

Основной целью диссертационной работы является оценка влияния нелинейных искажений, а именно фазовой самомодуляции сигнала, на качество передачи информации по каналам телекоммуникационных систем с плотным волновым мультиплексированием.

Для достижения поставленной цели с учетом общих принципов организации телекоммуникационных систем DWDM и оценки качества их функционирования в диссертации выполнена задача по исследованию влияния оптической среды на характеристики оптических сигналов, а так же задача оценки влияния нелинейных эффектов на изменение мощности передаваемых сигналов и оптических шумов.

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СВЯЗИ, ИНФОРМАТИЗАЦИИ И  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ**

*На правах рукописи*

**ПОЛЕТАЕВА ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА**

**Исследование влияния параметров оптических каналов с разделением  
по длине волны излучения на качество передачи сигналов**

**5А311301– Устройства и системы передачи информации**

**Диссертация**

**на соискание академической степени магистра**

**Научный руководитель:  
к.т.н., профессор Исаев Р.И.**

**Ташкент - 2013**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	<b>Введение.....</b>	<b>4</b>
<b>Глава I.</b>	<b>Глава I. Анализ современных оптических систем с разделением по длине волны излучения и перспективы их развития .....</b>	<b>7</b>
	Анализ текущего состояния оптических систем с разделением по длине волны излучения .....	7
<b>1.1.</b>	<b>Анализ перспектив развития оптических систем с разделением по длине волны излучения .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2.</b>	<b>Анализ перспектив развития оптических систем с разделением по длине волны излучения .....</b>	<b>23</b>
	Показатели качества передачи информации в системах с разделением по длине волны излучения.....	31
<b>1.3.</b>	<b>Выводы по главе I .....</b>	
	<b>Анализ факторов, влияющих на качество передачи в оптических системах с разделением по длине волны излучения .....</b>	<b>32</b>
	Анализ процессов взаимных влияний между оптическими каналами .....	42
<b>Глава II.</b>	<b>Анализ факторов, влияющих на качество передачи информации в оптических системах .....</b>	<b>53</b>
	<b>Выводы по главе II .....</b>	
<b>2.1</b>	<b>Исследование влияния нелинейных искажений на качество передачи в телекоммуникационных системах с разделением по длине волны излучения .....</b>	<b>54</b>
<b>2.2.</b>	<b>Методы оценки качества оптических систем с разделением по длине волны излучения при помощи имитационного моделирования на Matlab.....</b>	<b>54</b>
	Исследование влияния фазовой самомодуляции .....	62

<b>Глава III.</b>	оптического сигнала на качество каналов ВОСП СРК.....	
	Исследование влияния фазовой самомодуляции и рамановского усиления оптического сигнала на качество каналов ВОСП СРК .....	<b>73</b> <b>81</b> <b>82</b>
<b>3.1.</b>	<b>Выводы по главе II.....</b>	<b>83</b>
	<b>Заключение.....</b>	<b>88</b>
	<b>Список литературы.....</b>	
	<b>Приложение .....</b>	
<b>3.2.</b>		
<b>3.3.</b>		

## ВВЕДЕНИЕ

"Отечественная наука создала мощный интеллектуальный потенциал, который находит свое практическое применение во многих сферах жизни, служит основой для укрепления национальной государственности и экономической независимости республики" [1].

"Все большее значение приобретает ускоренная реализация мер и проектов в сфере информационно-коммуникационных и телекоммуникационных технологий. Мы должны отдавать себе отчет, что без кардинального, я бы сказал взрывного продвижения по пути широко внедрения во все сферы экономики, в нашу повседневную жизнь современных информационно-коммуникационных систем трудно видеть перспективу" [2].

По мере роста объемов трафика перед операторами связи все более актуальным становится вопрос о модернизации существующих транспортных сетей. Рост потребностей в увеличении объемов связи привел к появлению и становлению новых волоконно-оптических технологий, в частности технологий спектрального (частотного) мультиплексирования (уплотнения) каналов, получивших название WDM и DWDM технологий [16]. Технология плотного волнового (спектрального) мультиплексирования (DWDM) предназначена для создания оптических магистралей нового поколения, работающих на мультигигабитных и терабитных скоростях. Возможность DWDM интегрироваться с перспективными технологиями и протоколами передачи цифровой информации делает ее незаменимой в процессе конвергенции между различными видами и службами связи [17].

В настоящее время ведется интенсивное внедрение технологии плотного волнового мультиплексирования (DWDM), которая позволяет преодолеть ограничения на пропускную способность канала и существенно увеличить скорость передачи данных, реализовать единое информационное

пространство, расширить перечень предоставляемых телекоммуникационных услуг. Причем используются уже проложенный волоконно-оптический кабель и стандартная аппаратура временного мультиплексирования [15].

Актуальными научными задачами в связи с этим являются исследования влияния оптической среды существующих волоконно-оптических линий связи на качество передачи информации в оптических каналах систем DWDM. Эти исследования позволят определить предельные параметры систем DWDM, при которых обеспечивается требуемое качество передачи информации с учетом особенностей передаваемого трафика.

Объектом исследования диссертационной работы являются оптические системы со спектральным разделением каналов, предметом исследования являются основные факторы, способные снизить качество передачи в системах со спектральным разделением каналов.

Основной целью диссертационной работы является оценка влияния нелинейных искажений, а именно фазовой самомодуляции сигнала, на качество передачи информации по каналам телекоммуникационных систем с плотным волновым мультиплексированием.

Для достижения поставленной цели с учетом общих принципов организации телекоммуникационных систем DWDM и оценки качества их функционирования в диссертации выполнена задача по исследованию влияния оптической среды на характеристики оптических сигналов, а так же задача оценки влияния нелинейных эффектов на изменение мощности передаваемых сигналов и оптических шумов.

В известных работах Г. Агравала, А. Жирара, Н.Н. Слепова, Р.Р. Убайдуллаева, А.Б. Иванова, В.Н. Листвина, Г.С. Ландсберга и др. при исследовании влияния нелинейных эффектов на процессы распространения оптического сигнала не рассматривалось их воздействие на качество передачи. Результаты научных исследований по указанной проблематике

позволят производить расчеты показателей качества передачи информации по оптическим каналам существующих и перспективных систем DWDM.

В диссертационной работе получены следующие результаты:

- произведен анализ перспектив развития оптических систем с разделением по длине волны излучения;
- произведено исследование факторов влияющих на качество передачи в оптических системах с разделением по длине волны излучения;
- построена имитационная модель одного канала ВОСП СРК, учитывающая шум усиленного спонтанного излучения оптических усилителей, а также линейные и нелинейные искажения оптического волокна.

Практическая ценность работы состоит в том, что её результаты позволяют оценивать качество передачи в оптических каналах системы DWDM с учетом влияния фазовой самомодуляции, а так же предложены рекомендации по использованию оптических каналов для передачи трафика разных технологий. Исследование влияния нелинейных эффектов на энергетические параметры оптического сигнала позволяет определить допустимые значения характеристик оптического волокна и системы DWDM в условиях обеспечения заданного качества передачи информации. Программное обеспечение для расчета показателей качества передачи возможно использовать при проектировании и эксплуатации систем DWDM с различными исходными данными.

В отличие от большинства публикаций, где при расчете вероятности ошибки оптического канала учитывается только четырехволновое смешение [39] и спонтанный шум оптического усилителя [40], расчетах учитывалась фазовая самомодуляция, приводящая к искажению формы импульсов выходного сигнала и деградации параметров качества оптического канала.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения.

# ГЛАВА I. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ПО ДЛИНЕ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ

## 1.1. Анализ текущего состояния оптических систем с разделением по длине волны излучения

Традиционные технологии телекоммуникаций позволяют по одному оптическому волокну передать только один сигнал. Суть же технологии спектрального, или оптического уплотнения заключается в возможности организации множества отдельных сигналов SDH по одному волокну, а, следовательно, многократном увеличении пропускной способности линии связи.

Основы этой технологии были заложены в 1958, еще до появления самой волоконной оптики. Однако прошло около 20 лет, прежде чем были созданы первые компоненты мультиплексных систем. Первоначально они создавались для лабораторных исследований, и лишь в 1980 году технология спектрального уплотнения (Wavelength Division Multiplexing, WDM) была предложена для телекоммуникаций. А еще через пять лет в исследовательском центре компании AT&T была реализована технология плотного спектрального уплотнения (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM), когда удалось в одном оптическом волокне создать 10 каналов по 2 Gbps [19].

Принцип мультиплексирования, используемый DWDM, имеет аналог в наиболее старой и заслуженной технологии мультиплексирования с разделением по частоте (Frequency Division Multiplexing, FDM), применяемой в аналоговой телефонии. Подобно тому, как видимый человеческим глазом свет состоит из различных цветов, на которые можно его разложить, а затем опять собрать, так и передаваемый по технологии DWDM световой поток, состоит из различных длин волн ( $\lambda$ ). Действительно, так как длина волны обратно пропорциональна ее частоте, то

"смешивание" в одном волокне световых сигналов с разной длиной волны - это "смешивание" сигналов разной частоты, но только в совершенно другом диапазоне - терагерцовом, т.е. по одному волокну можно передавать более сотни стандартных каналов.

DWDM-технология пришла на смену своей предшественнице - технологии WDM, которая использует четыре спектральных канала в окнах прозрачности 1310 нм и 1550 нм, с разносом несущих в 800 - 400 ГГц (стандартной классификации WDM не существует, встречаются системы WDM и с другими характеристиками).

Мультиплексирование DWDM называется "плотным" из-за того, что в нем используется существенно меньшее расстояние между длинами волн, чем в WDM. На сегодня рекомендацией ITU-T G.692 определены: частотный план с разнесением частот между соседними каналами 100 ГГц (0,8 нм), в соответствии с которым для передачи данных применяется 41 волна в диапазоне от 1528,77 нм (196,1 ТГц) до 1560,61 нм (192,1 ТГц); частотный план с шагом в 50 ГГц (0,4 нм), позволяющий передавать в этом же диапазоне 81 длину волны. Некоторыми компаниями выпускается также оборудование, способное работать с частотной сеткой с шагом 25 ГГц (называемое High-Dense WDM, HDWDM) [5].

Реализация частотных планов с шагом 50 ГГц и 25 ГГц предъявляет гораздо более жесткие требования к оборудованию DWDM, особенно в том случае, если каждая волна переносит сигналы со скоростью модуляции 10 Гбит/с и выше (STM-64, STM-256 или 10GE). Это связано с тем, что ширина спектра передаваемого сигнала (при потенциальном кодировании NRZ, применяемом в системах SDH и 10GE) пропорциональна частоте модуляции, поэтому спектр сигнала STM-64 примерно в четыре раза шире спектра сигнала STM-16. Теоретически зазоры между соседними волнами в 50 ГГц и даже 25 ГГц позволяют передавать данные со скоростями 10 Гбит/с, но при этом нужно обеспечить высокую точность частоты и минимально

возможную ширину спектра несущей волны, а также снизить уровень шумов, чтобы минимизировать эффект перекрытия спектра, показанный на рисунке 1.1 [3].

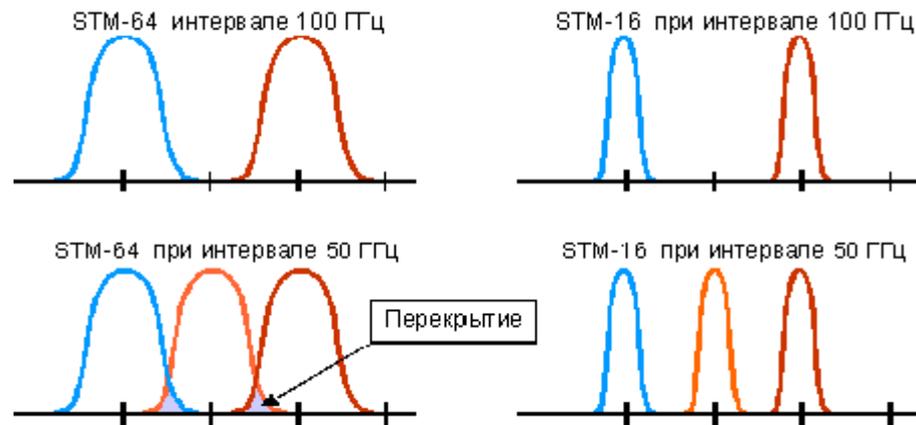


Рис. 1.1. Перекрытие спектра соседних волн для разных частотных планов и скоростей передачи данных

Для того чтобы организовать в одном волокне несколько оптических каналов сигналы SDH «окрашивают», то есть меняют оптическую длину волны для каждого такого сигнала. «Окрашенные» сигналы смешиваются при помощи мультиплексора и передаются в оптическую линию. В конечном пункте происходит обратная операция - «окрашенные» сигналы SDH выделяются из группового сигнала и передаются потребителю.

Естественно, что для того чтобы передавать по одному волокну множество волновых потоков, технология DWDM обеспечена оборудованием особой точности. Так, погрешность длины волны, которую обеспечивает стандартный лазер, применяемый в телекоммуникациях, примерно в сто раз больше, чем требуется в системе DWDM.

По мере прохождения по оптическому волокну сигнал постепенно затухает. Для того чтобы его усилить, используются оптические усилители. Протяженность участка между оптическими усилителями может достигать

160 км и более, что обеспечивает экономичность создаваемых магистралей DWDM, в которых длина мультиплексной секции составляет на сегодня 600-3000 км при применении 1-7 промежуточных оптических усилителей. Это позволяет передавать данные на расстояния до 4000 км без перевода оптического сигнала в электрический (для сравнения, в SDH это расстояние не превышает 200 км) [4].

Новые исследования в области EDFA привели к появлению усилителей, работающих в так называемом L-диапазоне (4-е окно прозрачности), от 1570 нм до 1605 нм. Использование этого диапазона, а также сокращение расстояния между волнами до 50 ГГц и 25 ГГц позволяет нарастить количество одновременно передаваемых длин волн до 80 - 160 и более, то есть обеспечить передачу трафика со скоростями 800 Гбит/с - 1,6 Тбит/с в одном направлении по одному оптическому волокну.

Сети DWDM проходят в своем развитии те же этапы, что и сети SDH. Как в SDH-технологии, так и DWDM-технологии имеются базовые наборы стандартных топологий сети:

- точка-точка;
- кольцо, шина, дерево и звезда;
- сотовая структура.

Естественным развитием топологии "точка - точка" является построение DWDM-сети, в которой промежуточные узлы выполняют функции мультиплексоров ввода-вывода (рис. 1.2).

Можно выделить четыре основных узла оборудования DWDM:

- 1) оптический терминальный мультиплексор (Optical Terminal Multiplexer - OTM),
- 2) регенератор (Regenerator - REG),
- 3) оптический усилитель (Optical Line Amplifier - OLA),
- 4) оптический мультиплексор ввода-вывода (Optical Add Drop Multiplexer - OADM).

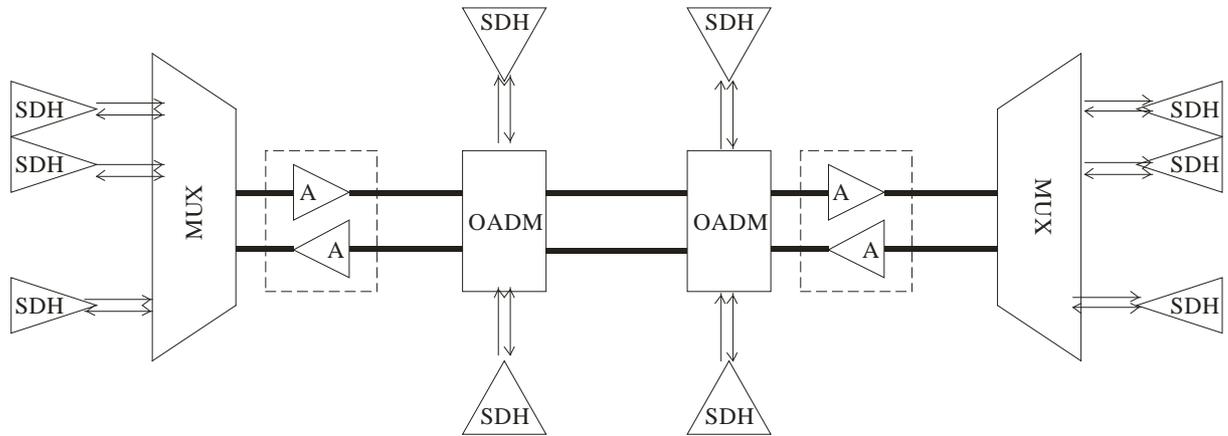


Рис. 1.2. Цепь DWDM с вводом-выводом в промежуточных узлах

Оптические мультиплексоры ввода-вывода (OADM) могут вывести из общего оптического сигнала волну определенной длины и ввести туда сигнал этой же длины волны, так что спектр транзитного сигнала не изменится, а соединение будет выполнено с одним из абонентов, подключенных к промежуточному мультиплексору. OADM может выполнять операции ввода-вывода волн оптическими средствами или с помощью промежуточного преобразования в электрическую форму. Обычно полностью оптические (пассивные) мультиплексоры ввода-вывода могут отводить небольшое число волн, так как каждая операция вывода требует последовательного прохождения оптического сигнала через оптический фильтр, который вносит дополнительное затухание. Для связи на большие расстояния требуется восстанавливать групповой сигнал через каждые 600 км. И тогда вместо OADM в некоторых точках необходимо установить регенераторы. В отличие от классических SDH-мультиплексоров мультиплексоры ADM не задействуют матрицу кросс-коммутации и не выполняют дополнительных преобразований О-Е-О. Если же мультиплексор использует электрическую регенерацию сигнала, то количество выводимых волн может быть любым в пределах имеющегося набора волн, так как транзитный оптический сигнал предварительно полностью демультиплексируется [3].

При управлении сетями DWDM применяются те же принципы и подходы, что и при управлении сетями SDH: многоуровневая архитектура TMN, встроенные агенты с интерфейсом Q3 и выделение служебной полосы для передачи управляющей информации по тем же физическим каналам, что и пользовательских данных. Для передачи управляющей информации обычно выделяется отдельная волна, не попадающая в диапазон ITU (и собственный диапазон производителя, если он отличается от стандартного), например, 1625 нм или 1480 нм. На этой волне управляющие данные передаются с относительно невысокой скоростью 2 - 100 Мбит/с, достаточной для выполнения задач мониторинга, контроля и формирования новых соединений.

Технология плотного волнового (спектрального) мультиплексирования (DWDM) предназначена для создания оптических магистралей нового поколения, работающих на мультигигабитных и терабитных скоростях. Такой качественный скачок производительности обеспечивает принципиально иной, нежели у SDH, метод мультиплексирования - информация в оптическом волокне передается одновременно большим количеством световых волн ( $\lambda$ ). Каждая волна несет собственную информацию, при этом для оборудования DWDM неважно, каким способом она кодируется, и какие протоколы используются для передачи данных - устройства DWDM занимаются только объединением различных волн в одном световом пучке, а также выделением из общего сигнала.

На рисунке 1.3 показаны возможности увеличения полосы пропускания (или информативности) ВОЛС за счет применения DWDM-технологии для стандартных синхронных сетей передачи информации и синхронных оптических сетей (SDH/SONET) с информационными емкостями каждого канала 2,5 Гбит/с, 10 Гбит/с и 40 Гбит/с [4].

Из рисунка 1.3 видно, что DWDM-технология позволяет увеличивать пропускную способность волоконно-оптического канала вплоть до нескольких Тбит/с только в одном окне прозрачности оптического волокна.

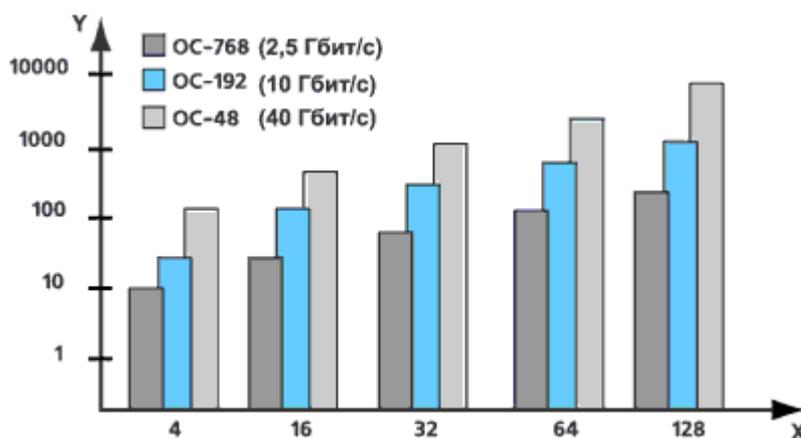


Рис. 1.3. Зависимость полной скорости передачи информации по оптическому волокну от числа мультиплексируемых спектральных каналов для трех скоростей в каждом канале

Таким образом, основные преимущества технологии DWDM состоят в следующем:

- Дальнейшее повышение коэффициента использования частотного потенциала оптического волокна (его теоретическая полоса пропускания - 25 000 ГГц) - достижение терабитных скоростей.
- Отличная масштабируемость - повышение суммарной скорости сети за счет добавления новых спектральных каналов без необходимости замены всех магистральных модулей мультиплексоров (что требуется для перехода к новому уровню STM-N в сетях SDH).
- Экономическая эффективность за счет отказа от электрической регенерации на участках сети большой протяженности.

- Независимость от протокола передачи данных - технологическая "прозрачность", позволяющая передавать через магистраль DWDM трафик сетей любого типа.
- Независимость спектральных каналов друг от друга.
- Совместимость с технологией SDH - мультиплексоры DWDM оснащаются интерфейсами STM-N, способными принимать и передавать данные мультиплексоров SDH.
- Совместимость с технологиями семейства Ethernet - Gigabit Ethernet и 10GE.
- Стандартизация на уровне ITU-T.

Хотя эта технология появилась недавно (1997-2000 годы), она уже широко используется в сетевой инфраструктуре многих стран мира.

Практическое использование оборудования DWDM постоянно расширяется в связи с быстрым развитием сетей связи всех уровней. Оборудование DWDM применяется как для создания новых волоконно-оптических сетей, так и для модернизации и расширения существующих сетей в целях существенного повышения их пропускной способности и доступности. Одно из основных достоинств технологии DWDM — быстрая окупаемость вложенных операторами в ее внедрение средств и получение прибыли. Операторам нет необходимости прокладывать новые линии, что также связано с дополнительными расходами и проблемами.

В качестве примера практического использования DWDM-технологии может служить международная магистральная телекоммуникационная сеть (RETN - Real Time Network), которая использует оборудование DWDM на наиболее загружаемых трафиком участках, значительно увеличивая пропускную способность (capacity) без увеличения количества волоконно-оптических линий.

С успехами DWDM связано еще одно перспективное технологическое направление - полностью оптические сети (All-Optical Networks). В таких

сетях все операции по мультиплексированию/демультиплексированию, вводу-выводу и кросс-коммутации (маршрутизации) пользовательской информации выполняются без преобразования сигнала из оптической формы в электрическую (такие устройства и сети имеют обозначение "О-О-О", а аббревиатура "О-Е-О" применяется для традиционных оптико-электронных устройств). Исключение преобразований в электрическую форму позволяет существенно удешевить сеть, но возможности оптических технологий пока еще недостаточны для создания полностью оптических сетей нужного масштаба, поэтому практическое применение таких сетей ограничено фрагментами сети, между которыми выполняется электрическая регенерация сигнала [4].

На практике для сетевого оператора важнее не количество оптических каналов, а общая пропускная способность волоконно-оптической линии и масштабируемость этого показателя, то есть возможность наращивания пропускной способности ВОЛС по мере роста требований рынка.

## 1.2. Анализ перспектив развития оптических систем с разделением по длине волны излучения

Анализ сетевого трафика в течение последних двух десятилетий указывает на продолжение его экспоненциального роста практически во всех регионах мира и на сетях всех уровней. Рост сетевого трафика вызывает постоянное увеличение спроса на пропускную способность DWDM систем дальней связи. По оценкам компаний RHK, McKinsey-JPMorgan, AT&T, MINTS и Arbor к 2020 году скорость передачи информации на одно соединение в опорных сетях наиболее развитых стран приблизится к 20 Тбит/с [6].

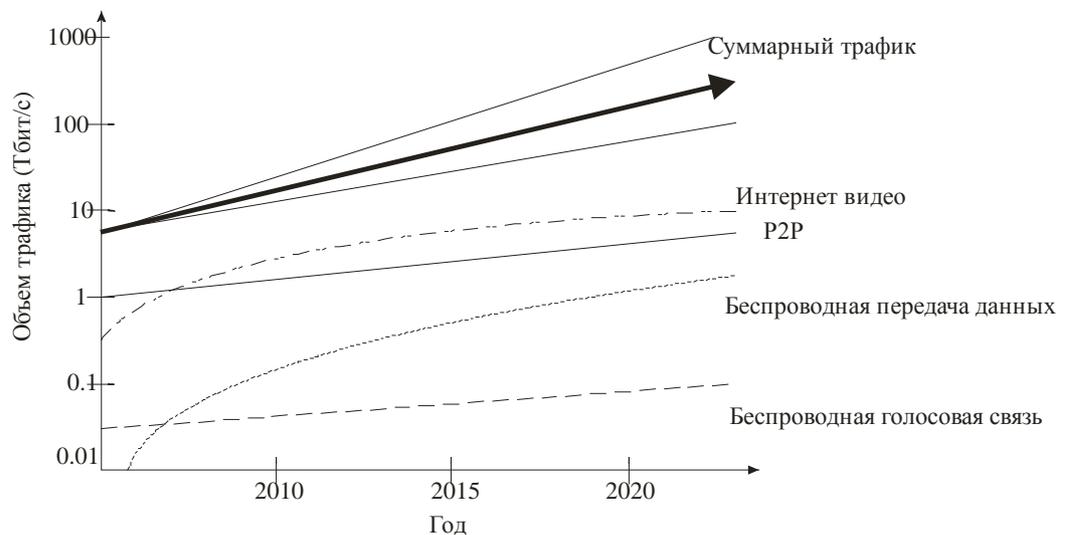


Рис.1.4. Прогноз суммарного трафика в опорных сетях дальней связи

Сегодня использование оборудования DWDM, особенно актуально в связи с быстрым развитием сетей связи всех уровней. Подчеркнем, что оно применяется не для создания новых волоконно-оптических сетей, а именно для модернизации и расширения существующих сетей, значительно повышающих их пропускную способность и доступность. Ведь одно из основных достоинств технологии DWDM — быстрая окупаемость вложенных операторами в ее внедрение средств и получение прибыли [7].

Специалисты, рисуя перспективы развития магистральных сетей, единодушны во мнении, что DWDM-технологии активно подтолкнули развитие мультисервисных сетей. Ведь DWDM — это физический уровень сети, который работает независимо от типа передаваемой информации или от ее формата. Подобная гибкость в сочетании с огромной пропускной способностью делает DWDM идеальной технологией для опорной инфраструктуры сетей следующего поколения, каковыми являются мультисервисные сети. Такие свойства DWDM позволяют использовать ее для самых различных сетей: стационарных, мобильных, постоянно усложняющихся служб и телекоммуникационных приложений с постоянно возрастающим числом пользователей и скоростями передачи информации.

Для мультисервисных сетей, сетей нового поколения, необходима очень надежная технология, обладающая высокой гибкостью и производительностью, чему в полной мере отвечает DWDM. Однако, чтобы DWDM могла обеспечить потребности будущих сетей связи, все стороны, заинтересованные в их развитии, должны рассматривать проблему в более широком аспекте, включая взаимодействие с системами мобильной связи третьего поколения, а также с сетями следующего поколения (NGN) [7].

При анализе возможностей технологии DWDM должно учитываться, что по существу она является продолжением и развитием уже известных методов преобразования сигнала при его передаче по ВОЛС, в частности, с использованием оборудования синхронной цифровой иерархии SDH/SONET. SDH/SONET-технология разрабатывалась для обеспечения широкого набора услуг связи и, прежде всего, широкополосной ISDN. Эта технология обеспечивает передачу цифрового трафика на фиксированных скоростях от 2 Мбит/с до 40 Гбит/с. Технология DWDM на сегодняшний день позволяет передавать широкополосный сигнал со скоростью от 2,5 до 160 Гбит/с. В дальнейшем верхний предел скорости передачи может быть существенно увеличен. Согласно мировым тенденциям, развитие телекоммуникаций

будущего связано с пакетными и IP–сетями. Поэтому в перспективе сети, базирующиеся полностью на SDH–технологии, постепенно потеряют свое значение. Совместное применение оборудования SDH и DWDM и широко распространенного на существующих сетях оборудования стандарта PDH обеспечит гибкий и безболезненный переход к полностью IP–совместимым сетям. Такой сценарий развития удовлетворяет требованиям, как к функциональности, так и к пропускной способности сетей.

Перспективы развития систем спектрального уплотнения связаны с тремя факторами: технологическим, сетевым и экономическим.

Первый фактор определяется усовершенствованиями элементов систем WDM, что позволит:

- перейти на более плотную сетку частотного плана (25 и далее 12,5 ГГц), подготовив миграцию систем DWDM в сторону систем HDWDM;
- увеличить максимальное число каналов в широко используемых диапазонах C, L и S [12];
- использовать для этих диапазонов как оптические усилители EDFA, так и рамановские усилители;
- использовать оборудование SDH с увеличенной скоростью передачи на одной несущей: 40–160 Гбит/с;
- использовать солитонную технологию с возможностью увеличения дальности передачи и уменьшения чувствительности систем с увеличенной скоростью к PMD.

Второй фактор определяется развитостью структуры сетей DWDM. В настоящее время нет единой сети DWDM не только в СНГ, но и в США, и в Европе (если не считать фрагментов таких сетей, например сети SDH-WDM компании Hermes Europe Railtel). Это значит, что нельзя в полной мере воспользоваться одним из самых главных преимуществ систем DWDM – возможностью маршрутизации потокового трафика по длине волны [13], не

говоря уже о другой, еще не реализованной, возможности маршрутизации оптического пакетного трафика. То же можно сказать и о невозможности пока использовать технологию мультипротокольной коммутации по длине волны – MPLS.

Третий фактор определяется высокой стоимостью систем DWDM даже для топологии точка-точка. Так, по оценкам одной из компаний-производителей оборудования DWDM, секция системы (на основе STM-16) на 16 длин волн протяженностью 450 км с тремя промежуточными мультиплексорами, не обладающими возможностью оптического ввода-вывода, стоит примерно 2–2,5 млн. долларов. Эта стоимость может оцениваться как в абсолютной мере (цена за устройство или систему), так и в относительной (цена за бит переданной информации в расчете на километр). Если стоимость в относительной мере снижается довольно успешно как за счет увеличения числа бит (увеличение скорости передачи на одну несущую), так и за счет увеличения длины пролета/секции, то снижение стоимости в абсолютной мере происходит пока за счет ухода от систем DWDM к системам CWDM, учитывая возможность использования дешевых систем мультиплексирования/демультиплексирования на основе дешевых пассивных фильтров и комбайнеров/разветвителей.

Проблемы реализации систем DWDM связаны, главным образом, с преодолением воздействия трех факторов: влияния ЧВС, воздействия помех от соседних каналов и ограничения суммарной мощности светового сигнала, вводимого в волокно.

Влияние первого фактора достаточно успешно снижается за счет использования волокна NZDSF, за счет неравномерного распределения частот несущих [11], а также за счет использования схем интерливинга.

Влияние второго фактора может быть снижено, во-первых, увеличением шага несущих, во-вторых, использованием внешнего модулятора (уменьшающего уширение несущей), технологии солитонов или

техники модуляции с подавлением одной боковой полосы – ОБП, в-третьих, с помощью процедуры интерливинга (перемежения каналов), при котором плотный набор из  $n$  несущих длин волн (с шагом  $s$ ) разделяется на приемном конце на два или четыре (каскадно  $2 \times 2$ ) набора по  $n/2$  (с шагом  $2s$ ) или  $n/4$  (с шагом  $4s$ ) несущих.

Влияние третьего фактора сводится к тому, что максимальная мощность каждого оптического канала  $P_{ch. \max}$  (в дБм) зависит от полной оптической мощности, подаваемой с выхода транспондера на вход волокна  $P_{total}$  (оптическая мощность, дБм, на выходе агрегатного канала WDM) и числа мультиплексированных длин волн  $n$ . Согласно стандарту [11],  $P_{ch. \max} = P_{total} - 10 \lg n$ .

Учитывая, что  $P_{total}$  ограничена либо классом безопасного уровня излучения лазера, либо допустимым уровнем суммарных нелинейных искажений в сердцевине волокна и составляет для разных производителей оборудования WDM величину от 17 до 30 дБм, можно (по таблице 1.1) приблизительно оценить, как меняется эта мощность в расчете на 1 канал для разного числа каналов, используемых в системе WDM.

Таблица 1.1

Уровень максимальной мощности в каждом канале WDM при ее равномерном распределении

Число каналов, $n$	2	4	8	16	32	64	128	256
$P_{total}=17\text{дБм}$	14	11	8	5	2	-1	-4	-7
$P_{total}=30\text{дБм}$	27	24	21	18	15	12	9	6

Из таблицы 1.1 видно, что при большом числе каналов падение мощности может составить (против исходного уровня 2 канала) 21 дБ, в результате не исключается возникновение проблемы обеспечения нужного уровня BER в оптическом канале. Единственный способ борьбы с этим –

увеличение эффективной площади сечения волокна, т.е. использование специально разработанных волокон, например, LEAF, Sincor, брэгговских волокон или волокон на основе фотонных кристаллов [8].

Развитие систем WDM (Wavelength Division Multiplexing), цель которых - увеличение ширины полосы канала связи для пользователя, шло сначала по интенсивному пути за счет сокращения шага оптических несущих [7]. Причина была в том, что рабочая полоса систем WDM ограничивалась полосой активного усиления оптических усилителей (ОУ) EDFA, составляющей 30 нм (1530-1560 нм). Системы развивались в направлении WDM -> DWDM (Dense WDM) -> HDWDM (High-Dense WDM), что вело не только к увеличению числа несущих (то есть к уменьшению их шага), но и к существенному удорожанию плотных (шаг 0,8-0,4 нм) и сверхплотных (шаг 0,2-0,1 нм) систем WDM. Последний фактор стал тормозить процесс их внедрения.

В результате появился новый класс решений WDM - разреженные системы WDM, или CWDM (Coarse WDM), в которых используется очень большой стандартный [8] шаг между несущими (20 нм) и дешевые средства их выделения - многослойные тонкопленочные оптические фильтры. Системы CWDM быстро завоевали признание специалистов и стали широко применяться в городских сетях (MAN), получив название систем WDM класса Metro.

В соответствии с рекомендацией ИТУ-Т G.694.2 [9] следует использовать не более 18 несущих с фиксированным шагом 20 нм: 1270, 1290, 1310 ... 1570, 1590, 1610, если требуемый диапазон длин волн не превышает 340 нм. Естественно, что затухание на краях такого диапазона достаточно велико, особенно на его левом крае в области коротких волн. Поэтому при передаче сигнала по стандартному одномодовому волокну (SSF) число несущих следует ограничить 8 длинами волн, лежащими в диапазоне 1470-1610 нм шириной в 140 нм.

Если требуется использовать больше несущих, то, оставаясь в рамках стандарта CWDM, мы имеем, согласно [9], еще 200 нм полосы, или 10 дополнительных каналов с шагом 20 нм. Альтернативным вариантом является возврат к системам DWDM, однако это дорого и ведет к потере уже вложенных в систему CWDM средств. Другая перспективная альтернатива - использование гибридной модели частотно-волнового плана, позволяющей объединить частотные планы DWDM и волновые CWDM, а значит, и преимущества обеих систем: масштабируемость первой и дешевизну второй [10].

### **1.3. Показатели качества передачи информации в системах с разделением по длине волны излучения**

В последнее время при проектировании коммуникационных сетей и управлении потоками данных всё большее внимание, независимо от их масштаба, уделяется вопросам качества обслуживания.

На сегодняшний день активно ведется внедрение технологии плотного волнового мультиплексирования (DWDM), которая позволяет многократно увеличить пропускную способность существующих телекоммуникационных систем и объединить различные виды телекоммуникационных технологий в единую информационную инфраструктуру. При внедрении новой технологии актуальным становится обеспечение соответствия уровня показателей качества передачи информации в телекоммуникационной системе установленным нормам, стандартам. Для выполнения указанной задачи актуальным является использование накопленного опыта эксплуатации и применения современных методов прогнозирования показателей качества систем DWDM. Кроме того, для эффективной работы в дальнейшем необходимо исследование влияния меняющихся эксплуатационных характеристик на качество передачи информации в оптических каналах [22].

Основными показателями качества являются: секунда передачи информации с ошибками; секунда, пораженная ошибками; блок цифрового потока с ошибками; блок, пораженный ошибками, защищенность и другие. Эти показатели качества индивидуальны для каждого вида трафика, передаваемого в оптических каналах телекоммуникационной системы DWDM. Ключевым параметром качества ЦСП являются ошибки. Показателей ошибок множество, самый простой из них — коэффициент битовых ошибок (Bit Error Ratio, BER). Под BER следует понимать отношение количества ошибочных битов к их общему переданному числу.

Единым базовым показателем качества передачи сигнала в каналах системы DWDM так же является коэффициент битовых ошибок (BER).

Работа цифровых телекоммуникационных систем считается нормальной только в том случае, если коэффициент битовых ошибок не превышает определенный допустимый уровень [23].

Необходимо отметить, что при прочих равных условиях BER зависит от количества переданных битов. Для обеспечения корректности сравнения разных ЦСП используются типовые испытательные последовательности, причем каждой стандартной скорости передачи соответствует своя испытательная последовательность. По своим свойствам они близки к гауссову шуму, но имеют определенный период повторения. Поэтому они называются не просто случайными, а псевдослучайными последовательностями (ПСП) (Pseudo-Random Bit Sequence, PRBS).

Следует особо подчеркнуть, что оценка BER будет абсолютно точной только при бесконечно большом числе переданных битов. Строго говоря, когда их число ограничено, мы получаем не вероятность события BER, а его оценку BERT. Очевидно, что уровень достоверности этой оценки (Confidential Level, CL), называемый также доверительной вероятностью, зависит от количества зарегистрированных ошибок и от общего числа переданных битов N.

Таблица 1.2

Требуемые значения нормированной длительности

E	CL=90%	CL=95%	CL=99%
	NxBER		
0	2.3	3	4.61
1	3.89	4.74	6.64
2	5.32	6.3	8.4

Это подтверждают данные таблицы 1.2 где приведены требуемые значения нормированной длительности NxBER в зависимости от числа зарегистрированных ошибок E и уровня достоверности оценки CL — чем

больше число зарегистрированных ошибок и уровень достоверности оценки CL, тем большее число битов необходимо передать.

Типовая схема измерения BER предполагает наличие генератора испытательных битовых (символьных) последовательностей тестера BER, испытуемого объекта (регенератора, участка ЦСП и т. д.) и детектора ошибок тестера BER [20].

Генератор тестера BER формирует испытательные сигналы, которые подаются на вход тестируемого объекта. Генератор тестируемого сигнала является также источником сигнала для детектора ошибок тестера BER.

Тестируемый объект может быть территориально совмещен с тестером BER или находиться в удаленном пункте. В любом случае испытуемый объект должен быть выведен из эксплуатации и сигнал с его выхода подан на вход приемника тестера BER. То есть, должен быть организован измерительный шлейф.

Детектор ошибок получает испытательный сигнал с выхода тестируемого объекта или формирует точную копию этого сигнала автономно. Испытательный сигнал генератора сравнивается побитно с сигналом, поступающим с выхода испытуемого объекта. Каждое различие сигналов детектор фиксирует как битовую ошибку.

Необходимую синфазность двух указанных сигналов обеспечивает детектор ошибок, в котором предусмотрена требуемая задержка сигнала с выхода генератора. Задача фазирования сигналов обычно выполняется на этапе калибровки тестера BER.

Испытательные сигналы тестеров BER стандартизованы. Как уже отмечалось выше, информационный сигнал в тестерах BER имитируется в виде так называемых псевдослучайных последовательностей ПСП (PRBS), они формируются в соответствии со стандартными алгоритмами и различаются числом генерируемых символов  $M = 2k-1$ , где  $k$  — целое число.

В генераторах тестеров BER предусмотрена возможность создания произвольных испытательных последовательностей, называемых обычно кодовыми словами.

Коэффициент битовых ошибок – важнейшая характеристика линейного тракта. Он измеряется как для отдельных участков регенерации, так и для тракта в целом. Определяется коэффициент ошибок  $k_{\text{ОШ}}$ , по формуле:

$$k_{\text{ОШ}} = \frac{N_{\text{ОШ}}}{N} \quad (1.1)$$

где  $N$  – общее число символов, переданных за интервал измерения;

-  $N_{\text{ОШ}}$  – число ошибочно принятых символов за интервал измерения.

Согласно ITU-T M.2100, качество цифрового тракта по критерию ошибок делят на три категории:

- нормальное –  $\text{BER} < 10^{-6}$ ;
- пониженное –  $10^{-6} \leq \text{BER} < 10^{-3}$  (предаварийное состояние);
- неприемлемое –  $\text{BER} \geq 10^{-3}$  (аварийное состояние) [25].

Так как появление ошибок является следствием совокупности всех текущих условий передачи цифровых сигналов, имеющих случайный характер, то при отсутствии данных о законе распределения ошибок его отдельные элементы могут быть определены с определенной степенью достоверности только по результатам продолжительных измерений. В то же время на практике необходимо, чтобы значения параметров ошибок для ввода в эксплуатацию и технического обслуживания систем передачи основывались на достаточно коротких интервалах времени измерения. Исходя из этого, были определены следующие параметры ошибок [24]:

- секунда с ошибками (error second, ES) – односекундный интервал, содержащий, хотя бы один ошибочный бит;
- секунда, пораженная ошибками (severely error second, SES) – односекундный интервал с  $\text{BER} \geq 10^{-3}$ .

Данные параметры ошибок должны оцениваться в течение времени готовности (available time), отсчет которого начинается с первой секунды из десяти следующих друг за другом секунд, в каждой из которых  $BER < 10^{-3}$ . ITU-T M.2100 регламентирует нормы качества (performance objectives, PO) на выраженные максимальным процентом времени параметры ошибок, которые зависят только от скорости передачи и приводятся для условного эталонного соединения (hypothetical reference connection, HRC/HRX/) длиной 27500 км.

Рассмотрим измерение коэффициента ошибок путем посимвольного сравнения и подсчета ошибочно принятых элементарных импульсов. Для этого вначале (перед измерением) на передающей станции с помощью оптического аттенюатора устанавливают заданный в технических условиях на аппаратуру линейного тракта уровень оптического излучения. Затем на передающем конце подключают генератор испытательных сигналов, а на приемном – измеритель коэффициента ошибок и, изменяя значения уровней средней мощности, измеряют коэффициент ошибок. Время измерения определяют в зависимости от скорости передачи, объема информации и значений коэффициента ошибок  $K_{\text{Ош}_i}(BER_i)$ .

Коэффициент ошибок при заданном уровне оптического излучения вычисляют по формуле [14]:

$$, \quad (1.2)$$

где

$$, \quad (1.3)$$

где и  $\bar{K}$  - погрешность и среднее значение коэффициента ошибок при пяти и более измерениях с интервалом 3 мин, соответственно,  $\alpha$  - коэффициент, учитывающий наличие погрешности измерения при проведении  $n$  измерений.

В общем случае к снижению качества передачи сигнала по оптическим каналам приводит множество факторов. И в связи с этим особо востребованным становится контроль параметров системы DWDM и оптического волокна, влияющих на качество передачи сигналов.

Удобным (и простым) графическим методом оценки качества цифрового сигнала на выходе регенератора является глаз-диаграмма. Она представляет собой результат наложения всех возможных импульсных последовательностей в течение промежутка времени, равного двум тактовым интервалам линейного сигнала [21].

Наиболее простой пример — диаграмма для троичного (возможные уровни -1, 0, +1) линейного сигнала при косинус-квадратной форме входного сигнала регенератора. Хорошо видна область («раскрыв») глаз-диаграммы, в пределах которой должна производиться операция опознавания сигнала для каждого из двух уровней решения. Горизонтальные линии, обозначенные как -1, 0 и +1, соответствуют амплитудам импульсов при отсутствии помех, а вертикальные линии через каждый тактовый интервал  $T$  — идеальным моментам решения.

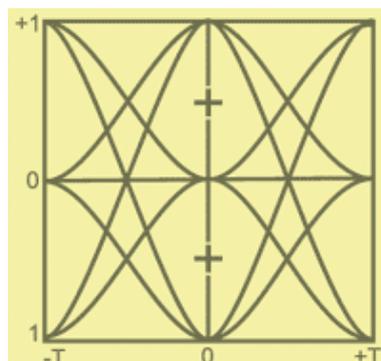


Рис 1.5. Глаз-диаграмма идеального троичного сигнала

Процесс принятия решения показан в виде двух крестиков в каждом «раскрыве» глаз-диаграммы. Вертикальная черта каждого крестика определяет момент решения, а горизонтальная — его уровень. Гарантией безошибочной регенерации цифрового сигнала является наличие вблизи каждого крестика определенной области, в пределах которой и должно происходить опознание сигнала.

Наличие помех приводит к сокращению этой области по сравнению с идеальным случаем. Минимальное расстояние между центром крестиков и краями «глаза» служит мерой запаса помехозащищенности. Запас уменьшается как из-за искажений формы импульса, так и вследствие несовершенства самого процесса принятия решения. Первая причина приводит к уменьшению «раскрыва» глаз-диаграммы, а вторая — к перемещению точки принятия решения вдоль границ глаза.

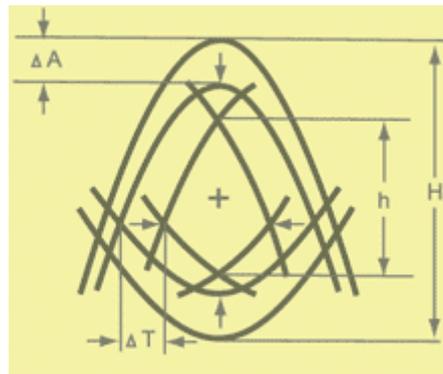


Рис 1.6. Глаз-диаграмма троичного сигнала при наличии помех

В результате воздействий появляется вертикальная составляющая искажений глаз-диаграммы  $\Delta A$ . Именно на эту величину должны быть сдвинуты края идеальной глаз-диаграммы.

Временные искажения глаз-диаграммы  $\Delta T$ , включающие несоответствие моментов решения их статическим значениям и джиттер, учитываются обычно в смещении границ «глаза» по горизонтали.

Очевидно, что для компенсации ухудшения реальной глаз-диаграммы по сравнению с идеальной необходимо увеличить величину отношения сигнал/шум на величину  $\Delta S/N = 20 \lg(H/h)$ , дБ, где  $H$  и  $h$  представляют собой вертикальный «раскрыв» идеальной и реальной глаз-диаграмм, соответственно.

Характеристики, изменение которых в наибольшей степени может повлиять на качество передачи сигналов и которые следует в первую очередь учитывать в методике прогнозирования: количество оптических каналов в системе, скорость передачи по оптическому каналу, мощность сигнала на входе канала, дисперсионные характеристики и потери на соединениях [22].

Характеристики оптической среды передачи сигналов оказывают существенное влияние на качество передачи информации по оптическим каналам телекоммуникационных систем DWDM. Особое внимание необходимо уделить проявлению нелинейных эффектов в оптическом волокне. Воздействие нелинейных эффектов на оптический сигнал приводит к появлению ошибок в оптических каналах системы DWDM [13].

Появление ошибок является следствием совокупности всех условий передачи сигналов, имеющих случайный характер. Поэтому, при отсутствии данных о законе распределения ошибок, его отдельные элементы могут быть определены только по результатам продолжительных измерений. На практике же необходимо, чтобы значения параметров ошибок основывались на достаточно коротких интервалах времени измерения. К тому же параметр BER пригоден для оценки качества передачи, если в тракте преобладают случайные одиночные ошибки. Для случаев, когда поток битовых ошибок может образовывать пакеты, рекомендация ITU-T G.821 устанавливает параметры ошибок на временном интервале [26].

### **Выводы по главе I:**

1. DWDM-технология рассматривается уже не только как средство повышения пропускной способности оптического волокна, а как наиболее надежная технология для опорной инфраструктуры мультисервисных и мобильных сетей, обеспечивающая резкое повышение пропускной способности сети и реализующая широкий набор принципиально новых услуг связи. Возможность DWDM интегрироваться с перспективными технологиями и протоколами передачи цифровой информации делает ее незаменимой в процессе конвергенции между различными видами и службами связи.

2. Развитие технологии DWDM подталкивается целым рядом факторов. DWDM имеет множество потенциальных применений. Главным образом, она найдет спрос у компаний связи, поскольку благодаря ей они могут увеличить объем передаваемых данных без прокладки дополнительного кабеля. В большинстве случаев DWDM вписывается в имеющуюся инфраструктуру волоконно-оптических линий с минимальными изменениями.

3. При внедрении технологии DWDM вопросы обеспечения соответствия уровня показателей качества передачи информации установленным нормам и стандартам становятся все более актуальным.

Основными показателями качества передачи информации являются коэффициент битовых ошибок, секунда передачи информации с ошибками, секунда, пораженная ошибками.

На качество передачи в системах с разделением по длине волны излучения оказывают влияние воздействия нелинейных эффектов на оптический сигнал.

## **ГЛАВА II. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ПЕРЕДАЧИ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ПО ДЛИНЕ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ**

### **2.1. Анализ процессов взаимных влияний между оптическими каналами**

Как уже было сказано в главе I, характеристики оптической среды передачи сигналов оказывают влияние на качество передачи информации по оптическим каналам телекоммуникационных систем DWDM. Особое внимание необходимо уделить проявлению нелинейных эффектов в оптическом волокне.

Такие явления обусловлены нелинейным откликом вещества на увеличение интенсивности светового потока. В результате оптические характеристики среды (электронная поляризуемость, показатель преломления, коэффициент поглощения) становятся функциями напряженности электрического поля световой волны, так что поляризация среды начинает нелинейно зависеть от напряженности поля, а волны с различными частотами и направлениями распространения - оказывать влияние друг на друга [29].

Нелинейные явления в оптическом волокне усиливаются с ростом интенсивности поля, т.е. мощности потока, приходящейся на единицу площади поперечного сечения сердцевинки волокна. Чтобы увеличить дальность и скорость передачи, стремятся уменьшить накопленную дисперсию кабеля, поэтому применяют одномодовое волокно, имеющее малый диаметр сердцевинки (10 мкм и менее). Однако использование одномодового носителя, а также низкие оптические потери могут приводить к возникновению высокой плотности потока излучения на достаточно протяженных участках.

При анализе технологии DWDM следует учитывать следующие явления: нелинейное преломление, вынужденное рассеяние света и четырехволновое смешение [27].

Нелинейное преломление вызвано зависимостью показателя преломления сердцевинны волокна, а значит, и фазы выходного сигнала от интенсивности оптического сигнала. Когда мощность сигнала достаточно велика, ее колебания приводят к фазовой самомодуляции (ФСМ) и фазовой кросс-модуляции (ФКМ). В первом случае сигнал воздействует сам на себя, во втором - на сигнал в другом канале. Каждый из этих эффектов может создавать помехи, когда передача ведется с помощью фазовой манипуляции. Максимально допустимое значение канальной мощности, обусловленное ФСМ и ФКМ, обратно пропорционально числу мультиплексируемых каналов.

Самомодуляция, или автомодуляция, фазы оптической несущей (ФСМ/SPM) - один из первых нелинейных эффектов, который начинает проявляться при мощности оптического сигнала примерно 8.10 мВт. Это явление возникает вследствие изменения показателя преломления сердечника. В свою очередь изменение показателя преломления обусловлено большой плотностью мощности, при которой в структуре сердечника существует сильное электромагнитное поле, воздействующее на движение электронов. Поскольку при движении оптического импульса вдоль волокна непрерывно изменяется, то изменяется также постоянная распространения оптической несущей, что приводит к непрерывному изменению фазы. Как известно, изменение фазы эквивалентно изменению частоты. Очевидно, что при этом происходит расширение спектра сигнала и сужение оптического импульса [30].

Самомодуляция фазы заметно проявляется при длительности оптических импульсов 100 пс. При длительности 10.20 пс сужение может

достигать двух-трех и более раз. В результате чего импульсы могут даже раздваиваться.

Если в волокне распространяются две оптические волны и каждая из них имеет мощность порядка 10 мВт и более, то нелинейность среды вызывает взаимодействие этих волн. Оно возникает вследствие изменения показателя преломления, которое также приводит к самомодуляции фазы каждой волны. При этом мощность одной из волн вызывает фазовую модуляцию не только собственного сигнала, но и соседнего. Это влияние носит взаимный характер и называется перекрестной фазовой модуляцией или фазовой кросс-модуляцией — ФКМ (СРМ) [27].

Вернемся к явлению самомодуляции фазы одной световой волны. Возникновение осцилляции на фронтах импульса вызвано так называемой волновой неустойчивостью. Выше было отмечено, что при ФСМ происходит расширение спектра оптического импульса. При этом более длинноволновые составляющие спектра движутся с большей скоростью по сравнению с коротковолновыми. В результате обе составляющие спектра интерферируют, чем и вызываются осцилляции. Поскольку среда в данном случае нелинейная, смещение частот приводит к возникновению новых частот: и таким образом, кроме двух составляющих в спектре появляются еще две.

При дальнейшем распространении происходит их взаимодействие, приводящее к усложнению процесса и обогащению спектра новыми составляющими.

Вынужденное рассеяние света представляет собой рассеяние на элементарных возбуждениях среды, индуцированных рассеиваемой волной. Поскольку процесс рассеяния стимулируется самим рассеиваемым светом, рассеянное излучение характеризуется высокой степенью когерентности, узкими диаграммами направленности отдельных компонентов и интенсивностью, сопоставимой с интенсивностью падающего света. Таким образом, при возбуждении среды мощным световым источником происходит

модуляция ее параметров, что приводит к амплитудной модуляции рассеянного света, а, следовательно, к появлению в нем новых спектральных компонентов.

Самые важные виды рассматриваемого явления - вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР/SRS – Stimulated Raman Scattering), иногда называемое рамановским, и вынужденное рассеяние Манделъштама-Бриллюэна (ВРМБ/SBS – Stimulated Brillouin Scattering). Комбинационное рассеяние связано с возбуждением новых колебательных и, в меньшей степени, вращательных энергетических уровней частиц среды, а ВРМБ - с появлением в среде гиперзвуковых волн [27].

Влияние ВКР невелико (менее 1 дБ на канал), если произведение суммарной мощности каналов на разность между частотами крайних каналов меньше 500 Вт·Гц. Другими словами, данный эффект существен лишь для систем с сотнями каналов.

Физическая причина явления вынужденного рассеивания Рамана состоит в том, что под действием света большой интенсивности (когда проходящая в нём оптическая мощность достигает некоторого порога) могут быть случаи, когда молекулы поглощают часть энергии проходящего излучения (часть энергии каждого фотона). В результате, если фотон имел частоту  $f_1$ , то после столкновения с молекулой и передачи ей части энергии энергия фотона уменьшается. Так как энергия фотона равна  $E=hf_1$ , где  $h$  – постоянная Планка, то уменьшается множитель  $f_1$ , то есть частота излучения. Таким образом, после прохождения через такую среду излучение будет иметь две частоты  $f_1$  и  $f_1-\Delta f$ . Вторая составляющая с более низкой частотой (стоксова компонента) будет заметной тогда, когда энергия исходного излучения достигает упомянутого выше порога, то есть когда будет достаточно большое количество фотонов. По определению Рамановское рассеяние - нелинейный эффект – спонтанное комбинационное рассеяние, которое связано с рассеянием света на колебаниях поляризованных молекул

волокна (оптические фононы) под действием света большой интенсивности [31].

Одним из важных отличительных свойств SRS является большой частотный диапазон взаимодействия проходящего излучения с молекулами и атомами вещества. Для кварца он достигает десятков терагерц.

Поэтому можно сделать вывод, что SRS является частотно зависимым и проявляется более выражено на коротких волнах в сравнении с длинноволновыми (на более высоких частотах). Так, на рисунке 2.1 представлен типовой спектр 6-ти канальной DWDM системы (1550 нм) на входе ВОЛС, а рисунок 2.2 иллюстрирует эффект SRS. Можно видеть, что коротковолновые каналы имеют много меньшую амплитуду в сравнении с длинноволновыми каналами, то есть наблюдается изменение амплитуд сигналов по каждому из каналов. При этом большему затуханию подвержены именно коротковолновые (высокочастотные) каналы [32].

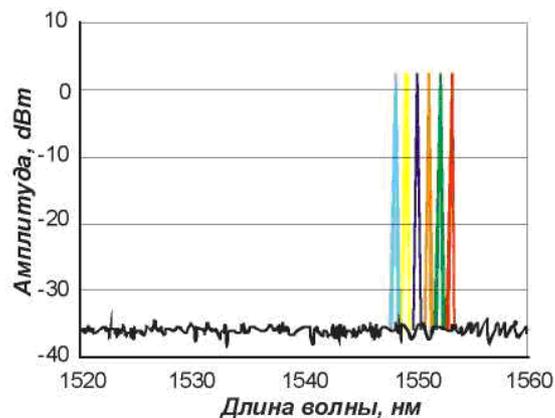


Рис. 2.1. Спектр 6-ти канальной DWDM системы

В отличие от ВКР, излучение, рассеянное по механизму Мандельштама-Бриллюэна, распространяется только в направлении, противоположном направлению падающего. Его интенсивность значительно выше, чем при ВКР; ВРМБ порождает перекрестные помехи, если разность несущих частот составляет 11 ГГц, а передача ведется в противоположных

направлениях. Другое отличие от ВКР состоит в том, что максимально допустимая мощность канала не зависит от числа мультиплексируемых каналов и расстояния между ними. Ее типичное значение для высокоскоростных линий дальней связи равно 10 мВт. ВРМБ является единственным из описываемых нелинейных явлений, влияние которого зависит от скорости передачи. С ростом последней оно уменьшается, причем особенно быстро - при использовании фазовой манипуляции. Им можно пренебречь для импульсов короче 10 нс [30].

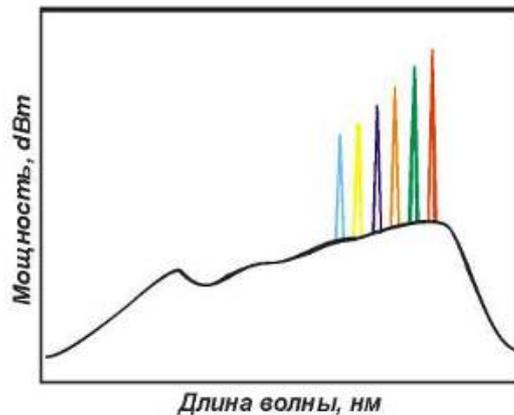


Рис. 2.2. Изменение амплитуд сигналов по каналам из-за SRS

Вынужденное рассеивание Бриллюэна устанавливает верхний предел на уровень оптической мощности, который может быть передан по оптическому волокну. Рассеяние Манделъштама – Бриллюэна возникает за счёт колебаний молекулярных составляющих в основном на микронеоднородностях.

При превышении определенного уровня оптической мощности, именуемого порогом SBS, в ОВ возникает акустическая волна, под воздействием которой меняется величина индекса рефракции  $n$ . Изменения  $n$  вызывают рассеяние света, приводя к дополнительной генерации акустических волн. Таким образом, в случае с SBS в процесс вовлекаются акустические фононы – молекулярные вибрации. Происходит нелинейное

взаимодействие интенсивной волны света, распространяющейся в прямом направлении, с первоначально слабой волной рассеянного назад света, а также с молекулярными колебаниями волокна или, ещё можно сказать, с тепловой упругой волной в кварцевой среде. В результате такого взаимодействия в волокне возникают продольные волны показателя преломления, движущиеся со скоростью звука (акустические фононы) в сердцевине волокна. Часть энергии распространяющегося в прямом направлении сигнала, скажем с частотой  $f_1$ , рассеивается на волнах показателя преломления назад со сдвигом частоты  $f_2$ . Эта вторая волна называется волной Стокса- Stokes.

В процессе нелинейного рассеивания энергия передаётся от одной световой волны  $f_1$  к другой смещённой волне с более низкой частотой  $f_2$  (или низкой энергией), а потерянная энергия поглощается молекулярными колебаниями или фононами среды. При этом частотный сдвиг оптической несущей равен примерно 10...15 ГГц.

Следует отметить, что взаимодействие при  $\lambda=1,55$  мкм имеет место в очень узкой полосе частот  $\Delta f_B=20$  МГц. Но если в световодах имеются неоднородности в виде изгибов, сжатия или растяжения, то спектр SBS может достигнуть 100...500 МГц [33].

Явление нелинейного рассеяния возрастает с увеличением входной мощности и длины линии связи. Влияние нелинейных явлений растёт также с увеличением интенсивности света в волокне, которая при заданной мощности обратно пропорциональна площади сердцевины.

Таким образом, при превышении некоторого порога мощности нелинейные процессы приводят к переходу мощности первичных волн в излучение других волн. Рассеяние Бриллюэна в основном направлено в сторону, противоположную распространению электромагнитной энергии (рис. 2.3).

Типовое значение порога SBS для линии протяженностью в 10 км составляет 6...10 дБм. Выше этого уровня наблюдается значительное увеличение потерь ОВ, зависящих от уровня вводимой оптической мощности.

В результате Бриллюэновского рассеяния помимо эффекта снижения полезной мощности возникают и шумы (повышается относительная интенсивность шума – RIN), ухудшающие характеристики BER (вероятность возникновения ошибки). Всякое использование оптических усилителей понижает порог SBS.

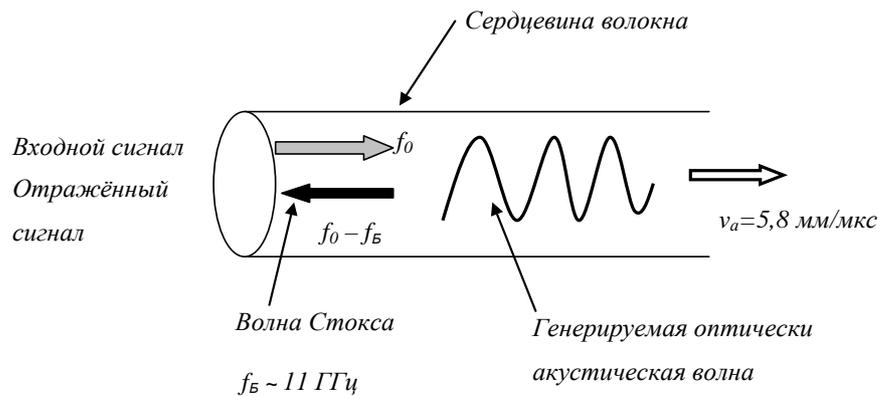


Рис. 2.3. Рассеяние Бриллюэна

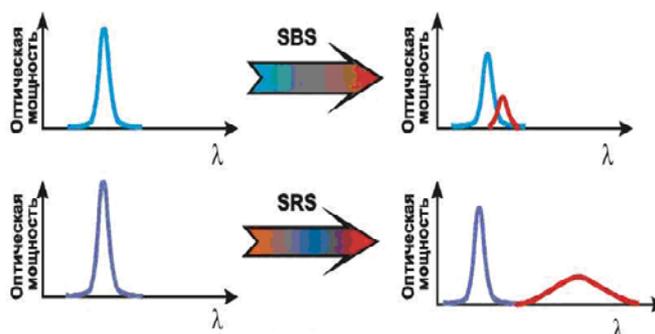


Рис. 2.4. Смещение спектра при SBS и SRS

Явления SBS и SRS проявляются в том, что оптический сигнал рассеивается и смещается в область более длинных волн (рис. 2.4). Если при SBS спектр стимулированного излучения узкий (30... 60 МГц) и смещен в

длинноволновую сторону на 10...11 ТГц, то при SRS спектр стимулированного излучения широкий (~7 ТГц или 55 нм) и смещен в длинноволновую сторону на величину порядка 10...13 ТГц.

При схожести SBS и SRS, можно выделить несколько существенных отличий:

- SBS наблюдается только для встречной волны (рассеяние происходит только назад, по направлению к источнику сигнала). SRS же наблюдается как для встречных волн, так и для сонаправленных волн. Стоксовая и антистоксовая волны располагаются частотно симметрично относительно основной передаваемой частоты излучения.
- При SRS спектр стимулированного излучения смещен относительно сильнее (разница примерно на три порядка), а ширина его намного больше (примерно на три порядка), чем при SBS.
- Пороговая мощность SRS намного больше (примерно на три порядка), чем SBS.

Исследования показывают, что с одной стороны системные проектировщики стандартных ВОСП должны предпринимать меры по минимизации нежелательных эффектов нелинейности, с другой стороны отдельные нелинейные эффекты можно использовать для усиления оптических волн, для создания новой сущности - оптического солитона, обеспечивающего увеличение дальности неискаженного распространения светового импульса и высокоскоростную оптическую коммутацию [34].

Четырехволновое смешение заключается в том, что при наличии двух попутных волн с частотами  $f_1$  и  $f_2$  ( $f_1 < f_2$ ) возникают еще две волны, с частотами  $2f_1 - f_2$  и  $2f_2 - f_1$ , распространяющиеся в том же направлении и усиливающиеся за счет исходных. Аналогичные процессы происходят и в том случае, когда имеются три (или больше) падающие волны. При этом

должно быть обеспечено согласование значений частот и волновых векторов всех волн.

Данный вид нелинейности теснее других связан с параметрами системы: на него влияют не только длина волокна и площадь поперечного сечения его сердцевины, но и расстояние между соседними каналами и дисперсия. Из всех рассмотренных явлений четырехволновое смешение имеет наибольшее значение для современных DWDM-систем [27].

Четырехволновое смешение можно устранить, выбрав неодинаковые разности частот между соседними каналами. Кроме того, данный эффект подавляется дисперсией, так как она нарушает согласование фаз. По этой причине волокно со смещенной дисперсией (Dispersion-Shifted Fiber, DSF), созданное в целях устранения хроматической дисперсии в диапазоне 1550 нм, малоприспособлено для WDM с шагом 50 ГГц (0,4 нм) и меньше; вместо него используют специальные виды волокна (TrueWave, AllWave и др.).

В обычном одномодовом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления четырехволновое смешение между каналами  $f_1$  и  $f_2$  отсутствует, если  $f_2 - f_1 > 20$  ГГц. Максимально допустимая мощность канала в данном случае практически не зависит от числа мультиплексируемых каналов. Для обычного волокна при WDM с расстоянием между каналами 10 ГГц она равна нескольким милливаттам.

Необходимо отметить, что нелинейность среды играет в волоконно-оптической связи двоякую роль. С одной стороны, она ограничивает скорость и дальность передачи, с другой - может быть обращена во благо. Например, ВРМБ можно использовать для реализации режима ввода/вывода каналов. Кроме того, ФКМ и четырехволновое смешение применяются в волновых конверторах для переноса полезного сигнала с одной несущей длины волны на другую, а ВКР и ВРМБ - в волоконных лазерах и усилителях [27].

## 2.2. Анализ факторов, влияющих на качество передачи информации в оптических системах

Распространение оптических сигналов с фиксированной поляризацией в системах оптической связи описывается нелинейным уравнением Шредингера (НУШ) [28].

$$\frac{\partial E}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2(z)\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \frac{\alpha(z)}{2}E = i\gamma|E|^2E, \quad (2.1)$$

где  $E(z, t)$  - напряженность электрического поля оптического сигнала на расстоянии  $z$  от передатчика в момент времени  $t$  ;

- $\alpha$  и  $\beta_2$  - соответственно коэффициент затухания и вторая производная коэффициента распространения  $\beta(\omega)$  волокна на длине волны излучения;
- $\gamma$  - коэффициент нелинейности ОВ.

Для того чтобы разобраться в том, как конкретно нелинейности, воздействуя на оптический сигнал, приводят к ухудшению параметров передачи, целесообразно выделить в уравнении 2.1 более конкретные виды нелинейных взаимодействий и понять, как они воздействуют на сигнал.

Классификация видов нелинейных воздействий приведена на рис. 2.5. Нелинейные эффекты наряду с самовоздействием импульсов проявляются во взаимодействии различных импульсов одного спектрального канала, во взаимодействии различных спектральных каналов между собой и во взаимодействии информационных сигналов с шумами усиленного спонтанного излучения. Самовоздействие отдельных импульсов информационного потока и взаимодействие различных импульсов одного спектрального канала между собой будем называть внутриканальными взаимодействиями. Нелинейное взаимодействие между двумя или более DWDM каналами будем называть межканальными взаимодействиями. DWDM системы связи – системы многоканальной передачи информации по

одному волокну, в которых каналы отличаются длиной волны несущих световых волн ( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ) [35].

Важность различных видов нелинейных воздействий в сильной степени зависит от канальной скорости передачи информации. Как правило, воздействие межканальных нелинейных эффектов в WDM системах связи наиболее существенно при канальных скоростях 10 Гбит/с и меньше, т.е. при реализации режимов дисперсионно-управляемых солитонов и квазилинейного. Внутриканальные нелинейные эффекты наиболее сильно проявляются при скоростях 40 Гбит/с и выше, т.е. в псевдо линейных режимах.

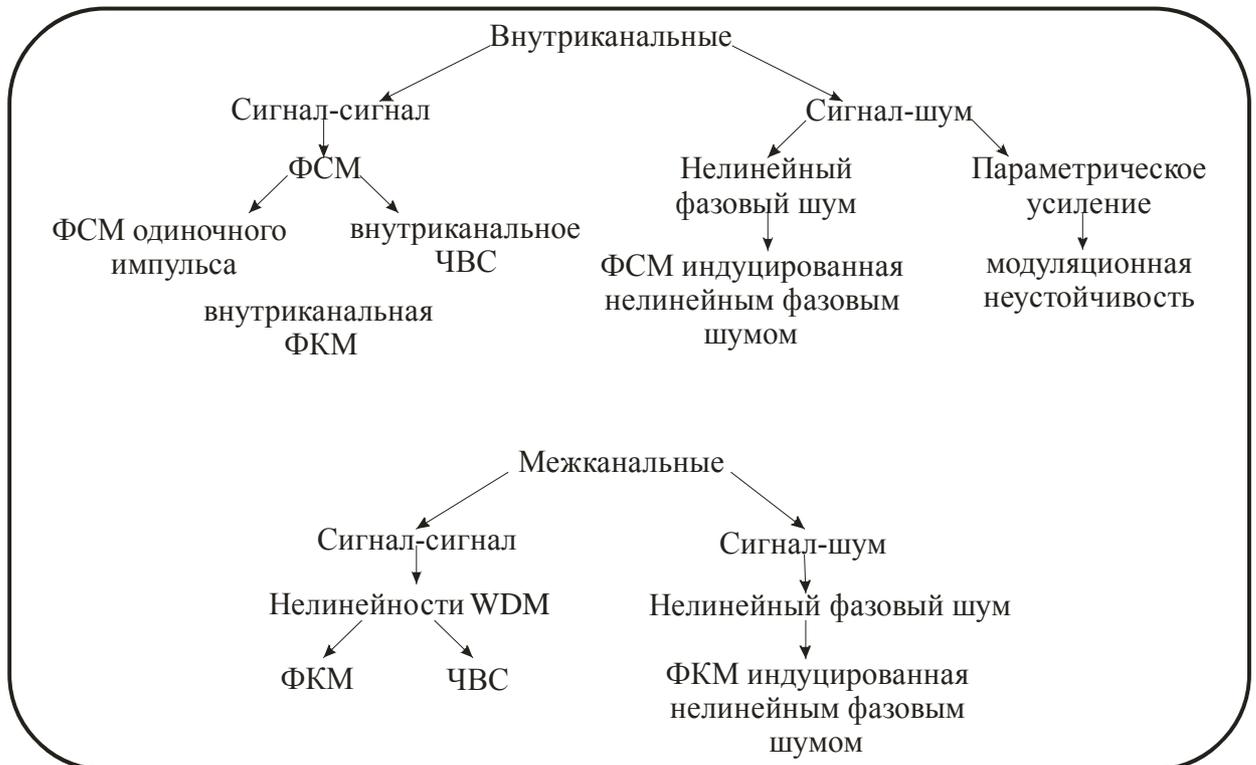


Рис. 2.5. Классификация видов нелинейных воздействий на информационные сигналы в оптических системах связи

Степень воздействия нелинейных эффектов определяется, также, величиной локальной дисперсии: как правило, в волокнах с меньшей величиной локальной дисперсии ( $D < 10\text{пс}/(\text{нм}\cdot\text{км})$ ) межканальные

нелинейные воздействия проявляются сильнее, чем в волокнах с большей величиной локальной дисперсии ( $D > 10$  пс/(нм·км)).

Влияние нелинейного взаимодействия между сигналом и шумом очень существенно зависит от уровня шума и существенно возрастает в условиях малой величины оптического отношения сигнал/шум (OSNR). Особенно сильно это влияние проявляется в системах связи, использующих коды с коррекцией ошибок (FEC).

Таким образом, воздействие нелинейности сильно зависит как от физических параметров линии связи, так и от форматов модуляции. Диаграмма на рис.2.6. показывает, какие виды нелинейности играют наиболее важную роль в системах связи с амплитудной модуляцией в зависимости от физических параметров линии связи [28].

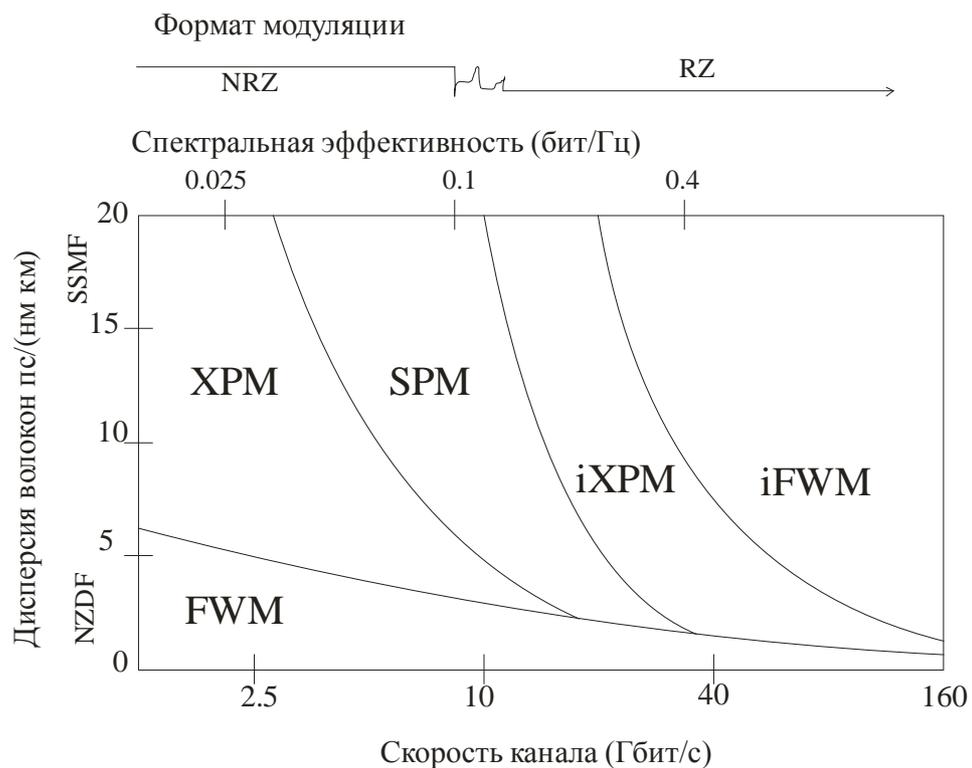


Рис. 2.6. Значимость внутриканальных и межканальных нелинейных воздействий на характеристики WDM/DWDM системы связи с различными канальными скоростями.

Как показано на диаграмме, в высокоскоростных системах связи и при дисперсии ( $D > 10$  пс/(нм\*км)) наиболее значительное воздействие оказывают внутриканальная кроссмодуляция (iXPM) и внутриканальное ЧВС (iFWM).

При скорости 2,5 Гбит/с в волокне с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF) наиболее сильное воздействие оказывает ЧВС, а в стандартном волокне (SSMF) – фазовая кроссмодуляция (XPM). При скорости 10 Гбит/с в волокне NZDSF наиболее сильное воздействие оказывает фазовая кроссмодуляция, а в волокне SSMF – фазовая самомодуляция (SPM). И наконец при скорости 40 Гбит/с в волокне NZDSF наиболее сильное воздействие оказывает внутриканальная кроссмодуляция (iXPM), а в волокне SSMF – внутриканальное ЧВС (iFWM). Разрыв стрелки над диаграммой показывает, что оптимальным форматом передачи информации для скоростей до 10 Гбит/с был формат NRZ, а при больших скоростях становится предпочтительнее RZ формат (отметим, что рассматриваются только амплитудные форматы) [33].

При рассмотрении взаимодействия между сигналами, уравнение (2.1) можно аналитически преобразовать таким образом, чтобы разделить вклады от различных видов нелинейных взаимодействий, показанных на рис.2.5. Для этого разобьем нелинейный член в (2.1) на сумму взаимодействий сигналов различных спектральных каналов (для межканальных взаимодействий) или на сумму взаимодействующих сигналов одного канала (для внутриканальных взаимодействий).

Для примера рассмотрим взаимодействие трех сигналов. Разобьем общее поле  $E$  на сумму трех компонент  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ . В предположении малых нелинейных искажений уравнение (2.1) можно разделить на три связанных уравнения, по одному для поля каждого сигнала. К примеру, уравнение для поля  $E_1$  будет иметь вид:

$$\frac{\partial E_1}{\partial z} + \frac{i}{2} \beta_2(z) \frac{\partial^2 E_1}{\partial t^2} + \frac{\alpha(z)}{2} E_1 = i\gamma |E_1|^2 E_1 + 2i\gamma (|E_2|^2 + |E_3|^2) E_1 + i\gamma E_2^2 E_3. \quad (2.2)$$

В правой части уравнения (2.2) первый член всегда описывает ФСМ; если поля  $E_2$  и  $E_3$  относятся к сигналам в соседних каналах, то второй член описывает ФКМ и третий – ЧВС; если поля  $E_2$  и  $E_3$  относятся к сигналам в одном канале, то второй член описывает внутриканальную ФКМ и третий – внутриканальное ЧВС [28].

Учет внутриканальных нелинейных эффектов особенно важен при анализе работы высокоскоростных систем связи. Численный анализ позволил выявить характер искажений, возникающих при воздействии различных видов нелинейных взаимодействий. В случае, когда доминирующим процессом является  $i$ XPM, нелинейное взаимодействие проявляется, в основном, в потере временной синхронизации информационных сигналов (джиттер).

В системах связи, подверженных влиянию  $i$ FWM, главный результат взаимодействия – появление ложных импульсов («духов») во временных интервалах, в которых изначально импульсов не было.

Для ослабления внутриканальных нелинейных искажений используются разновидности амплитудных форматов, использующих так называемое псевдо многоуровневое или корреляционное кодирование. Примерами таких форматов являются двойной бинарный (дуобинарный) и формат с инвертированным кодированием (AMI) [34].

Пространственное распределение дисперсии. Эффективным методом ослабления нелинейных искажений, нашедшим самое широкое применение, является оптимизация пространственного распределения дисперсии. Пространственное распределение дисперсии определяется выбором точек расположения компенсаторов дисперсии и подбором величины компенсируемой дисперсии. Влияние оптимизации пространственного распределения дисперсии можно понять, приняв во внимание тот факт, что воздействие нелинейности в конкретной точке линии связи определяется распределением поля и мощностью сигнала в этой точке. Более того,

распределение поля в очень сильной степени определяется величиной накопленной дисперсии на пути от передатчика до рассматриваемой точки линии связи [28].

Выбирая различные точки расположения компенсаторов дисперсии с учетом пространственного изменения мощности передаваемого сигнала можно управлять параметрами нелинейного взаимодействия сигналов и минимизировать деградацию характеристик линии связи. Поэтому оптимизация пространственного распределения дисперсии является неотъемлемой частью проектирования любой высокоскоростной системы связи. Вариантов пространственного распределения дисперсии бесконечно много, но в реальных системах связи часто места расположения компенсаторов дисперсии привязаны к местам расположения узлов сети. В подводных трансокеанских системах связи обычно используется периодическое расположение компенсаторов дисперсии. Для полного определения дисперсионных характеристик такой однопериодической линии требуется всего три параметра: величина предварительной компенсации, величина компенсации (или не скомпенсированная дисперсия) на каждом периоде и величина остаточной накопленной дисперсии.

Оптимизация однопериодической линии связи по трем параметрам для заданного типа волокна, скорости передачи информации, спектрального расстояния между каналами и формата модуляции позволяет увеличить допустимую вводимую в линию связи мощность, добиваясь наибольшего значения OSNR на стороне приемника при умеренной величине нелинейных искажений для обеспечения минимального значения коэффициента ошибок (BER). Широко исследуются и другие типы пространственного распределения дисперсии. Так использование пространственного распределения дисперсии с двумя периодами обеспечивает больше возможностей для оптимизации линии связи [33].

Практическая реализация линий связи с точно определенным пространственным распределением дисперсии может оказаться трудной задачей. Из-за того, что величина дисперсии волокна часто известна лишь с определенной конечной точностью, а компенсирующие дисперсию модули изготавливаются на конечное число значений накопленной дисперсии, возникает некоторая доля неопределенности в характере распределения дисперсии и величине ее интегрального значения. В связи с этим важной задачей становится анализ влияния отклонений параметров системы от оптимального значения на характеристики информационного сигнала. Пример такого анализа для системы связи со скоростью 10,7 Гбит/с, использующей NRZ ASK формат модуляции, приведен на рис.2.7.

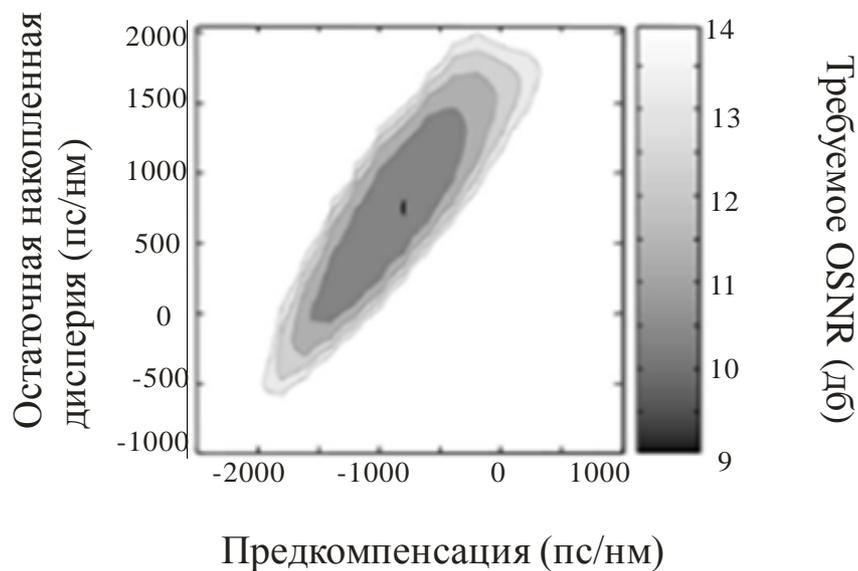


Рис. 2.7. Пример анализа влияния неточности реализации пространственного распределения дисперсии однопериодической системы. Скорость передачи информации 10,9 Гбит/с, формат модуляции NRZ ASK.

На рисунке 2.7 приведены контурные диаграммы, показывающие требуемую для получения заданного BER величину OSNR в 11-канальной системе связи со спектральным мультиплексированием при канальной скорости 10,9 Гбит/с в формате модуляции NRZ ASK. Поскольку удобно

рассматривать двумерный график, то один из трех параметров – величина компенсации на каждом периоде – считается неизменной величиной, равной 100 пс/нм, а на графике показана зависимость от двух других параметров: величины предварительной компенсации и величины остаточной накопленной дисперсии. Исследованная линия состоит из 15 участков по 80 км волокна SSMF и мощностью, вводимой в каждый участок, 2,6 дБм.

Взаимодействие сигнала с шумом. Основным источником шумов в оптических системах связи – усиленное спонтанное излучение оптических усилителей, расположенных в линии связи для усиления полезного сигнала. Взаимодействие сигнала с шумом проявляется в двух видах. Первый вид нелинейного взаимодействия сигнала с шумом можно рассматривать как параметрическое усиление шумов. В этом процессе шумы усиливаются под действием одной или нескольких сигнальных волн (спектральных каналов), действующих как накачка в параметрическом процессе, при распространении в волокне. В случае взаимодействия с одним информационным каналом для этого процесса используется термин модуляционная неустойчивость. В волоконно-оптических системах связи параметрическое усиление шумов и модуляционная неустойчивость проявляются главным образом в том, что шум усиливается в ограниченной частотной полосе (до 50 ГГц) вокруг оптической несущей информационного канала [28].

Модуляционная неустойчивость может проявляться и при действии фазовой кросс модуляции. Эффекты параметрического усиления шумов и модуляционной неустойчивости наиболее заметны в системах с малым значением OSNR, то есть в системах связи, использующих FEC.

Второй вид нелинейного взаимодействия сигнала с шумом проявляется в искажениях параметров сигнала (таких как амплитуда, задержка, фаза или частота). Обычно в процессе нелинейного распространения временной профиль незначительно изменяется из-за взаимодействия с шумом, но изменения других характеристик импульсного сигнала из-за нелинейного

взаимодействия с шумом могут значительно превысить флуктуации, вызываемые линейным сложением сигнала с шумом.

Классическим примером нелинейного воздействия шума на сигнал является взаимодействие солитонов с шумом усиленного спонтанного излучения (временной джиттер Гордона-Хауса). Другим примером нелинейного воздействия шума на сигнал является нелинейный фазовый шум (эффект Гордона-Моленуэра). Этот эффект особенно сильно ухудшает качество передачи в системах связи, использующих фазовые форматы модуляции [28].

Качественно эффект можно объяснить следующим образом. Шум складывается случайным образом с различными импульсами информационной последовательности. При синфазном (конструктивном) сложении амплитуда импульса возрастает, а при противофазном – уменьшается. Такие случайные вариации амплитуды различных импульсов-битов переносятся в случайные вариации фазы из-за эффекта фазовой самомодуляции. Наиболее деструктивное воздействие случайные вариации фазы оказывают на форматы, использующие фазу для кодирования информации (DPSK и DQPSK).

На рисунке 2.8 показано воздействие нелинейного фазового шума на работу системы связи, использующей 50% RZ-DPSK формат модуляции со скоростью 42,7 Гбит/с и балансный приемник. Параметры линии: 32 участка по 80 км,  $D=4,4$  пс/(км\*нм),  $S=0,045$  пс/(км<sup>2</sup>\*нм),  $\alpha=0,2$  дБ/км,  $n_2=2,5 \times 10^{20}$  м<sup>2</sup>/Вт и  $A_{\text{eff}}=52,82$  мкм<sup>2</sup>. Пространственное распределение дисперсии однопериодическое, предварительная компенсация -250 пс/нм, остаточная дисперсия каждого участка 20 пс/нм и остаточная дисперсия 20 пс/нм.

Оценка величины нелинейных искажений проводится по величине отношения сигнал/шум (OSNR), требуемого для обеспечения работы системы с уровнем BER =  $10^{-3}$ . На нижней кривой (кружки) показаны результаты для гипотетической системы, в которой шум возникает

непосредственно перед приемником. В такой системе полностью отсутствует нелинейный фазовый шум и присутствуют только искажения, вызванные взаимодействием информационных каналов. Если, опять гипотетически, рассмотреть систему, в которой шум появляется сразу после передатчика и распространяется по линии связи совместно с сигналом, то величина требуемого OSNR (необходимого для обеспечения того же значения BER  $=10^{-3}$ ) возрастает из-за появления нелинейного фазового шума (верхняя кривая с треугольными маркерами). Наиболее реалистичная ситуация соответствует случаю, когда шум производится равномерно по линии всеми усилителями (в рассмотренной модели было 32 оптических усилителя) [32]. Соответствующая этому кривая имеет квадратные маркеры и расположена на рисунке посередине.

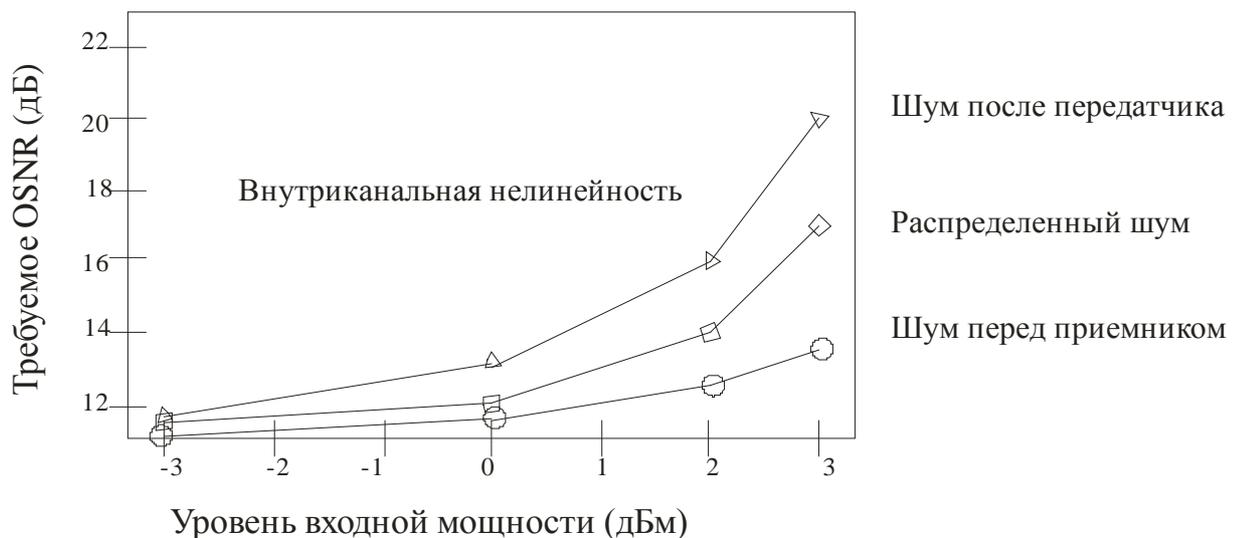


Рис. 2.8. Влияние нелинейного фазового шума на величину OSNR при одноканальной передаче сигнала 42,7 Гбит/с в формате 50% RZ-DPSK.

Рассмотренный выше механизм образования нелинейного фазового шума основан на преобразовании шумовой амплитудной модуляции информационных сигналов под действием ФКМ. В многоканальных (DWDM) системах ФКМ также производит нелинейный фазовый шум:

шумовая амплитудная модуляция сигналов одного информационного канала под действием ФКМ преобразуется в фазовый шум соседних каналов. Такой механизм может стать ограничивающим фактором при расстоянии между каналами 50 ГГц и менее и малой скорости (до 10 Гбит/с).

Полное понимание ограничений на характеристики оптических линий связи из-за нелинейных искажений, по-прежнему, остается предметом активных исследований. Тем не менее, проведенные численные исследования позволяют определить основные виды нелинейных воздействий, ограничивающих скорость и дальность передачи информации.

Вклад различных видов нелинейных воздействий существенно различен в линиях связи, использующих амплитудные и фазовые форматы модуляции, зависит от величины хроматической дисперсии волокна, скорости передачи информации и плотности расположения спектральных каналов WDM.

Вклад различных видов нелинейных эффектов в деградацию параметров амплитудно-модулированных бинарных систем связи показан на рис.2.6.

В случае фазовых форматов модуляции при скоростях передачи информации 2,5 и 10 Гбит/с основной источник искажений в системах связи – нелинейный фазовый шум. При скоростях передачи 40 Гбит/с и выше доминируют внутриканальные нелинейные эффекты, хотя при малом значении OSNR нелинейный фазовый шум также может быть ограничивающим фактором.

Результат воздействия нелинейных эффектов зависит от многих системных параметров, в том числе от используемого формата модуляции и скорости передачи информации [28].

## **Выводы по главе II:**

1. При анализе технологии DWDM следует учитывать следующие явления: нелинейное преломление, вынужденное рассеяние света и четырехволновое смешение.

2. Нелинейное преломление вызвано зависимостью показателя преломления сердцевины волокна от интенсивности оптического сигнала. Когда мощность сигнала достаточно велика, ее колебания приводят к фазовой самомодуляции (ФСМ) и фазовой кросс-модуляции (ФКМ).

3. Вынужденное рассеяние света представляет собой рассеяние на элементарных возбуждениях среды, индуцированных рассеиваемой волной. Самые важные виды рассматриваемого явления - вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), иногда называемое рамановским, и вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ).

4. Четырехволновое смешение заключается в том, что при наличии двух попутных волн с частотами  $f_1$  и  $f_2$  ( $f_1 < f_2$ ) возникают еще две волны, с частотами  $2f_1 - f_2$  и  $2f_2 - f_1$ , распространяющиеся в том же направлении и усиливающиеся за счет исходных. Данный вид нелинейности теснее других связан с параметрами системы: на него влияют не только длина волокна и площадь поперечного сечения его сердцевины, но и расстояние между соседними каналами и дисперсия.

## **ГЛАВА III. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ НА КАЧЕСТВО ПЕРЕДАЧИ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ПО ДЛИНЕ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ**

### **3.1. Методы оценки качества оптических систем с разделением по длине волны излучения при помощи имитационного моделирования на Matlab.**

Высокая скорость и высокая производительности оптических систем с разделением по длине волны излучения позволяет им стать основной для глобальных магистральных сетей передачи информации. Поскольку скорость передачи информации в таких системах увеличивается от 40 Гбит/с до 100 Гбит/с, моделирование подобных систем позволяет избежать дорогостоящих практических испытаний. Поиск универсальной платформы моделирования для DWDM систем является актуальной задачей. Matlab Simulink стал универсальной математической и инструментальной платформой моделирования в большинстве университетов и исследовательских лабораторий по всему миру. Моделирование базируется в основном на физических процессах и понимании концепции коммуникации и оптики [36].

Высокая скорость и высокая производительность современных цифровых оптических систем требуют тщательного исследования по определению теоретической производительности с учетом различных нарушений, прежде чем они будут развернуты на практике. Таким образом, спрос на всеобъемлющую платформу моделирования оптических систем является критическим, особенно платформу моделирования, которая может структурировать реальные оптические подсистемы. Моделирование испытательного стенда необходимо для детального проектирования,

изучения и проверки преимуществ и недостатков современных форматов модуляции волоконно-оптических систем передачи.

Платформа используется в основном для исследования производительности современных форматов модуляции, в частности, амплитудной и/или фазовой манипуляции. Одноканальная оптическая система представляет основной интерес для моделирования в данной работе [36].

Некоторые заметные преимущества имитационного моделирования на Matlab Simulink платформе, приведены ниже:

- Simulink предоставляет набор инструментов и блоксетов позволяющих создать системы любых сложных конфигураций. Процесс инициализации в начале любого моделирования для всех параметров компонентов системы может быть проведен автоматически. Инициализация файла записывается в отдельный файл Matlab, так параметры моделирования могут быть легко изменены.
- Мониторинг легко осуществляется. Сигналы легко контролируются в любой точке вдоль пути распространения в процессе симуляции.
- Численные данные, включая любые параметры моделирования и численные результаты, могут быть легко сохранены для последующей обработки и использования в Matlab инструментарии.
- Качество передачи оптических систем передачи может быть автоматически и точно оценено [36].

Любое исследование цифровых оптических систем передачи требует глубокого понимания принципов работы компонентов системы, которые включают в себя:

1) модуляцию/демодуляцию и генерацию/детектирование оптических сигналов;

2) ухудшение качества передачи информации под воздействием шумов и нелинейных искажений;

3) эффекты оптических и электрических фильтров.

Среда передачи может состоять из различных типов волокон, таких как стандартные SMF ITU-G.652 или волокна с ненулевой смещенной дисперсией (NZ-DSF) ITU-G.655 или новый тип волокна: Corning Vascade. Дисперсия и искажения световых сигналов, как правило компенсируются волокнами компенсирующими дисперсию (DCF). Такие волокна, как правило, сопровождаются легированными эрбием оптическими усилителями (EDFA) для предварительного усиления и компенсации затухания передачи диапазона, а так же для повышения оптической мощности каналов до приемлемого значения.

Передачики будут состоять из узкой линии излучения лазерного источника для создания световой волны с длиной волны утвержденной в сетке ITU. Эти световые волны объединяются и затем модулируются. Эта форма предназначена только для лабораторных экспериментов.

Оценка эффективности функционирования оптической системы передачи с точки зрения качества детектирования сигналов является важнейшим аспектом в моделировании. Ключевыми показателями, отражающими качество сигнала, являются оптический сигнал-шум (OSNR) и глаз диаграмма (EO), а коэффициент битовых ошибок (BER) является основным показателем эффективности системы.

В экспериментальных установках и практических оптических системах BER и добротность (Q-фактор) могут быть получены непосредственно с помощью измерений современными BERT тестерами, далее данные могут быть экспортированы в портативную память для последующей обработки. Тем не менее, следует отметить, что эти экспериментальные системы должны быть запущены в течение, по крайней мере, нескольких часов, чтобы результаты являлись стабильными и точными [41].

В случае исследования производительности оптической системы передачи с помощью моделирования, были разработаны такие методы, как:

- 1) Численный метод Монте-Карло;
- 2) Метод расчета добротности, Q-фактора и, следовательно, BER основанного на предположении Гауссовского распределения шума.
- 3) Методы, основанные на статистических процессах с учетом искажения вследствие возникновения нелинейных эффектов оптического волокна.

Метод Монте-Карло.

BER является отношением числа возникновения ошибок ( $N_{error}$ ) к общему числу переданных битов  $N_{total}$ :

$$BER = \frac{N_{error}}{N_{total}} . \quad (3.1)$$

Метод Монте-Карло позволяет определить точную картину через BER метрики для всех форматов модуляции и типов приемника. Конфигурация оптической системы при моделировании должна включать в себя все источники искажения формы сигнала, включая нарушения структуры волокна и ASE (оптический) / электрические шумы [36].

Очевидно, что требуется достаточно большое количество переданных бит для определенного BER, что приводит к длительному времени вычисления. Показатель BER равный  $10^{-9}$ , который рассматривается как "правильный прием" в большинстве научных публикаций, требует передачи, по крайней мере,  $10^{10}$  бит.

Показатели BER полученные с помощью метода Монте-Карло могут использоваться для сравнения с другими значениями BER полученными с использованием других методик. Время, необходимое для завершения

моделирования может занять несколько часов, чтобы добиться  $BER=10^{-9}$  [36].

Функция распределения вероятности BER и Q-фактора.

Этот метод основан на вычислении значений BER и Q-фактора для определения нормированной функции распределения вероятностей полученных электрических сигналов. Функции распределения вероятностей могут быть определены статистически с помощью гистограмм.

Особое значение напряжения, используемое в качестве эталона для различения "1" и "0" известно как пороговое напряжение ( $V_{th}$ ). Показатель BER в случае передачи бита "1" (принимается как "0" вместо "1") рассчитывается по хорошо известному принципу [25]. Аналогичный расчет применяется для бит "0". Форма функции распределения вероятностей очень важна для получения точного значения BER. Если точная форма функции распределения вероятностей известна, показатель BER может быть рассчитан точно по формуле:

$$BER = P(1)P(0|1) + P(0)P(1|0), \quad (3.2)$$

где  $P(1)$  - вероятность того, что передается "1";

-  $P(0|1)$  - вероятность ошибки из-за получения "0", где на самом деле передается "1";

-  $P(0)$  - вероятность того, что передается "0";

-  $P(1|0)$  - вероятность ошибки из-за получения "1", где на самом деле передается "0";

- обычно вероятности передачи "1" и "0" принимают равными, т.е.  $P(1)=P(0)=1/2$ .

Популярным подходом в моделировании и коммерческих BERT тестерах является предположение о том, что функция распределения вероятностей "1" и "0" подчиняется гауссовскому/нормальному

распределению, т.е. источники шума аппроксимируются гауссовским распределением. Если предположение верно, то достигается высокая точность. Этот метод позволяет быстро оценить BER с помощью дополнительных функций ошибки [37]:

$$BER = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{|\mu_1 - V_{th}|}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{|\mu_0 - V_{th}|}{\sqrt{2}\sigma_0} \right) \right], \quad (3.3)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_0$  - математическое ожидание функции распределения вероятностей "1" и "0" соответственно, а  $\sigma_1$  и  $\sigma_0$  - дисперсия функции распределения вероятностей. Добротность или Q-фактор, который может быть выражен либо в линейной либо в логарифмической шкале, может быть рассчитан из полученных BER с помощью выражения:

$$Q = \sqrt{2} \operatorname{erfc}^{-1}(2BER), \quad Q_{dB} = 20 \log \left( \sqrt{2} \operatorname{erfc}^{-1}(2BER) \right). \quad (3.4)$$

Общая цель повышения точности гистограммы заключается в поиске оптимального значения числа интервалов и их ширины, которые будут использоваться для аппроксимации гистограммы, так, чтобы погрешность оценки была незначительной. По данным [38], с достаточно большим количеством переданных битов ( $N_0$ ), хорошая оценка для ширины ( $W_{bin}$ ) каждого интервала гистограммы определяется по формуле:

$$W_{bin} = \sqrt{N_0}. \quad (3.5)$$

Оптический сигнал-шум (OSNR) является популярным показателем, используемым для оценки эффективности функционирования оптических систем передачи, которая особенно ограничивается из-за ASE шума

легированными эрбием оптического усилителя EDFA. Оптический сигнал-шум определяется как отношение мощности оптического сигнала к мощности оптического шума. Для одного EDFA усилителя с выходной мощностью  $P_{out}$ , оптический сигнал-шум определяется по формуле:

$$OSNR = \frac{P_{out}}{N_{ASE}} = \frac{P_{out}}{(NF \cdot G - 1)hf\Delta f}, \quad (3.6)$$

где NF - шум усилителя;

- G - коэффициент усиления;
- hf - энергия фотона;
- Δf - пропускная способность.

Тем не менее, OSNR не обеспечивает хорошую оценку производительности системы, когда основные причины ухудшения качества связаны с возникновением нелинейных эффектов. В этих случаях, ухудшение производительности происходит в основном за счет искажения сигнала, а не наличия шумов.

При анализе значения OSNR, важно определить пропускную способность оптической системы, для которой рассчитывается OSNR. На практике мощность сигнала и мощность шума, как правило, измеряется непосредственно при помощи анализатора оптического спектра (OSA). Значение  $\lambda = 0.1$  нм или  $\Delta f = 12.5$  ГГц широко используется в качестве типичного значения для расчета OSNR.

В процессе распространения световых волн по оптическому волокну, вследствие нелинейности среды возникают нарушения, в частности хроматическая дисперсия и поляризационная модовая дисперсия, которые приводят к искажению формы сигналов [36].

Глаз-диаграмма является мерой производительности. Глаз-диаграмма - это разность самой низкой и высокой амплитуд. Глаз-диаграмма в

конкретном экземпляре выборки рассчитывается в логарифмической шкале (дБ) и определяется по формуле:

$$EOP(t_{samp}) = \frac{EO_{ref}}{EO_{received}} . \quad (3.7)$$

Глаз-диаграмма полезна для системы оценок, не учитывающей шум, так как является хорошей оценкой детерминированных эффектов искажения формы импульса. Если шум присутствует, расчет EOP становится менее точным из-за неоднозначности уровней сигналов, которые были повреждены воздействием шума.

### **3.2. Исследование влияния фазовой самомодуляции оптического сигнала на качество каналов ВОСП СРК**

Применение систем со спектральным разделением каналов (СРК) позволяет повысить эффективность использования оптических волокон (ОВ) и уменьшить себестоимость услуг связи. Возможность полной компенсации дисперсионных искажений группового сигнала, а также усиление сигнала в оптической форме привело к тому, что качество оптических каналов такой системы, в основном, определяется усиленным спонтанным излучением оптического усилителя. Для увеличения защищенности сигнала на входе схемы принятия решения тракта приема, необходимо повышать мощность сигнала на выходе передатчика. При этом также повышается мощность нелинейных помех, приводящих к искажению формы импульса, межсимвольной и межканальной интерференции. Поэтому при расчете параметров качества оптических каналов следует учитывать проблему возникновения нелинейных искажений в приемном сигнале оптического канала. В большинстве публикаций при расчете вероятности ошибки оптического канала учитывается только четырехволновое смешение [39] и спонтанный шум оптического усилителя [40]. Однако в расчетах необходимо также учитывать фазовую самомодуляцию, приводящую к искажению формы импульсов выходного сигнала и деградации параметров качества оптического канала.

Поэтому целью данной работы является оценка влияния фазовой самомодуляции оптического сигнала на параметры качества оптического канала ВОСП СРК.

Для решения поставленной задачи, в среде MatLab согласно функциональной схеме, показанной на рис. 3.1, построена имитационная модель Matlab Simulink (рис 3.2) одного канала ВОСП СРК. Модель включает передатчик и приемник оптического канала, а также одинаковых оптических секций.

Передатчик ВОСП состоит из лазера непрерывного действия ЛНД, оптического модулятора ОМ и генератора псевдослучайной последовательности ГПСП, формирующего двоичных символов со скоростью  $V=10$  Гбит/с. Длительность фронта импульса выходного сигнала составляет при изменении мощности от уровня  $K_1$  до  $K_2$  своего пикового значения. В работе [41] показано, что форму фронта оптического импульса можно описать гауссовой кривой с половиной условной длительности импульса.

(3.8)

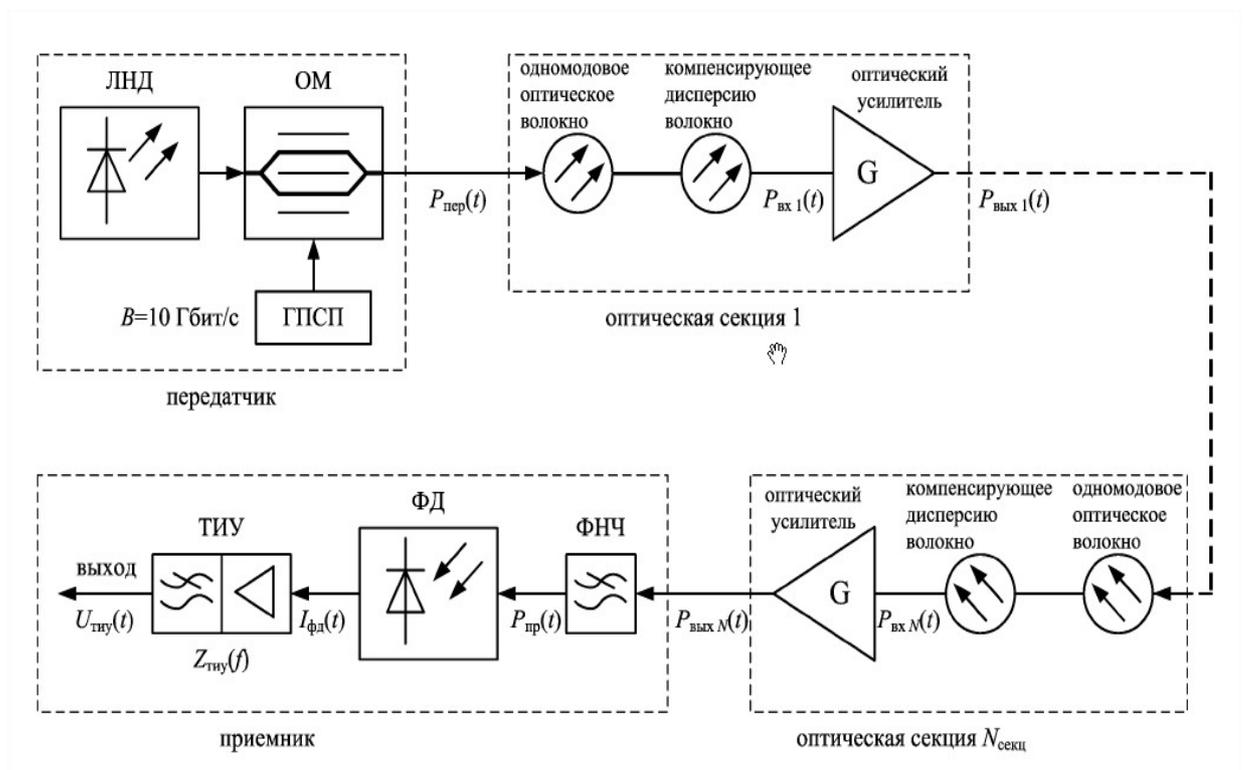
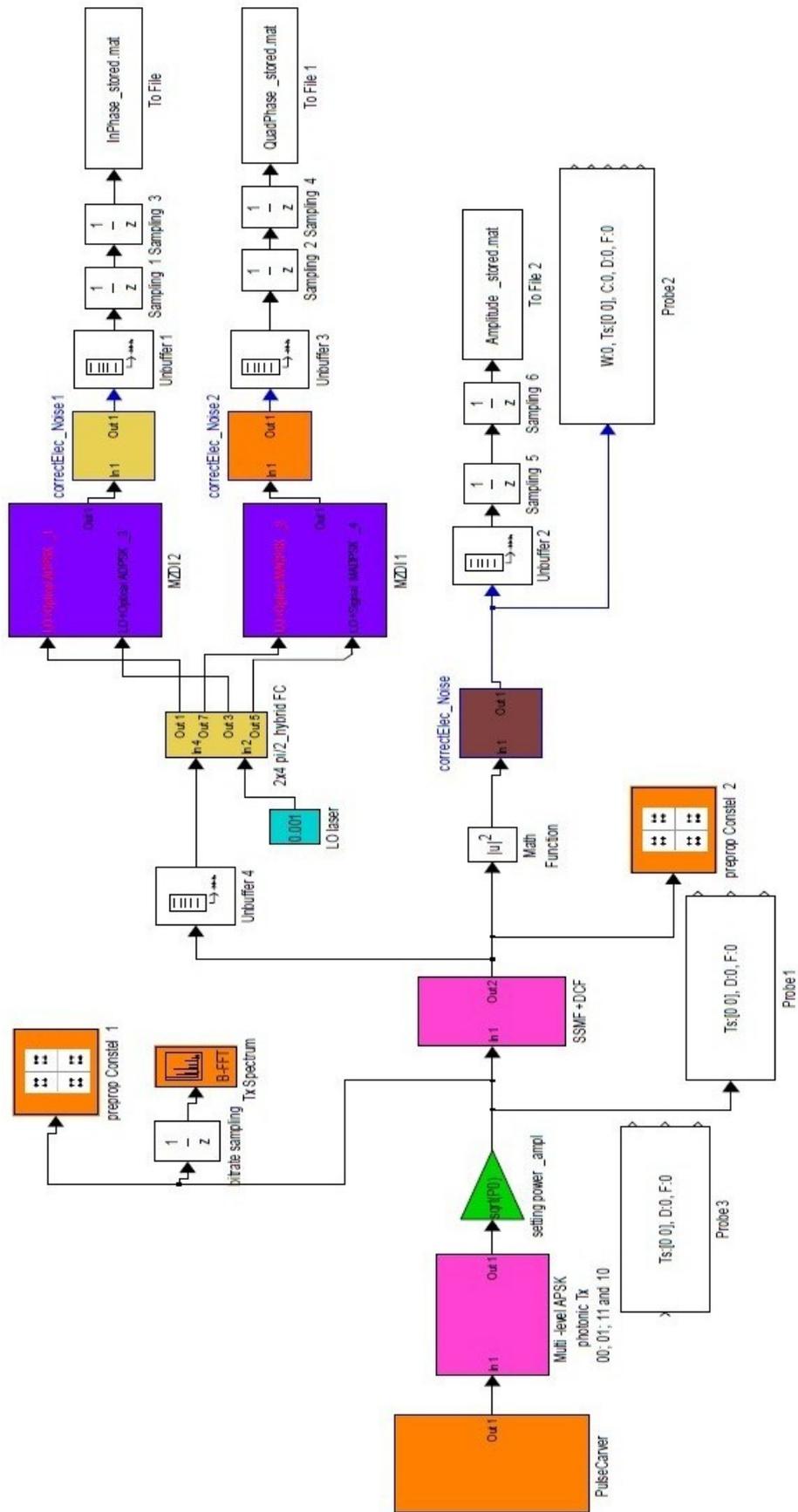


Рис.3.1. Функциональная схема имитационной модели одного канала  
ВОСП СРК

Рис 3.2. Matlab Simulink модель



На выходе ОМ формируется индивидуальный канальный сигнал со следующей формой импульсов [3]:

$$P_{10}(t) = \begin{cases} P_1, & 0 \leq t \leq \Delta t \\ (P_1 - P_0)e^{\frac{(t-\Delta t)^2}{2\sigma^2}} + P_0, & \Delta t \leq t \leq T_c, \end{cases} \quad (3.9)$$

$$P_{01}(t) = \begin{cases} (P_1 - P_0)e^{\frac{-(t-T_c+\Delta t)^2}{2\sigma^2}} + P_0, & 0 \leq t \leq \Delta t \\ P_1, & (T_c - \Delta t) \leq t \leq T_c \end{cases}, \quad (3.10)$$

$$P_{00} = P_0, \quad 0 \leq t \leq T_c, \quad (3.11)$$

$$P_{11} = P_1, \quad 0 \leq t \leq T_c, \quad (3.12)$$

где  $P_0$  и  $P_1$  - соответственно мощность единичного (1) и нулевого символов на выходе ОМ;

-  $T_c$  - символьный интервал.

Первый символ нижнего индекса в выражениях (3.9)-(3.12) равен биту предыдущего тактового интервала, второй символ – биту текущего тактового интервала.

Смещение  $\Delta t$  гауссового импульса по длительности оптического импульса рассчитывалось по выражению [41]:

$$\Delta t = \frac{T_c}{2} - \sigma\sqrt{2\ln 2}. \quad (3.13)$$

Известно, что стандартный оптический модулятор позволяет формировать сигнал с коэффициентом гашения  $ER = \frac{P_1}{P_0} \approx 10$ . В этом случае паспортные данные модулятора  $K_1$  и  $K_2$  перед подстановкой в (3.8) следует

пересчитать в промежуточные значения  $K_1$  и  $K_2$ . Рисунок 3.3 позволяет установить взаимосвязь между ними:

$$K'_1 = \frac{P_1 \left( K_1 - \frac{P_0}{P_1} \right)}{P_1 - P_0} \quad \text{и} \quad K'_2 = \frac{P_1 \left( K_2 - \frac{P_0}{P_1} \right)}{P_1 - P_0} . \quad (3.14)$$

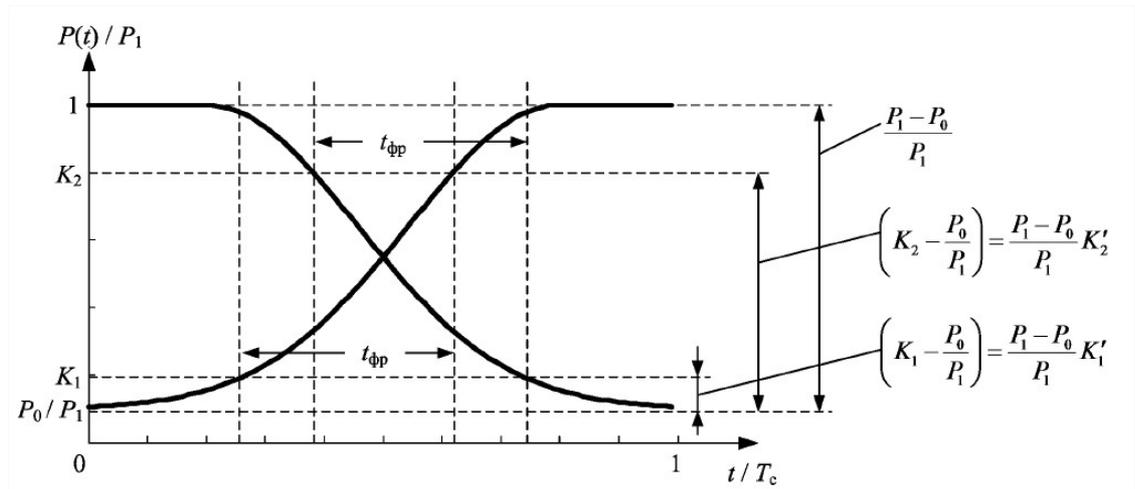


Рис.3.3. Параметры сигнала на выходе оптического передатчика.

Оптическая секция (рис. 3.1) состоит из последовательно включенных одномодового ОВ типа SMF (Single Mode Fiber) длиной  $L_{smf}$ , компенсирующего дисперсию ОВ типа DCF (Dispersion Compensation Fiber) длиной  $L_{dcf}$  и оптического усилителя на основе легированного эрбием волокна EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). В основу моделей двух вышеуказанных типов волокон положено известное нелинейное уравнение Шредингера [42]:

$$j \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{j\alpha}{2} A + \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \gamma |A|^2 A , \quad (3.15)$$

где  $A(z, t)$  - напряженность электрического поля оптического сигнала на расстоянии  $z$  от передатчика в момент времени  $t$  ;

- $\alpha$  и  $\beta_2$  - соответственно коэффициент затухания и вторая производная коэффициента распространения  $\beta(\omega)$  волокна на длине волны излучения;
- $\gamma$  - коэффициент нелинейности ОВ.

Простым и достаточно производительным методом решения уравнения Шредингера является известный Фурье-метод расщепления по физическим факторам [42]. Его суть заключается в разбиении оптического волокна с длиной на условных отрезков одинаковой длины. Внутри каждого из них моделирование дисперсионных и нелинейных эффектов на оптический сигнал проводится в три этапа (рис. 3.4).

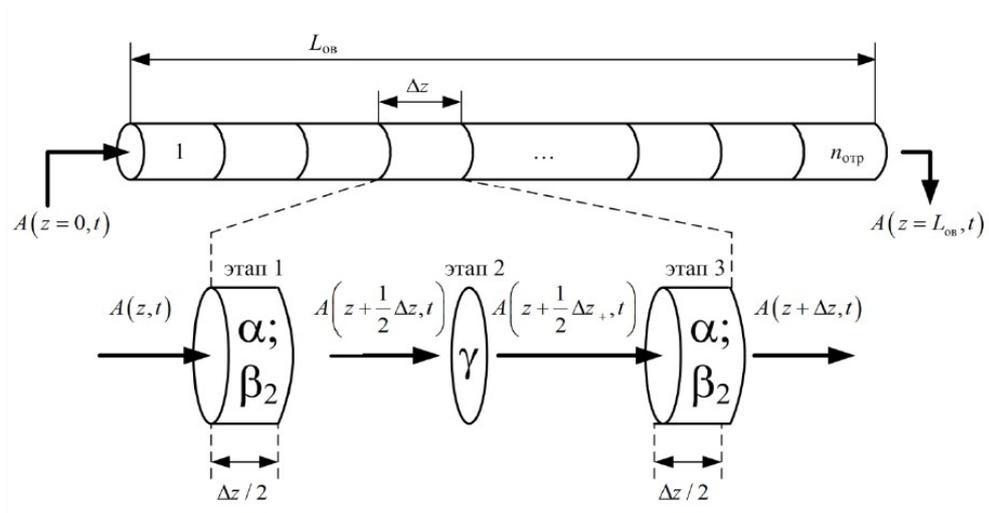


Рис. 3.4. Графическое представление Фурье-метода расщепления по физическим факторам.

Воздействие линейных (на первом и третьем этапе), а также нелинейных искажений (на втором) описывается следующими выражениями [43]:

$$A\left(z + \frac{1}{2}\Delta z, t\right) = \text{ifft} \left[ \text{fft}(A(z, t)) e^{-\frac{\alpha \Delta z}{2}} e^{j\frac{\beta_2 \omega^2 \Delta z}{2}} \right], \quad (3.16)$$

$$A\left(z + \frac{1}{2}\Delta z, t\right) = A\left(z + \frac{1}{2}\Delta z, t\right) e^{-j\gamma |A(z + \frac{1}{2}\Delta z, t)|^2 \Delta z}, \quad (3.17)$$

$$A(z + \Delta z, t) = \text{ifft} \left[ \text{fft} \left( A \left( z + \frac{1}{2} \Delta z, t \right) \right) e^{-\frac{\alpha \Delta z}{2}} e^{j \beta_2 \omega^2 \Delta z} \right], \quad (3.18)$$

где  $A(z, t)$  и  $A(z + \Delta z, t)$  - напряженность электрического поля оптического сигнала на входе и выходе условного отрезка волокна;

-  $\text{fft}(\square)$  и  $\text{ifft}(\square)$  - соответственно операторы прямого и обратного преобразования Фурье.

Моделирование показало, что увеличение количества условных отрезков свыше 100, не приводит к существенному повышению точности результатов моделирования, поэтому в дальнейших расчетах использовалось . Параметры волокон, которые использовались при моделировании, приведены в таблице 3.1 [44, 45].

Таблица 3.1

Параметры моделей оптических волокон

Тип волокна	$\alpha$ , дБ/км	Длина, км	$\beta_2$ , с <sup>2</sup> /км	$\gamma$ , 1/(Вт км)
Одномодовое (SMF)	0.2	50	$-21.68 \cdot 10^{-24}$	1.2
Компенсирующее дисперсию (DCF)	0.43	7.08	$153.05 \cdot 10^{-24}$	5.47

Выбранная длина волокна DCF в 7,08 км позволила полностью скомпенсировать дисперсионные искажения на выходе оптической секции.

Оптический усилитель моделировался согласно выражению [40]:

$$, \quad (3.19)$$

где  $P_{in}$  и  $P_{out}$  - соответственно мощности входного и выходного сигнала оптического усилителя секции n;

- $G$  - коэффициент усиления;
- $P_{ase}(t)$  - шум усиленного спонтанного излучения ASE (Amplified Spontaneous Emission).

Значение коэффициента усиления  $G$  выбиралось исходя из полной компенсации затухания отрезков одномодового  $A_{smf}$  и компенсирующего дисперсию  $A_{dcf}$  волокон:

$$G = 10^{0.1A_{smf} + A_{dcf}}. \quad (3.20)$$

Модель шума представляла комплексный случайный процесс с нормальным законом распределения и значением средней мощности [45]:

$$P_{ase} = 2n_{sp}(G - 1)hf(2\Delta f_o), \quad (3.21)$$

где  $n_{sp}$  - коэффициент спонтанной эмиссии ( $n_{sp} \approx 2$  для шум-фактора в 6 дБ);

- $h$  - постоянная Планка ( Дж с);
- $f$  - частота оптического излучения (соответствовала длине волны  $\lambda=1552$  нм);
- $\Delta f_o$  - полоса пропускания модели оптического ФНЧ.

В вышеприведенной формуле учитывалась удвоенная полоса пропускания оптического ФНЧ, поскольку полосовой фильтр пассивного демультиплексора ВОСП СРК имеет полосу частот в 2 раза большую  $\Delta f_o$ .

Для упрощения программной реализации функциональных блоков ВОСП СРК, модуляция оптической несущей частоты лазера не выполнялась. Поэтому на входе модели приемника ВОСП (рис. 3.1) вместо полосового оптического фильтра установлен ФНЧ. Его модель в MatLab представлена КИХ фильтром посредством функции `fir2` пакета `Signal Processing Toolbox`.

Расчет этого фильтра проводился по участку характеристики затухания полосового фильтра демультиплексора ВОСП СРК в области положительных частот (рис. 3.5,а) [46]. Фотодетектор представлял *p-i-n* фотодиод с токовой чувствительностью  $R=0,8$  А/Вт и следующей формой тока на выходе:

$$, \quad (3.22)$$

где  $U_{opt}$  - оптический сигнал на входе фотодиода.

Основу функциональной модели трансимпедансного усилителя (ТИУ) составила интегральная схема AD2820 фирмы Analog Devices. Функциональный блок модели реализован в виде КИХ фильтра, аналогично вышеуказанному ФНЧ, по характеристике трансимпеданса согласно рис. 3.5,б [47]. Внутренние шумы ТИУ и фотодиода не учитывались вследствие наличия предварительного оптического усилителя в составе предшествующей оптической секции.

Главным критерием качества оптических каналов ВОСП СРК является вероятность ошибки  $P_e$ , которая связана с Q-фактором следующим выражением:

$$, \quad (3.23)$$

где  $erfc()$  – функция ошибок.

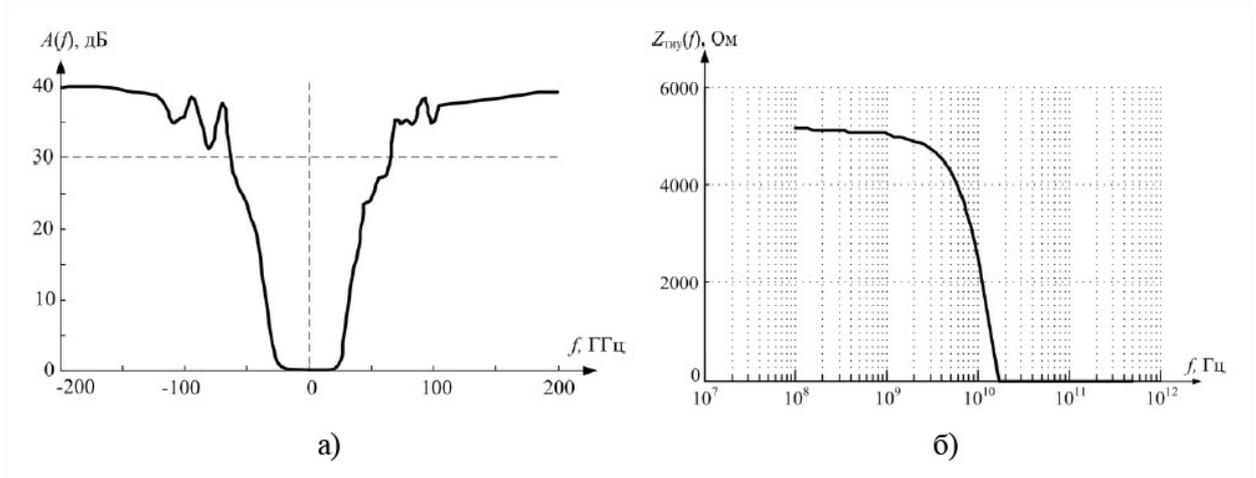


Рис. 3.5. Частотные характеристики: а) полосового фильтра мультиплексора ВОСП СРК для межканального интервала 100 ГГц; б) трансимпедансного усилителя

Машинное вычисление по данному выражению при высоких значениях  $Q$  является затруднительным, поэтому в работе в качестве показателя качества используется сам  $Q$ -фактор. Последний рассчитывался согласно стандартному выражению

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (3.24)$$

с использованием следующих параметров выходного сигнала :

- математического ожидания  $\mu_1$  и  $\mu_0$  отсчетов, соответствующих символам 1 и 0;
- среднеквадратического отклонения  $\sigma_1$  и  $\sigma_0$  вышеуказанных отсчетов.

Выражение (3.17), которое учитывает нелинейность ОВ, показывает влияние мощности вводимого в него оптического сигнала на фазу выходного сигнала. График на рис.3.6, на котором наблюдается зависимость  $Q$ -фактора от пиковой мощности сигнала передатчика, подтверждает данное предположение. Он позволяет сделать вывод о существовании оптимального значения входной мощности, которое максимизирует  $Q$ .

При малой мощности сигнала передатчика отношение сигнал/шум на входе фотодетектора невелико. Это объясняется малой защищенностью сигнала от шумов спонтанного излучения усилителей. Существенного изменения фазы принимаемого сигнала в этом случае не происходит. При повышении уровня входного сигнала, защищенность от шумов усилителей повышается, однако одновременно увеличивается и фазовый сдвиг в выражении (3.17). В результате расширения спектра линейного сигнала и последующего его ограничения в канальном фильтре демультиплексора возникает межсимвольная интерференция сигнала на входе фотодиода. Это и приводит к уменьшению  $Q$ -фактора для входных сигналов с большой мощностью. Увеличение количества оптических секций приводит к накоплению фазового сдвига принимаемого сигнала и уменьшению  $Q$ . Приведенные графики показывают целесообразность использования уровней входного сигнала порядка 3...6 дБ для оптических трасс длиной 50...500 км. Это обеспечивает намного меньшую вероятность ошибки по сравнению с допустимыми для ВОСП значениями  $10^{-12}$ ... $10^{-15}$ .

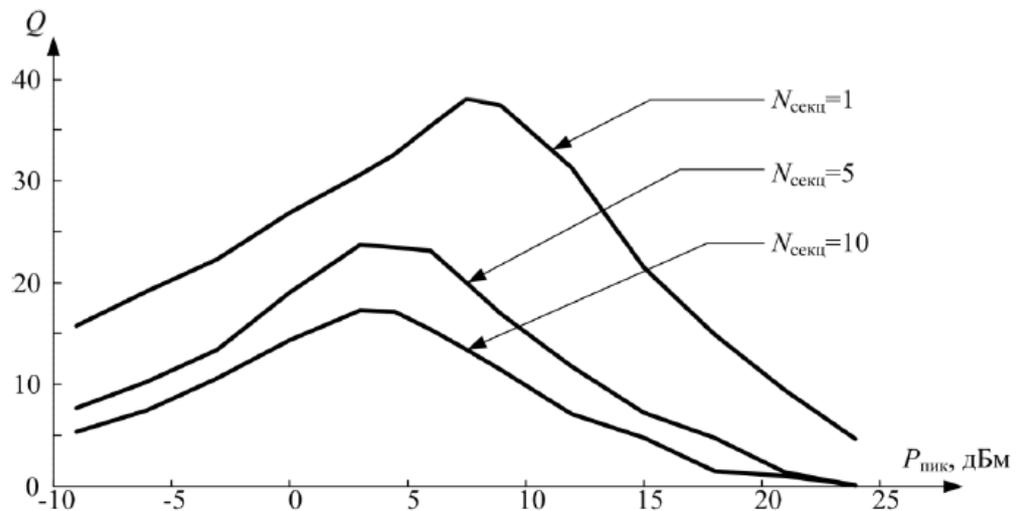


Рис. 3.6. Зависимость  $Q$ -фактора от мощности сигнала передатчика ( $er=10$  дБ;  $K_1=0,2$ ;  $K_2=0,2$ ;  $t_{\text{фр}}=35$  пс;  $N_{\text{симб}}=1000$ )

В заключении следует отметить, что поставленная в параграфе задача оценки влияния фазовой самомодуляции оптического сигнала на параметры качества оптического канала ВОСП СРК выполнена. Имитационное моделирование показало, что зависимость  $Q$ -фактора от мощности вводимого в оптическое волокно сигнала имеет экстремум в виде максимума. Для оптической трассы длиной 50...500 км оптимальным является уровень входного сигнала порядка 3...6 дБм. Построенная в среде MatLab имитационная модель учитывает линейные и нелинейные искажения оптического волокна, а также шумы спонтанного излучения оптического усилителя. Ее можно использовать для оценки параметров ВОСП СРК на этапе их проектирования.

### **3.3. Исследование влияния фазовой самомодуляции и рамановского усиления оптического сигнала на качество каналов ВОСП СРК**

Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) со спектральным разделением каналов (СРК) являются основной транспортной технологией сетей следующего поколения. Широкому распространению данной технологии на транспортных сетях операторов связи в середине 90-х годов прошлого столетия способствовало появление эрбиевых оптических усилителей. В последние несколько лет также начали применяться рамановские усилители, которые позволяют значительно повысить качество передачи оптического сигнала и увеличить длину оптической секции [48]. При этом также возрастают и нелинейные искажения передаваемого оптического сигнала (в частности, фазовая самомодуляция) [42]. Поэтому проблема возрастания фазовой самомодуляции при использовании рамановских усилителей является актуальной.

Решение поставленной задачи выполнялось путем имитационного моделирования одного канала ВОСП СРК в среде MatLab. Функциональная

схема модели (рис.3.7) содержит каналный оптический передатчик и приемник, а также  $N_{секц}$  одинаковых оптических секций. Каждая секция включает компенсатор дисперсии (КД), эрбиевый волоконно-оптический усилитель и предшествующий им распределенный рамановский усилитель.

Последний включает среду распространения (оптическое волокно) длиной  $L_{ов}$ , два оптических разветвителя, а также два лазера накачки (ЛН) с мощностями сигналов  $P_{н1}$  и  $P_{н2}$ . Реализация оптического передатчика и приемника детально описана в пункте 3.2, поэтому ниже рассмотрена только реализация функциональных блоков оптической секции.

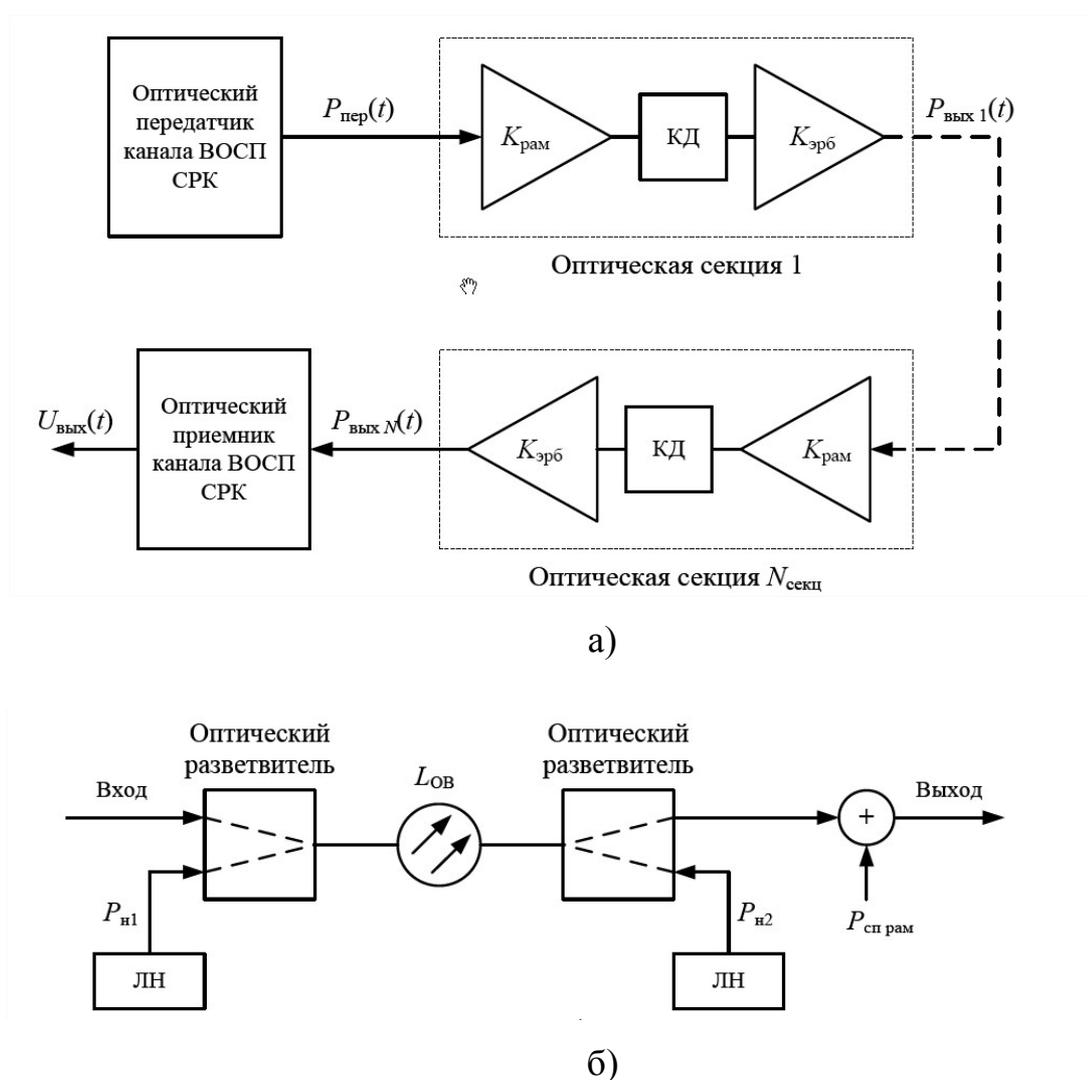


Рис3.7. Модель канала ВОСП СРК:

а) общая функциональная схема модели; б) функциональная схема рамановского усилителя

Основой модели среды распространения является известное уравнение Шредингера [42]. Его решение, которое позволяет рассчитать мощность выходного сигнала с учетом эффектов рамановского рассеяния и затухания имеет вид [49]:

$$g_r \int_{z_1}^{z_2} (P_{H1} e^{-\alpha_n z} + P_{H2} e^{-\alpha_n (L_{opt} - z)}) dz - \alpha_c (z_2 - z_1) \quad , (3.25)$$

где  $P(z_1)$  и  $P(z_2)$  соответственно мощность оптического сигнала на расстоянии  $z_1$  и  $z_2$  от точки ввода в волокно ( $0 \leq z_1 < z_2 \leq L_{opt}$ );

- $g_r$  - коэффициент рамановского усиления волокна;
- $\alpha_n$  и  $\alpha_c$  - затухание волокна на длине волны накачки и оптического сигнала соответственно.

Разделив обе части уравнения (3.25) на  $P(z_1)$ , получаем выражение для расчета коэффициента усиления рамановского усилителя:

$$. (3.26)$$

Имитационное моделирование оптического волокна выполнялось Фурье-методом расщепления по физическим факторам [42]. Соответствующие выражения пункта 3.2 после дополнения рамановским коэффициентом усиления волокна принимают следующий вид [49]:

$$, (3.27)$$

$$A\left(z + \frac{1}{2}\Delta z, t\right) = A\left(z + \frac{1}{2}\Delta z, t\right) e^{f\gamma|A(z+\frac{1}{2}\Delta z,t)|^2 \Delta z}, \quad (3.28)$$

$$, \quad (3.29)$$

где  $A(z,t)$  и  $A(z+\Delta z,t)$  напряженность электрического поля оптического сигнала на входе и выходе условного отрезка волокна;

- $\gamma$ - коэффициент нелинейности ОВ;
- $(fft)$  и  $(ifft)$  соответственно операторы прямого и обратного преобразования Фурье.

Мощность усиленного спонтанного излучения на выходе рамановского усилителя рассчитывалась по формуле [50]:

$$P_{\text{сп рам}} = K_{\text{рам}}(0, L_{\text{ОВ}}) |A(z=0)|^2 (L_{\text{ОВ}}) \frac{\eta_T \nu_c B_0 g_r P_{\text{н}}(z)}{(G_{\text{рам}}(0, z))} dz, \quad (3.30)$$

где  $\eta_T$  тепловое возбуждение;

- $h$  - постоянная Планка;
- $\nu_c$  - частота оптического сигнала;
- $B_0$  - полоса пропускания полосового фильтра демультиплексора;
- $P_{\text{н}}(z)$  - суммарная мощность излучения лазеров накачки на расстоянии  $z$  от точки ввода информационного сигнала в ОВ.

Вследствие идентичности всех оптических секций необходимо обеспечивать равенство мощностей на входе и выходе оптических секций. Этого можно добиться путем выполнения условия  $K_{\text{рам}}(0, L_{\text{ОВ}}) K_{\text{эрб}} = 1$ . В данной статье исследуется влияние величины рамановского усиления на нелинейные искажения оптического сигнала, поэтому по заданной величине усиления эрбиевого усилителя  $K_{\text{эрб}}$  определялась необходимая величина рамановского усиления:

(3.31)

Коэффициент усиления  $K_{рам}(z_1, z_2)$  в (3.26) зависит от мощности лазеров накачки, поэтому необходимо получить выражение для расчета  $P_{н1}$  и  $P_{н2}$ . Для этого проинтегрируем (3.26) ( $z_1=0$  и  $z_2=L_{ов}$ ):

(3.32)

Из данного выражения получаем формулу для расчета необходимой суммы мощностей лазеров накачки:

(3.33)

Известно [49], что ввод излучения лазера накачки попутно с информационным оптическим сигналом приводит к значительным нелинейным искажениям последнего. Поэтому во всех исследованиях данной статьи  $P_{н1}=0$ . Перед моделированием по заданной величине усиления

эрбиевого усилителя  $K_{эrb}$  рассчитывалась мощность лазера накачки  $P_{н2}$  согласно выражению (3.33). Параметры всех функциональных блоков модели приведены в таблице 3.2. Длины волн лазера накачки и информационного сигнала равны 1430 нм и 1550 нм соответственно. Модель компенсатора дисперсии аналогична модели ОВ, однако хроматическая дисперсия бралась с противоположным знаком (-6,525 пс/(нм·км)), а все остальные параметры (коэффициент затухания на всех длинах волн и коэффициент нелинейности) равны нулю.

Качество оптического канала оценивалось величиной  $Q$ -фактора приемного сигнала, который вычислялся по методике, описанной в пункте 3.2. Зависимость качества канала от усиления эрбиевого усилителя и пиковой мощности сигнала передатчика  $P_{пик}$  показана на рис. 3.8. Данный рисунок показывает, что увеличение мощности оптического сигнала приводит к монотонному уменьшению  $Q$ -фактора в случае использования волокна с аномальной дисперсией. В случае использования волокна с нормальной дисперсией наблюдается экстремум  $Q$ -фактора при уровне мощности сигнала порядка 5 дБм.

Такой характер зависимостей можно объяснить тем, что в данной модели ВОСП на  $Q$ -фактор оказывают влияние дисперсия и нелинейные искажения волокна. Эксперименты показали, что усиленное спонтанное излучение рамановского и эрбиевого усилителей на фоне межсимвольной интерференции (МСИ) трансимпедансного усилителя не оказывают влияния на качество оптического канала. Пояснить сложившуюся ситуацию можно при помощи рис. 3.9, на котором изображена форма сигнала на выходе оптического фильтра при наличии и отсутствии нелинейных искажений.

Таблица 3.2

Параметры модели ВОСП СРК

Функциональный блок	Параметр	Значение
Передатчик	скорость передачи	10 Гбит/с

	информационного сигнала В	
	число передаваемых информационных символов	100
	длительность фронта оптического импульса (изменение мощности от 20% до 80% пикового значения)	35 пс
	коэффициент гашения лазера	10 дБ
	длина волны излучения	1550 нм
Оптическое волокно	Длина $L_{ов}$	100 км
	число элементарных отрезков при использовании Фурье-метода расщепления по физическим факторам	100
	коэффициент затухания на длине волны 1430 нм	0,287 дБ/км
	коэффициент затухания на длине волны 1550 нм	0,207 дБм/км
	хроматическая дисперсии на длине волны 1550 нм	6,525 пс/(нм км)
	эффективная площадь	55 мкм <sup>2</sup>
	коэффициент нелинейности	1,98 1/(Вт км)
	Эрбиевый усилитель	шум-фактор
Оптический приемник	полоса пропускания полосового оптического фильтра	66 ГГц
	токовая чувствительность фотоприемника	0,8 А/Вт
	тип трансимпедансного усилителя	ADN2820

В волокне с аномальной дисперсией наблюдается увеличение длительности импульса, а в волокне с нормальной дисперсией уменьшение длительности. Уменьшение длительности фронтов импульсов приводит к уменьшению межсимвольной интерференции, что и повышает  $Q$ -фактор в последнем случае.

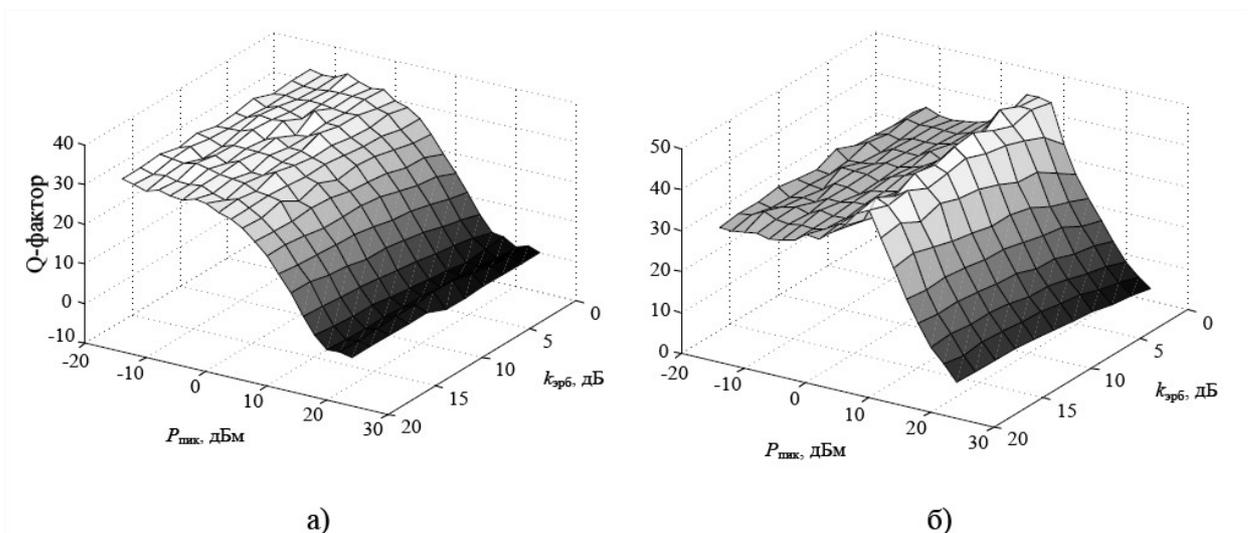


Рис 3.8. Q-фактор оптического сигнала: а) при аномальной дисперсии ( $\beta_2 = -8,31 \text{ пс}^2/\text{км}$ ); б) при нормальной дисперсии ( $\beta_2 = 8,31 \text{ пс}^2/\text{км}$ )

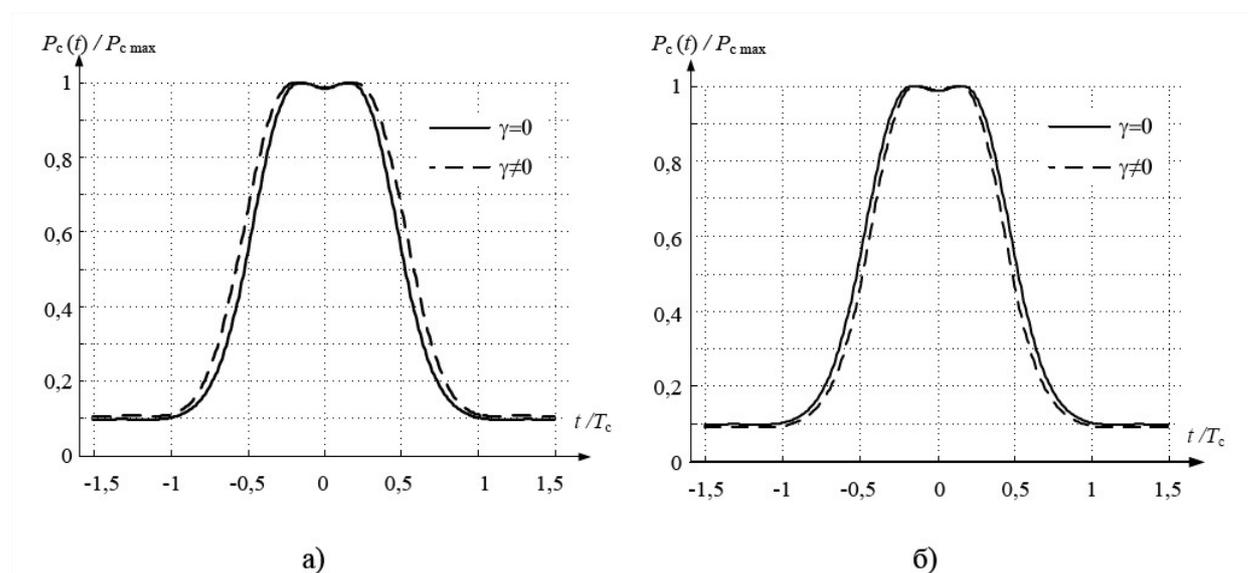


Рис 3.9. Форма сигнала на выходе оптического фильтра при  $P_{\text{пик}} = 10$  дБм: а) при аномальной дисперсии ( $\beta_2 = -8,31 \text{ пс}^2/\text{км}$ ); б) при нормальной дисперсии ( $\beta_2 = 8,31 \text{ пс}^2/\text{км}$ )

В заключение следует отметить, что поставленная в задаче оценки влияния рамановского усиления и фазовой самомодуляции оптического сигнала на параметры качества оптических каналов ВОСП СРК выполнена. Моделирование в среде MatLab показало, что введение в волокно рамановского усиления не приводит к существенному изменению  $Q$ -фактора оптического сигнала. Также было установлено, что в волокнах с нормальной дисперсией наблюдается небольшой экстремум  $Q$ -фактора при уровне

мощности сигнала 5 дБм. В волокнах с аномальной дисперсией указанного экстремума не наблюдается.

### **Выводы по главе III:**

1. Имитационное моделирование показало, что зависимость  $Q$ -фактора от мощности вводимого в оптическое волокно сигнала имеет экстремум в виде максимума. Для оптической трассы длиной 50...500 км оптимальным является уровень входного сигнала порядка 3...6 дБм.

2. Имитационное моделирование показало, что введение в волокно рамановского усиления не приводит к существенному изменению  $Q$ -фактора оптического сигнала.

3. Было установлено, что в волокнах с нормальной дисперсией наблюдается небольшой экстремум  $Q$ -фактора при уровне мощности сигнала 5 дБм. В волокнах с аномальной дисперсией указанного экстремума не наблюдается.

4. Построенная в среде MatLab имитационная модель учитывает линейные и нелинейные искажения оптического волокна, а также шумы спонтанного излучения оптического усилителя. Ее можно использовать для оценки параметров ВОСП СРК на этапе их проектирования.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Исходя из вышеизложенного, можно отметить следующие основные результаты.

1. Практическое использование технологии DWDM постоянно расширяется в связи с быстрым развитием сетей связи всех уровней, в

ближайшем будущем данная тенденция сохранится. Оборудование DWDM применяется как для создания новых волоконно-оптических сетей, так и для модернизации и расширения существующих сетей в целях существенного повышения их пропускной способности и доступности.

2. Характеристики оптической среды передачи сигналов оказывают существенное влияние на качество передачи информации по оптическим каналам телекоммуникационных систем DWDM. Особое внимание необходимо уделить проявлению нелинейных эффектов в оптическом волокне. При анализе технологии DWDM следует учитывать следующие явления: нелинейное преломление, вынужденное рассеяние света и четырехволновое смешение.

3. Имитационное моделирование показало, что зависимость Q-фактора от мощности вводимого в оптическое волокно сигнала имеет экстремум в виде максимума.

Для оптической трассы длиной 50...500 км оптимальным является уровень входного сигнала порядка 3...6 дБм. Это обеспечивает намного меньшую вероятность ошибки по сравнению с допустимыми для ВОСП значениями  $10^{-12}$ ... $10^{-15}$ . Построенная в среде MatLab имитационная модель учитывает линейные и нелинейные искажения оптического волокна, а также шумы спонтанного излучения оптического усилителя. Ее можно использовать для оценки параметров ВОСП СРК на этапе их проектирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- I. Произведения Президента Республики Узбекистан Каримова И.А.

1. Каримов. И.А. Узбекистан на пороге XXI века: угрозы безопасности, условия и гарантии прогресса. – Т: "Узбекистон", 1997г. – 315 с.
2. Доклад Президента Республики Узбекистан Каримова И.А. на заседании кабинета министров, посвященном итогам социально-экономического развития страны в 2012 году и важнейшим приоритетным направлениям экономической программы на 2013 год от 18.01.2013.

## II. Основная литература

5. Рекомендация ITU-T G.692 Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers
8. Слепов Н.Н. Особенности современной технологии WDM. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2004, №6, с.68.
10. Hinderthur, L.Friedric. WDM hybrid transmission based on CWDM plus DWDM. – Lightwave Europe, July 2003, p.9–12.
11. Рекомендация ITU-T G.692. Optical interfaces for multi-channel systems with optical amplifiers (10.98, Corr. 1, 2 – 6.02).
12. Bautista J., Shine B. Untangling the wavelength Web: Separating DWDM Channels with Interleaves // Photonics Spectra. February 2001. P. 90-92.
13. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. 2-е испр. изд. - М.: Радио и связь, 2003.
14. Слепов Н.Н. Фотонно-кристаллическое волокно - уже реальность // Электроника: НТБ. 2004. № 5. С. 80-84.
15. Jun-Ichi-Kani et. al. Triple-wavelength-band WDM transmission technologies. - OFC-2002, Anaheim, Paper TuR5, p. 122-123
20. Borella A., Cancelleri G., Chiaraluce F. Wavelength Division Multiple Access Optical Networks. - Artech House. Boston-London. 1998.
21. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Syrus Systems, 1999.

24. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения – М: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999г. – 672с.
25. Рекомендация ИТУ-Т. М.2100. Нормы качественных показателей при вводе в эксплуатацию и техническом обслуживании международных трактов и соединений PDH многих операторов многих операторов.
26. Рекомендация ИТУ-Т G.821:2002. Помехозащищенность международного цифрового соединения, работающего на скорости меньше первичной, и являющегося частью цифровой сети с комплексными услугами.
28. Воронин В. Г., Наний О. Е. В75 Основы нелинейной волоконной оптики : учебное пособие / В. Г. Воронин, О. Е. Наний. — М. : Университетская книга, 2011. — 128 с. : табл., ил. ISBN 978-5-91304-212-5
29. G. Agraval “Nonlinear Fiber Optics”, Fourth Edition, London, Elsevier, 2007.
30. G. Charlet. “Progress in Optical Modulation Format for High-Bit Rate WDM Transmissions” IEEE J. of Selected Topics in QE, 2006, 12, p. 469.
31. Optical Fiber Telecommunications V, Edited by I.P. Kaminow, T.Li, A.E. Willner. Elsevier Inc, 2008.
34. H. Kim, A. H. Gnauck. “Experimental investigation of the performance limitation of DPSK systems due to nonlinear phase noise”, IEEE Photon. Technol. Lett., 2003, 15, p. 320.
36. Le Nguyen BINH. MATLAB Simulink Simulation Platform for Photonic Transmission Systems. I. J. Communications, Network and System Sciences, 2009, 2, 91-168
37. J. G. Proakis, “Digital communications,” 4th edition, New York: McGraw-Hill, 2001.
39. Tkach R.W. Four-photon mixing and high-speed WDM systems / R.W. Tkach, Chraplyvy A.R., F. Forghieri, A.H. Gnauck, R.M. Derosier // Journal of Lightwave Technology. – 1995. –Vol. 13, № 5. –P. 841 – 849.

40. Убайдуллаев Р.Р. Протяженные ВОЛС на основе EDFA / Р.Р. Убайдуллаев // LIGHTWAVE Russian edition. -2003. -№1. – С. 22-29.
41. Педяш В.В. Использование имитационного моделирования для определения длины участка регенерации ВОСП по дисперсии / В.В. Педяш, О.С. Решетникова // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2009. - № 2. – С. 73-78.
42. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика / Агравал Г.; пер. с англ. С.В. Черникова, И.Ю. Хрущева, Д.В. Коробкина. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
43. Shaw J.K. Mathematical Principles of Optical Fiber Communication / J.K. Shaw. - Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004. - 103 p.
46. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems / G.P. Agrawal. - New York: Wiley-Interscience, 2002. - 580 p.
49. Agrawal G. Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems / G. Agrawal G., C. Headley. Academic Press, 2004. 392 p.
50. Kaminow I.P. Optical Fiber Telecommunications IV-A: Components / Kaminow I.P., Li T. Academic Press, 2002. 876 p.

### III. Дополнительная литература

9. Рекомендация ITU-T G.694.2. Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid (6.02).
19. Н.Н.Слепов. Синхронные цифровые сети SDH. - М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 1998
32. Optical Fiber Telecommunications V, Edited by I.P. Kaminow, T.Li, A.E. Willner. Elsevier Inc, 2008.
33. A. H. Gnauck, P. J. Winzer. “Optical Phase-Shift-Keyed Transmission” J. Lightwave Technol. 2005, 23, p. 115.
35. О.Е. Наний, Е.Г.Павлова. “Фотонно-кристаллические волокна”, Lightwave RE, 2004, № 3, с. 47.

45. Ramachandran S. Fiber Based Dispersion Compensation / S. Ramachandran. – New York: Springer, 2007. – 558 p.

48. Mohammad N.I. Raman Amplifiers for Telecommunications 1: Physical Principles / N.I. Mohammad. Springer, 2003. -298 p.

#### IV. Периодические издания, сборники и отчеты

3. А.Кошелев, А.Фильчаков. Оптоволоконные сети и технология DWDM - Журнал КомпьютерПресс, 2001, № 1

6. White A., Hamaide J.-P. High-speed Optical Networks: Recent innovations and future challenges//Доклад на совместном семинаре МФТИ-Bell Labs, МФТИ, 25.05.2011.

7. А. Сергеев. И снова о WDM Connect! – Журнал «Мир Связи» выпуск 0.2004

16. А.Кошелев, А.Фильчаков. Оптоволоконные сети и технология DWDM - Журнал КомпьютерПресс, 2001, № 1

17. А. Сергеев. DWDM: по законам «больших скоростей». – Журнал Connect! Мир связи, 2004, №4

18. И.П.Павлов. Системы DWDM: особенности и применение. – Журнал Сети и системы связи, 2003, №4

22. Данилюк Д.Н. Расчёт и прогнозирование значения бер на участках сети технологии плотного волнового мультиплексирования. XXXVII ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 8 томах. М.: МАТИ, 2011. Т.4, 282 с.

23. Данилюк Д.Н. Прогноз для системы DWDM. – Журнал Мир Транспорта 02'11

27. Шаршаков А. WDM: успехи и проблемы. Журнал «СЕТИ» выпуск 04/99.

38. W. H. Tranter, K. S. Shanmugan, T. S. Rappaport, and K. L. Kosbar, "Principles of communication systems simulation with wireless applications," New Jersey: Prentice Hall, 2004.

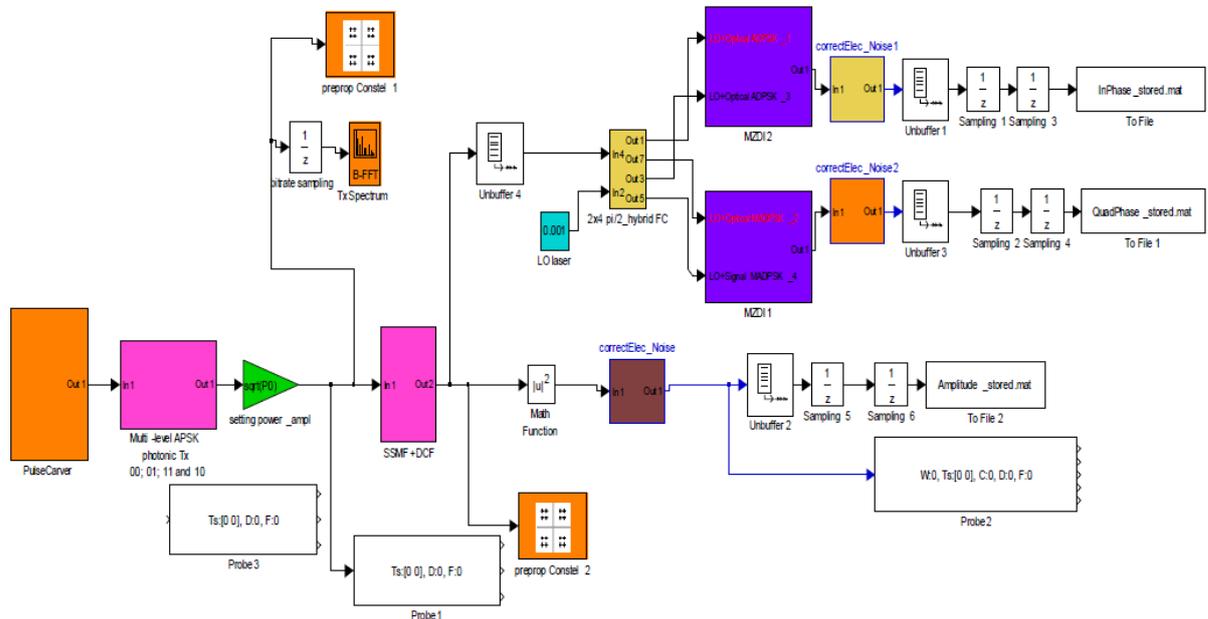
#### V. Интернет сайты

4. <http://rekc.webuda.com/index.php/communication/82-dwdm>

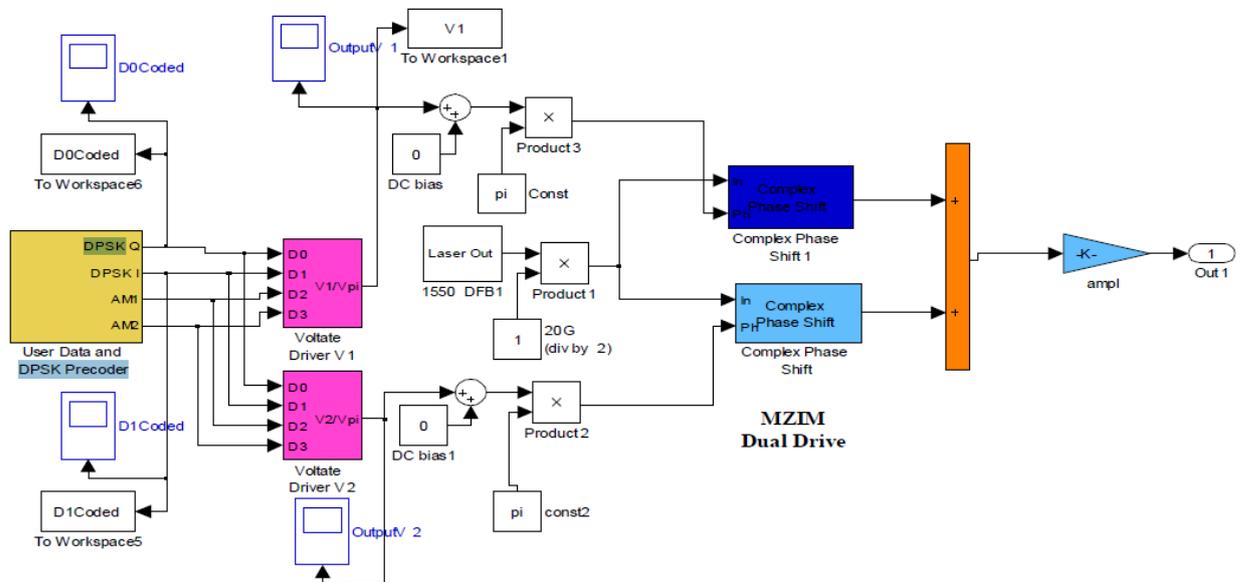
44. Characteristics of a single-mode optical fibre and cable:  
<http://www.icsconsult.ru/consult/storage/299/G.652-200506.pdf>.

48. 10.7 Gbps, 3.3 V, Low Noise, TIA with Average Power Monitor.  
[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADN2820.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADN2820.pdf).

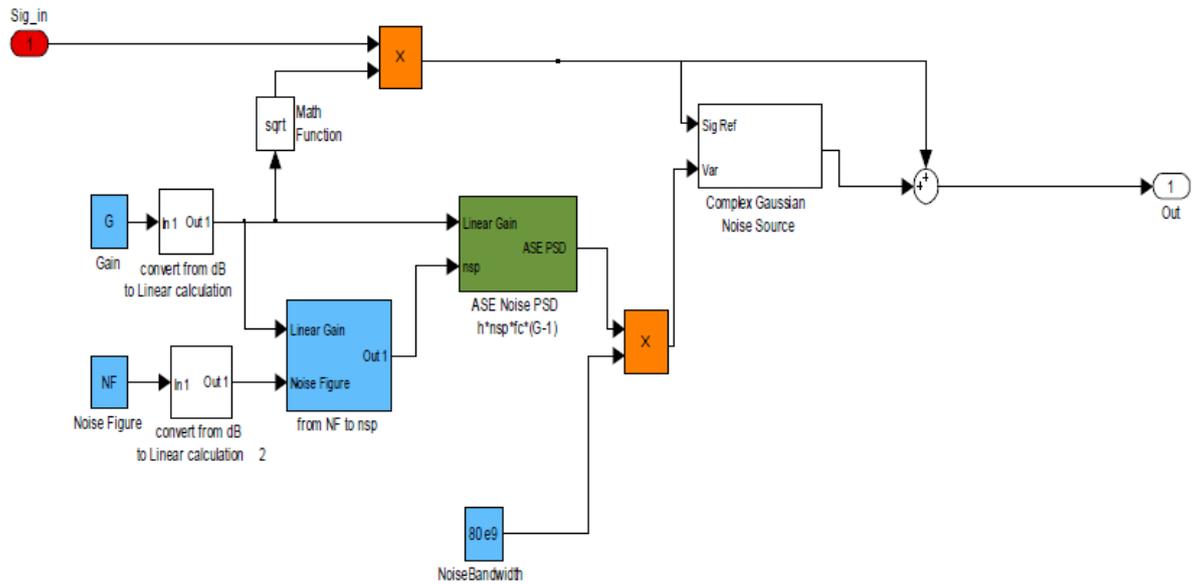
Matlab Simulink модель DWDM системы



Matlab Simulink модель оптического модулятора



## Matlab Simulink модель оптического усилителя



## Matlab Simulink модель оптического приемника

