- диаметр оболочки волокна MCF $D = (140 - 240)$ мкм;
- расстояния между центрами сердцевин $\Lambda = (35 - 70)$ мкм;
- расстояние до защитной оболочки $d = (30 - 50)$ мкм;
- число сердцевин $n = 7$;
- радиусы конструкции цилиндрической сердцевинки $r_1 = (4,1 - 5,7)$ мкм, $r_2 = (9 - 12)$ мкм, $r_3 = (13 - 18)$ мкм.

3.2 Анализ перекрестных помех между сердцевинами

Из-за присутствия многочисленных близкорасположенных сердцевин в одной оболочке перекрестные помехи между соседними сердцевинами являются ключевым фактором. Их можно численно охарактеризовать мощностью оптического сигнала, поскольку некоторая часть оптической мощности, распространяющейся по одной из сердцевин, попадает в соседние сердцевинки в процессе передачи (рис.3). ISXT между двумя соседними сердцевинами можно выразить как $X_T \text{ (дБ)} = 10 \lg(P'/P)$, где P и P' – оптическая мощность на выходе той сердцевинки q , в которую вводился сигнал, и соседней сердцевинки p соответственно.

Для анализа развития перекрестных помех принято использовать полуаналитический метод, в котором сначала численно определяют значение постоянной распространения моды β в отдельно взятой сердцевинке с помощью

метода конечных элементов, а затем это значение β используют в методе СМТ/СРТ для оценки перекрестных помех.

Теория связанных мод (СМТ) – мощный метод анализа эффектов связи между соседними сердцевинами в оптическом волокне. Если две сердцевинки расположены достаточно близко друг к другу, то распространяющиеся в каждой сердцевине моды оказываются связанными друг с другом и могут интерферировать. Если же распределение электромагнитного поля в этих сердцевинах в результате такого взаимодействия изменяется мало, то связанные сердцевинки можно описывать с помощью СМТ-подхода. Обычно уравнения для связанных мод записывают следующим образом

$$\frac{dA_p}{dz} = -j \sum_{p \neq q} k_{pq} A_q(z) \exp(j\Delta\beta_{pq}z) f(z) \quad (3.1)$$

Где A_p и A_q – амплитуды моды в сердцевинах p и q ;

$\Delta\beta_{pq} = \beta_p - \beta_q = -\Delta\beta_{qp}$ – разность постоянных распространения между сердцевинами p и q ;

z – координата в направлении распространения.

$$f(z) = \exp[j(\Phi_p - \Phi_q)] \delta f(z) \quad (3.2)$$

– случайная фазовая функция, отвечающая за эффекты скручивания и изгиба оптического волокна, которые меняют оптическую длину. Здесь первая часть, $\exp[j(\Phi_p - \Phi_q)]$ существенно детерминистическая, а вторая часть $\delta f(z)$ – стационарный случайный процесс.

Теория связанных мощностей (СРТ) – полностью основан на принципе измерения мощности сигнала, когда мощность, введенная в одну сердцевину на входе волокна, переносится в соседние сердцевинки и выходит из них. По сравнению с СМТ, СРТ позволяет точнее и быстрее оценить средний уровень перекрестных помех в МСФ с учетом усредненного вклада эффектов изгиба и кручения. Уравнения связанных мощностей можно записать в виде:

$$\frac{dP_p}{dz} = \sum_{p \neq q} h_{pq}(z) [P_q(z) - P_p(z)] \quad (3.3)$$

где P_p и P_q – средние мощности сигналов в сердцевинах p и q ;

h_{pq} – коэффициент связи по мощности между сердцевинами p и q .

При простейшем решении уравнений связи можно получить выражение для коэффициента связи по мощности:

$$h_{pq} = \frac{2k_{pq}^2 R_b}{\beta \Lambda} \quad (3.4)$$

где R_b – радиус изгиба.

Следовательно, окончательное выражение для среднего уровня перекрестных помех X_{T_m} между двумя соседними сердцевинами в МСФ можно записать как:

$$X_{T_\mu} \approx h_{pq} L \approx \frac{2k_{pq}^2 R_b}{\beta \Lambda} L \quad (3.5)$$

3.3 Анализ дисперсии для многосердцевинного оптического волокна

Наряду с перекрестными помехами, серьезным препятствием является дисперсия – расплывание импульса при распространении сигнала по МСФ. При конструировании сердцевины, удовлетворяющей условиям одномодового распространения, дисперсия должна находиться в допустимых пределах (менее $21 \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$). Дисперсия $D(\lambda)$ пропорциональна второй производной эффективного показателя преломления n_{eff} по длине волны и обычно:

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re } n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} \quad (\text{пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}) \quad (3.6)$$

где c – скорость света в вакууме;
 $\text{Re } n_{\text{eff}}$ – действительная часть n_{eff} .

Стоит учитывать то, что влияние дисперсии, которая не превышает показатель более $6 \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$ на $\lambda = 1550 \text{ нм}$, очень мало для всех структур МСФ.

3.4 Расчет взаимного влияния между сердцевинами

Перекрестные помехи (crosstalk, ХТ) можно определить как помехи, обусловленные наложением магнитного/электрического поля сигнала на сигналы в соседних сердцевинах.

Учитывая исходные данные и длину волокна $L = 20 \text{ км}$, вычислим перекрестные помехи для 7-ми сердцевинного волокна на длине волны 1550 нм :

$$X_T = \frac{2k^2 R L}{\beta \Lambda} \quad (3.7)$$

где k коэффициент связи между взаимодействующими сердцевинами;

- R радиус намотки волокна = 140 мм;
- L длина волокна = 20 км;
- β постоянная распространения в сердцевине.
Коэффициент связи k можно выразить в виде:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2 \cdot 3.14}{1550 \cdot 10^{-9}} = 4.05 \cdot 10^{-12}$$

где λ длина волны 1550 нм.

Постоянная распространения в сердцевине выражается как:

$$\beta = kn = 1.4551 \cdot 4.05 \cdot 10^{-12} = 5,89 \cdot 10^{-12}$$

Где n – показатель преломления в сердцевине 1.4551.

Далее необходимо вычислить сами перекрестные помехи на длине волн 1550 нм:

$$X_{T_{C0}} = \frac{2k^2RL}{\beta\lambda} = \frac{2 \cdot (4.05 \cdot 10^{-12}) \cdot 0.14 \cdot 2 \cdot 10^4}{5.89 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 10^{-5}} = -45.91 \text{ дБ}$$

Общую оценку ухудшения (worst) XT можно записать:

$$X_{T_{\text{worst}}} = XT + 10 \log n = -45.91 + 10 \log 7 = -37.459 \text{ дБ}$$

Где n - число влияющих сердцевин 7.

Таблица 3.1 Конструктивные параметры многосердцевинного волокна

| Параметры | C0 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Показатель преломления сердцевин | 1.4551 | 1.4558 | 1.4559 | 1.4575 | 1.4598 | 1.4632 |
| Относительная разность показателей преломления сердцевина-оболочка | 0.35 | 0.33 | 0.40 | 0.51 | 0.67 | 0.90 |
| Эффективный показатель преломления | 1.452454 | 1.452451 | 1.453115 | 1.453921 | 1.455188 | 1.456957 |
| Длина волны отсечки | 1517 | 1514 | 1517 | 1518 | 1511 | 1517 |
| Радиус сердцевин | 4.5 | 5.0 | 4.5 | 4.0 | 3.5 | 3.0 |
| Диаметр оболочки | 125 | 125 | 125 | 125 | 125 | 125 |

| Параметры | C0 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Показатель преломления оболочки | 1.45 | 1.45 | 1.45 | 1.45 | 1.45 | 1.45 |

Теперь мы можем построить графики зависимости перекрестных помех, учитывая параметры конструкции многосердцевинного волокна:

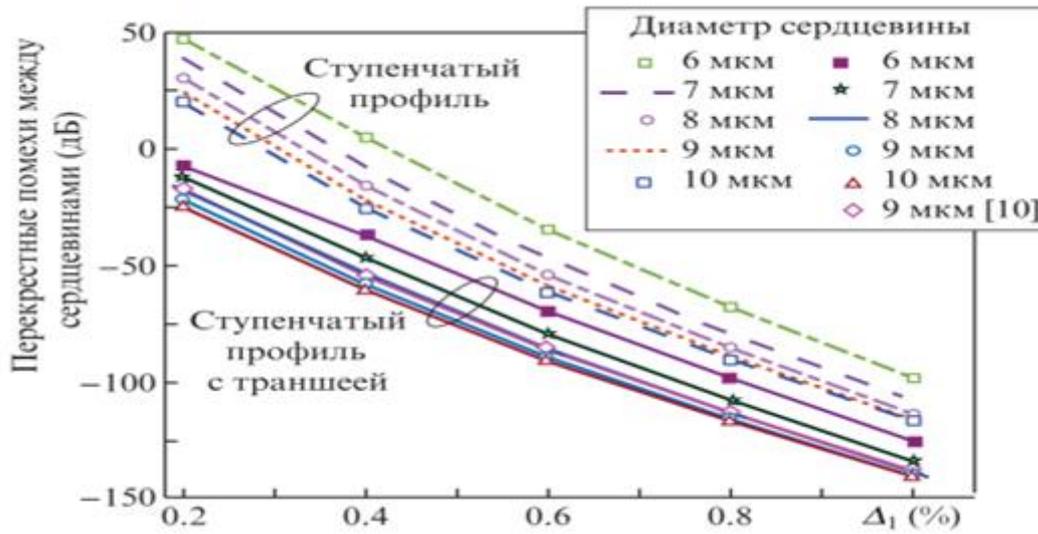


Рисунок 3.1 – График зависимости перекрестных помех от разности показателей преломления Δ_1 при шаге структуры $\Lambda = 40$ мкм

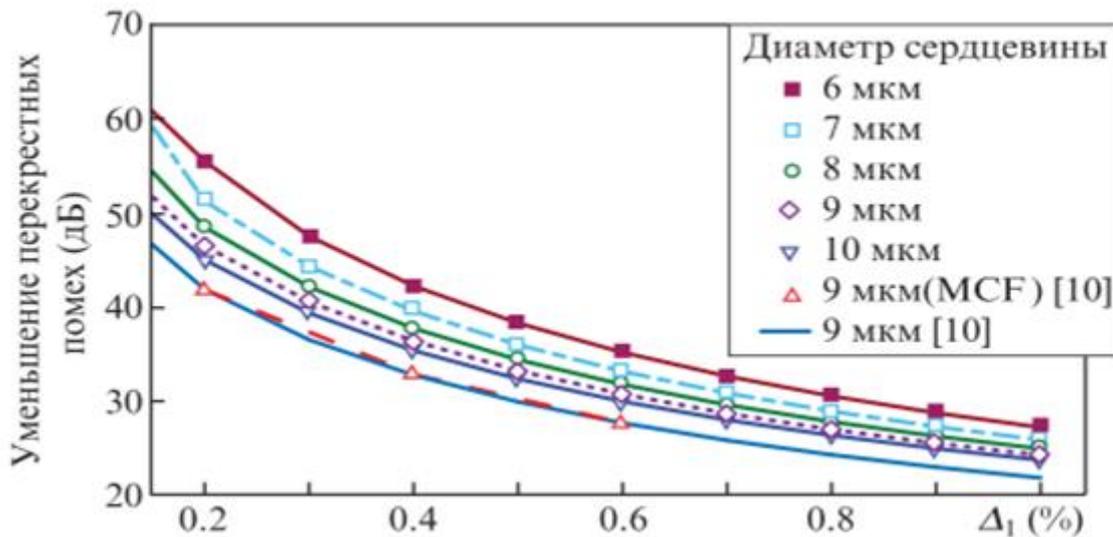


Рисунок 3.2 – Зависимости уменьшения перекрестных помех $\Delta_{ХТ}$ от Δ_1 при $\Lambda = 40$ мкм

Δ_1 следует выбирать очень точно с учетом баланса факторов перекрестных помех и локализации моды. Так, при диаметре сердцевин $2 \times 1 = 9$ мкм и $\Delta_1 > 0.40\%$ происходит распространение высших мод по сердцевинам MCF, что ухудшает свойства волокна по отношению к перекрестным помехам. Следовательно, $\Delta_1 = 0.40\%$ – оптимальное значение при диаметре сердцевин 9 мкм.

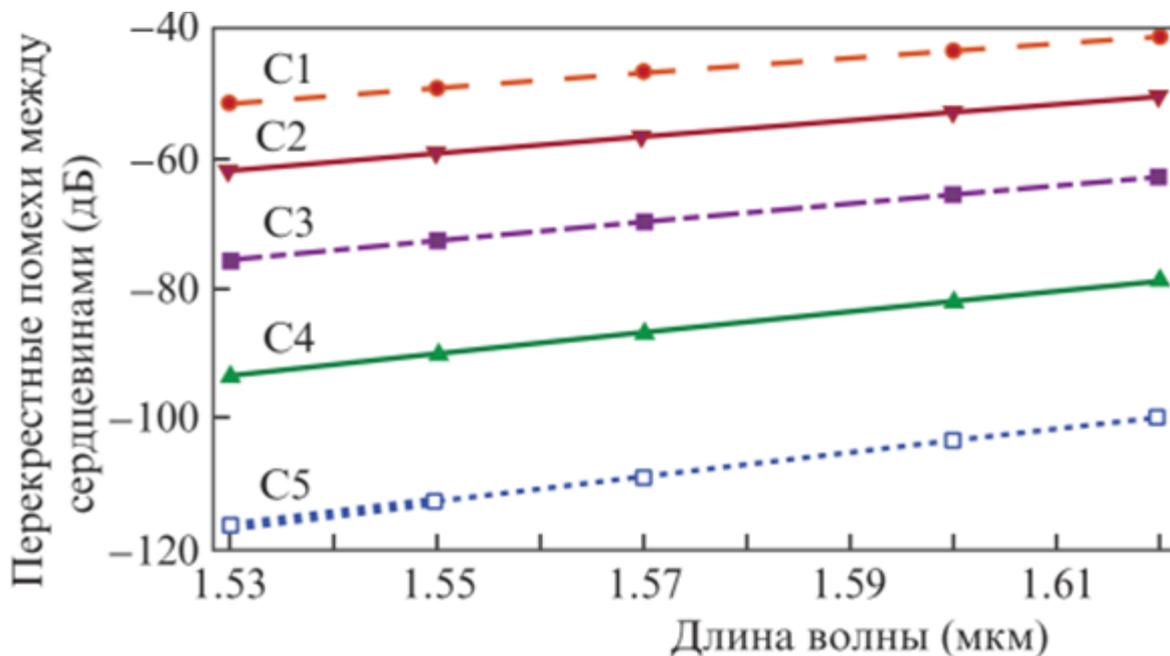


Рисунок 3.3 – Зависимости перекрестных помех от длины волны при глубине траншеи $\Delta_2 = -0.70\%$ и $\Lambda = 40$ мкм.

Перекрестные помехи медленно растут с увеличением радиуса изгиба волокна. Снижение уровня перекрестных помех наблюдается при глубине траншеи -1.40% . Видно, что при радиусе изгиба волокна 140 мкм C3 – C5 имеют ультранизкий (менее -70 дБ) уровень перекрестных помех, который обусловлен, главным образом, сильной локализацией мод и, следовательно, меньшей связью между соседними сердцевинами, поскольку для этих структур характерны большие значения Δ_1 .

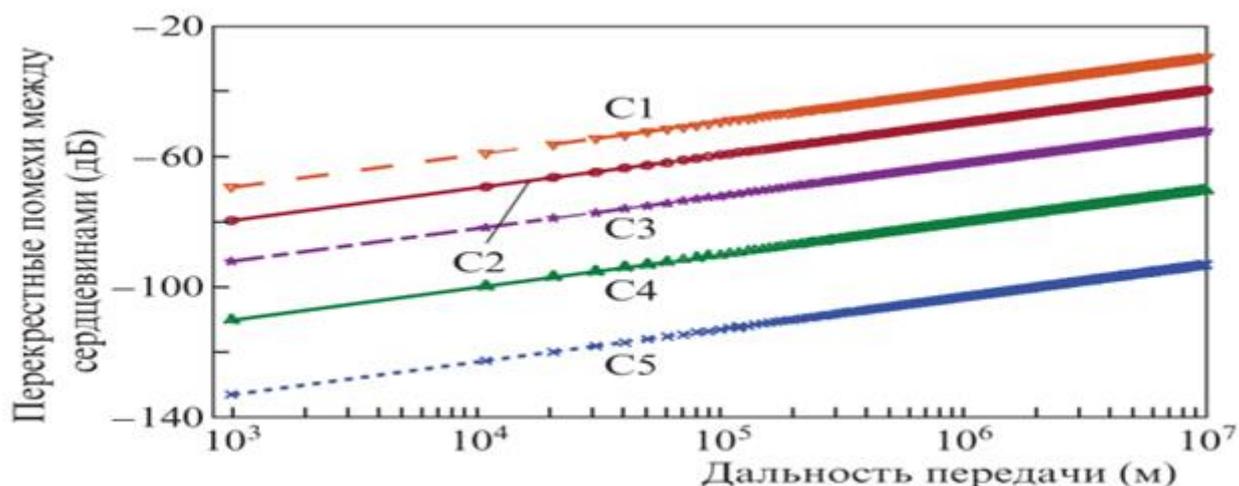


Рисунок 3.4 – График зависимости перекрестных помех от длины волокна

Результаты расчета перекрестных помех при изменении дальности передачи до 10000 км для всех пяти предложенных структур волокна при распространении основной моды и для относительных глубин траншеи $\Delta_2 = -0.70\%$ и -1.40% . Рабочая длина волны, шаг структуры и радиус изгиба волокна предполагались равными 1550 нм, 40 мкм и 140 мм соответственно. При дальности передачи 100 км ультранизкий уровень перекрестных помех (не более -70 дБ) достигается для C3–C5

Соответственно составим таблицу для оценки уровня перекрестных помех;

Таблица 3.2 Уровень перекрестных помех ХТ

| Структура | ХТ без траншеи (дБ) | Траншея, $\Delta_2 = -0.70\%$ | Траншея, $\Delta_2 = -1.40\%$ |
|-----------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| C0 | -11.49 | -45.91 | -67.04 |
| C1 | -11.44 | -49.37 | -72.79 |
| C2 | -23.48 | -59.58 | -82.57 |
| C3 | -38.06 | -72.08 | -94.55 |
| C4 | -58.75 | -90.18 | -111.88 |
| C5 | -84.36 | -113.05 | -133.81 |

3.5 Расчет дисперсии для многосердцевинного волокна

Дисперсия $D(1)$ пропорциональна второй производной эффективного показателя преломления n_{eff} по длине волны, вычислим значение дисперсии для 5 конструкции соответственно их параметрам:

$$D_{c1}(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} = -\frac{1550}{3 \cdot 10^8} \frac{40^2 \cdot 1.4524}{40 \cdot 1550^2} = -1,9493 \cdot 10^{-6} \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$$

$$D_{c2}(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} = -\frac{1550}{3 \cdot 10^8} \frac{40^2 \cdot 1.4553}{40 \cdot 1550^2} = -2,1493 \cdot 10^{-6} \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$$

$$D_{c3}(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} = -\frac{1550}{3 \cdot 10^8} \frac{40^2 \cdot 1.454}{40 \cdot 1550^2} = -2,5498 \cdot 10^{-6} \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$$

$$D_{c4}(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} = -\frac{1550}{3 \cdot 10^8} \frac{40^2 \cdot 1.4556}{40 \cdot 1550^2} = -2,9457 \cdot 10^{-6} \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$$

$$D_{c5}(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} = -\frac{1550}{3 \cdot 10^8} \frac{40^2 \cdot 1.4569}{40 \cdot 1550^2} = -5,1826 \cdot 10^{-6} \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$$

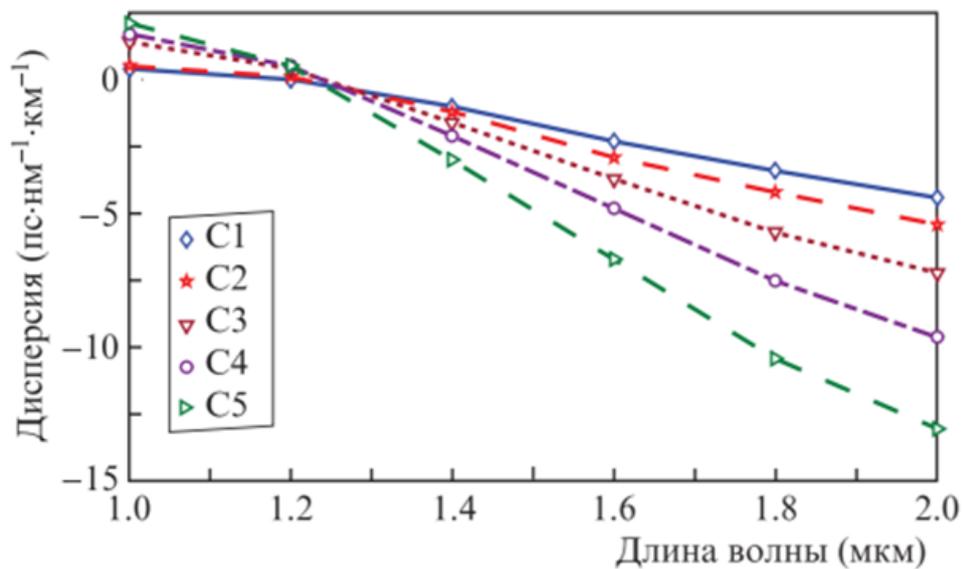


Рисунок 3.5 – График зависимости дисперсии от длины волны для пяти структур.

В протяженных ВОЛС, в которых достигается компенсация хроматической дисперсии волокна, основное линейное искажение передаваемого сигнала связано с поляризационной модовой дисперсией (PMD). Она обусловлена дифференциальной групповой задержкой между лучами с основными состояниями поляризации.

Величина поляризационной модовой дисперсии $D_{\text{пмд}}$ рассчитывается по формуле:

$$D_{\text{пмд}} = T \cdot \sqrt{L} \quad (3.8)$$

Где T – коэффициент удельной поляризационной модовой дисперсии.

Учитывая характеристики волокна, вычислим поляризационную модовую дисперсию:

$$D_{\text{ПМД1}} = T \cdot \sqrt{L} = 0.02951 \cdot \sqrt{20} = 0.132 \text{ пс/км}^{\frac{1}{2}}$$

$$D_{\text{ПМД2}} = T \cdot \sqrt{L} = 0.0299 \cdot \sqrt{20} = 0.134 \text{ пс/км}^{\frac{1}{2}}$$

$$D_{\text{ПМД3}} = T \cdot \sqrt{L} = 0.009 \cdot \sqrt{20} = 0.044 \text{ пс/км}^{\frac{1}{2}}$$

$$D_{\text{ПМД4}} = T \cdot \sqrt{L} = 0.0207 \cdot \sqrt{20} = 0.093 \text{ пс/км}^{\frac{1}{2}}$$

$$D_{\text{ПМД5}} = T \cdot \sqrt{L} = 0.0458 \cdot \sqrt{20} = 0.205 \text{ пс/км}^{\frac{1}{2}}$$

$$D_{\text{ПМД6}} = T \cdot \sqrt{L} = 0.0259 \cdot \sqrt{20} = 0.116 \text{ пс/км}^{\frac{1}{2}}$$

$$D_{\text{ПМД7}} = T \cdot \sqrt{L} = 0.0237 \cdot \sqrt{20} = 0.106 \text{ пс/км}^{\frac{1}{2}}$$

Общее значение PMD по среднеквадратичному значению определяется как:

$$D_{\text{ПМД}} = \sqrt{D_{\text{ПМД1}}^2 + D_{\text{ПМД2}}^2 + D_{\text{ПМД3}}^2 + D_{\text{ПМД4}}^2 + D_{\text{ПМД5}}^2 + D_{\text{ПМД6}}^2 + D_{\text{ПМД7}}^2} \quad (3.9)$$

Далее вычислим общее значение PMD:

$$\begin{aligned} D_{\text{ПМД}} &= \sqrt{0.132^2 + 0.134^2 + 0.044^2 + 0.093^2 + 0.205^2 + 0.116^2 + 0.106^2} = \\ &= 0.779 \text{ пс/км}^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ многосердцевидных оптических волокон, где рассмотрены основные понятия многосердцевидных волокон и аналитический обзор многосердцевидных волокон в оптических системах.

Построены схемы и многосердцевидных волоконно-оптических систем передачи. Для многосердцевидных оптических систем передачи построены графики зависимости взаимных влияния между сердцевинами.

Проведен выбор оборудования многосердцевидных волоконно-оптических систем передачи с оптическим усилением на основе эрбия, разработана структурная схема EDFA оптоволоконного усилителя.

Проведен выбор оборудования многосердцевидных волоконно-оптических систем с оптическим рамановским усилителем, разработана структурная схема рамановского усилителя.

На основе анализа сравнительных характеристик EDFA и рамановских усилителей произведен выбор оборудования и определены основные характеристики оптического усилителя EDFA-1550/23 (2x19) и Raman Optilab (RA-R).

Проведены расчеты основных параметров многосердцевидных волоконно-оптических систем передачи, где сформулирована постановка задачи, анализ взаимных влияния сердцевины и зависимости дисперсии.

Расчеты перекрестных помех проводились полуаналитическим методом для 7-сердцевидного однородного волокна с траншеями показателя преломления вокруг сердцевины.

Моделирование и анализ, а также построение графиков проводились с помощью таких программ как Optisystem и Mathcad.

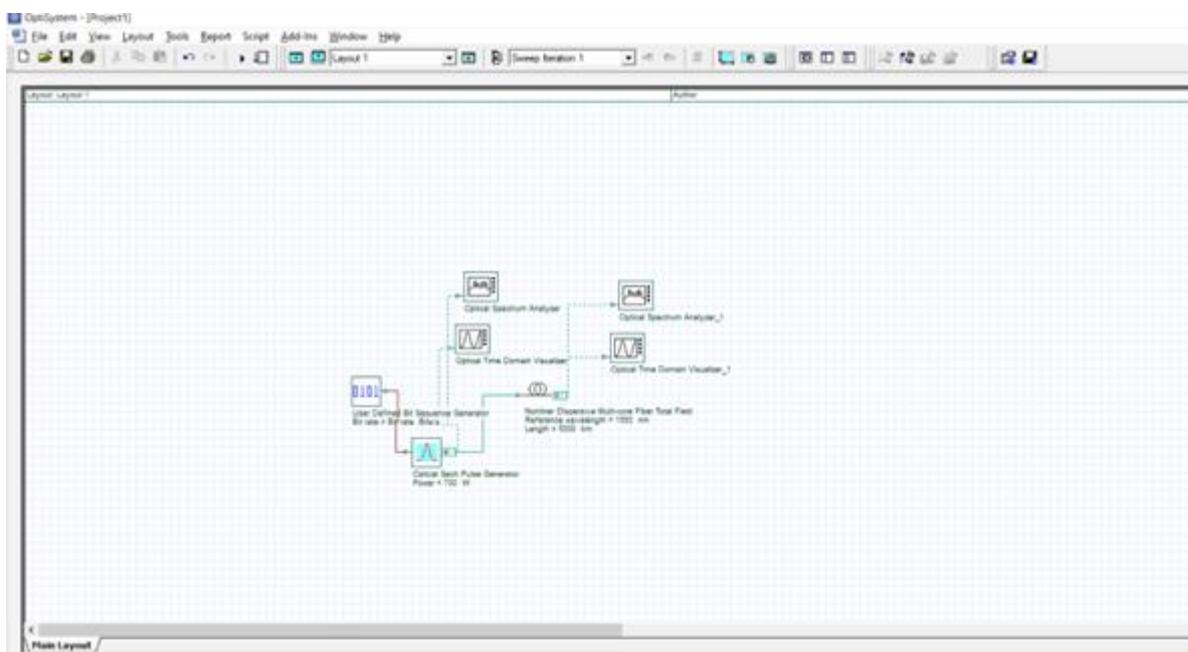
Исследованы уровень перекрестных потерь и его изменение при изменении таких конструктивных параметров волокна, как относительная разность показателей преломления сердцевина – оболочка. Из результатов моделирования видно, что уровень перекрестных помех и его изменение существенно зависят от указанных параметров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Фокин В.Г., Ибрагимов Р.З. Оптические системы с терабитными и петабитными скоростями передачи: Учебное пособие/СибГУ.–Новосибирск, 2015. – 161 с.:ил.
- 2 Розанов Н.Н. Диссипативные оптические солитоны. От микро к нано- и атто-. Издательство: М.: Физматлит, 2011. – 536с.
- 3 Борисов А.Б. Квазиоднородные магнитные солитоны. Издательство: Физматлит, 2015. – 520 с.
- 4 Асеева Н.В., Громов Е.М., Тютин В.В. Взаимодействие коротких векторных однокомпонентных солитонов (амплитудно-фазовые эффекты).–М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 52с.
- 5 Mollenauer, Linn F. Solitons in Optical Fibers: Fundamentals and Applications., Academic Press.-Publication Year 2017.
- 6 Fedor Mitschke. Fiber Optics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2016. p. 349.
- 7 Скляров О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. Уч. пособие, 3-е изд., Издательство: Лань-Пресс, 2016. – 268 с.
- 8 Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. Издательство: Физматлит, 2015.– 648с.
- 9 Гончаренко А.М. Оптические гауссовы пучки и солитоны. Издательство: Беларуская навука. 2011. – 126с.
- 10 Александр Поляков. Волоконно-оптические информационно-измерительные WDM-системы.– М.:LAP Lambert Academic Publishing, 2018. – 324 с.
- 11 Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК.–М.:Корона-Век, 2014. – 368 с.
- 12 P. J. Winzer and G. J. Foschini, “MIMO capacities and outage probabilities in spatially multiplexed optical transport systems,” Opt. Express19(17), 16680–16696 (2011)
- 13 T. Morioka, “New generation optical infrastructure technologies: EXAT initiative: toward 2020 and beyond,” in Proc. OECC2009, paper FT4(2009)

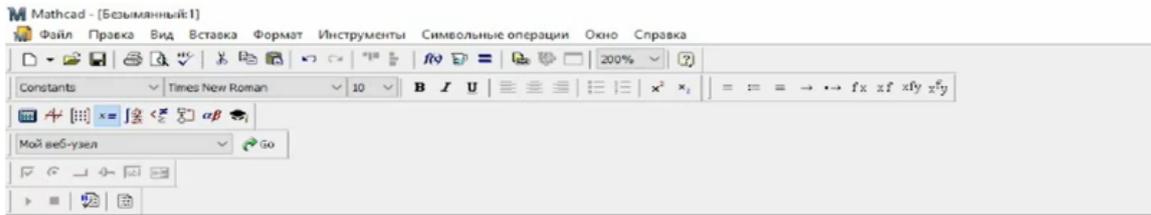
Приложение А

Схема построения дисперсионных характеристик



Приложение Б

Вычисление дисперсии для многосердцевинного волокна



$$D_{\text{пмд1}} = T \cdot \sqrt{L} = 0.02951 \cdot \sqrt{20} = 0.132 \text{ пс/км}^{\frac{1}{2}}$$

$$D_{\text{пмд2}} = T \cdot \sqrt{L} = 0.0299 \cdot \sqrt{20} = 0.134 \text{ пс/км}^{\frac{1}{2}}$$

$$D_{\text{пмд3}} = T \cdot \sqrt{L} = 0.009 \cdot \sqrt{20} = 0.044 \text{ пс/км}^{\frac{1}{2}}$$

$$D_{\text{пмд4}} = T \cdot \sqrt{L} = 0.0207 \cdot \sqrt{20} = 0.093 \text{ пс/км}^{\frac{1}{2}}$$

$$D_{\text{пмд5}} = T \cdot \sqrt{L} = 0.0458 \cdot \sqrt{20} = 0.205 \text{ пс/км}^{\frac{1}{2}}$$

$$D_{\text{пмд6}} = T \cdot \sqrt{L} = 0.0259 \cdot \sqrt{20} = 0.116 \text{ пс/км}^{\frac{1}{2}}$$

$$D_{\text{пмд7}} = T \cdot \sqrt{L} = 0.0237 \cdot \sqrt{20} = 0.106 \text{ пс/км}^{\frac{1}{2}}$$

$$D_{c1}(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} = -\frac{1550}{3 \cdot 10^8} \frac{40^2 \cdot 14524}{40 \cdot 1550^2} = -1,9493 \cdot 10^{-6} \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$$

$$D_{c2}(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} = -\frac{1550}{3 \cdot 10^8} \frac{40^2 \cdot 14553}{40 \cdot 1550^2} = -2,1493 \cdot 10^{-6} \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$$

$$D_{c3}(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} = -\frac{1550}{3 \cdot 10^8} \frac{40^2 \cdot 1454}{40 \cdot 1550^2} = -2,5498 \cdot 10^{-6} \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$$

$$D_{c4}(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} = -\frac{1550}{3 \cdot 10^8} \frac{40^2 \cdot 14556}{40 \cdot 1550^2} = -2,9457 \cdot 10^{-6} \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$$

$$D_{c5}(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} = -\frac{1550}{3 \cdot 10^8} \frac{40^2 \cdot 14569}{40 \cdot 1550^2} = -5,1826 \cdot 10^{-6} \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$$