

Федеральное агентство связи
Федеральное государственное образовательное бюджетное
учреждение высшего профессионального образования
«Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики»
(ФГОБУ ВПО «СибГУТИ»)

В.Г. Фокин
Р.З. Ибрагимов

Оптические системы с терабитными и петабитными скоростями передачи

Учебное пособие

Новосибирск 2015

УДК [621.391.63:681.7.068]

Утверждено редакционно-издательским советом ФГОБУ ВПО «СибГУТИ»
в качестве учебного пособия

*Рецензенты: Ю.А. Пальчун, д-р тех. наук, проф.
В.А. Шиянов, канд. тех. наук*

В.Г. Фокин, Ибрагимов Р.З. Оптические системы с терабитными и петабитными скоростями передачи: Учебное пособие/ Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики; каф. многоканальной электросвязи и оптических систем. Новосибирск, 2015г. - 161 с.: ил.

Учебное пособие предназначено для студентов направления подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи квалификации «Магистр» по профилям «Многоканальные телекоммуникационные системы» и «Оптические системы и сети связи». Также может быть полезным для специалистов предприятий связи, повышающим свою квалификацию по перспективному направлению развития техники оптической связи.

Оцениваются возможности и ограничения современных волоконно-оптических систем передачи по наращиванию скорости и дистанций при использовании DWDM, оптического усиления и форматов представления оптических сигналов.

Рассматриваются принципы построения волоконно-оптических систем передачи нового поколения с применением многосердцевинных MCF одномодовых и маломодовых FMF волоконных световодов, технологий многоуровневых форматов модуляции PDMmQAM, суперканалов OFDM с терабитными, петабитными скоростями и поддержкой flex grid superchannel, когерентными оптическими приёмниками. Приводятся характеристики перспективной элементной базы для построения оптических систем и сетей и примеры реализации, программные продукты для моделирования и методика расчётов суперканалов.

© Фокин В.Г., Ибрагимов Р.З., 2015

© Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики, 2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Введение.....	7
1 Возможности и ограничения в современных системах оптической связи.....	10
1.1 Информационные сигналы и волоконно-оптическая среда для их передачи.....	10
1.2 Оптические передатчики, приёмники и усилители.....	24
1.3 Оптические мультиплексоры выделения/ввода и коммутаторы в оптической сети.....	37
1.4 Форматы кодирования, оптическое отношение сигнал/шум и предел Шеннона для оптических систем передачи.....	39
1.5 Выводы.....	44
Контрольные вопросы.....	45
2 Способы повышения эффективности оптических систем передачи.....	47
2.1 Использование компенсаторов дисперсии и оптических усилителей	47
2.2 Использование когерентного приёма и цифровой обработки сигнала	53
2.3 Использование многоуровневых форматов модуляции, поляризационного мультиплексирования и суперканалов.....	56
2.4 Выводы.....	61
Контрольные вопросы.....	62
3 Характеристики волоконных световодов с множеством сердцевин.....	64
3.1 Типы и конструкции многосерцевинных волоконных световодов...	67
3.2 Характеристики многосерцевинных волоконных световодов.....	71
3.3 Компоненты для линий с многосерцевинными волоконными световодами.....	75
3.4 Выводы.....	78
Контрольные вопросы.....	80
4 Системы с модовым разделением оптических каналов.....	81
4.1 Волоконные световоды для систем с модовым мультиплексированием.....	83
4.2 Схемы ввода / вывода и усиления мод.....	84
4.3 Принципы построения систем передачи FMF.....	89
4.4 Выводы.....	90
Контрольные вопросы.....	90
5 Форматы многоуровневой оптической модуляции и способы	

реализации суперканалов.....	92
5.1 Простые форматы модуляции.....	92
5.2 Фазовые форматы модуляции.....	93
5.3 Квадратурно-амплитудные форматы модуляции.....	95
5.4 Форматы оптических суперканалов и способы их реализации.....	96
5.5 Методика расчета энергетических параметров суперканалов.....	100
5.6 Выводы.....	102
Контрольные вопросы.....	103
 6 Современная и перспективная компонентная база оптических систем.....	 104
6.1 Электронные компоненты передатчиков, приёмников, коммутаторов, кодеров и декодеров для оптических каналов.....	104
6.2 Оптические компоненты передатчиков, приёмников, усилителей, коммутаторов.....	106
6.3 Выводы.....	121
Контрольные вопросы.....	122
 7 Достигнутые результаты в построении терабитных и петабитных систем передачи	 123
7.1 Стандартные решения для коммерческих сетей связи.....	123
7.2 Экспериментальные и планируемые системы.....	125
7.3 Планирование и проектирование гибко управляемых оптических транспортных систем и сетей с DWDM.....	130
7.4 Выводы.....	134
Контрольные вопросы.....	134
 8 Моделирование сложных оптических систем.....	 135
8.1 Среда моделирования OptiSystem.....	136
8.2 Среда моделирования OptSim.....	139
8.3 Алгоритмы упреждения ошибок.....	140
8.4 Выводы.....	144
 Заключение.....	 145
 Приложения.....	 146
 Список сокращений.....	 149
 Список литературы.....	 153

ПРЕДИСЛОВИЕ

Постоянный рост потребляемых информационных услуг требует всё больших коммуникационных возможностей от телекоммуникационных сетей, которые связывают центры обработки данных (ЦОД) с пользователями. При этом и коммуникационная инфраструктура ЦОД должна справляться с растущими объемами передаваемых данных. Также требуется учитывать то, что все более критическое значение приобретает время реакции на запросы по оказанию услуг. Последний параметр зависит от ряда факторов: от пропускной способности внутрисистемных каналов связи ЦОД; от пропускной способности каналов связи транспортных магистральных, городских и местных сетей и также сетей доступа.

В большинстве транспортных сетей и в сетях ЦОД среднего и крупного масштаба базой телекоммуникаций являются линии 10 G Ethernet и оптические каналы технологии OTN-OTN. Оборудование этого класса широко используется с середины минувшего десятилетия и 10-гигабитная техника фактически подошла к пределу своих возможностей. Для решения проблемы ограниченной пропускной способности были предприняты первые шаги по стандартизации интерфейсов 40/100 Гбит/с Ethernet (стандарт IEEE 802.3ba) в 2010 году с перспективой наращивания скорости до 1 Тбит/с. С 2012 года началось широкомасштабное внедрение оптических систем передачи в транспортные сети на скорости до 120 Гбит/с стандарта G.709/2012 Международного Союза Электросвязи, сектора стандартизации телекоммуникаций (МСЭ-Т). При этом продолжается работа над стандартами передачи для скоростей 240 Гбит/с, 480 Гбит/с, 1 Тбит/с. В экспериментальных системах передачи в 2012 году достигнута скорость 1 Пбит/с передачи информационных потоков в одном волоконном световоде. Такая скорость, по прогнозам академика РАН Е.М. Дианова [1], будет востребована уже в ближайшее десятилетие.

Таким образом, существует реальная перспектива кардинальных изменений в сфере оптических телекоммуникаций различного масштаба, что потребует подготовку новых специалистов для отрасли связи, т.е. проектировщиков, строителей, эксплуатационного персонала. Для этого необходима корректировка учебных программ для студентов и повышения квалификации работающих специалистов. Учитывая высокие темпы совершенствования техники и полное отсутствие подходящего учебного материала становится актуальной разработка учебного пособия, в котором должны быть отражены все современные тренды развития техники оптической связи с учётом подготовки бакалавров и магистров, обучающихся по направлению 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», профилей: «Многоканальные телекоммуникационные системы» и «Оптические системы и сети связи». Учебное пособие также будет полезно специалистам предприятий связи, занимающимся внедрением новых технологий и оборудования оптических сетей связи.

Предлагаемое учебное пособие составлено на основе информационных и методических материалов из различных научных-технических и специальных изданий, конференций, стандартов ITU-T (International Telecommunications Union – Telecommunications services sector) и IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), электронных ресурсов ведущих производителей оборудования оптических сетей и т.д. В работе над учебным пособием принял участие инженер Ибрагимов Р.З., подготовивший раздел 5.4 и главу 8.

ВВЕДЕНИЕ

Основные тенденции развития современных оптических сетей связи определены по направлениям с общим обозначением в научно-технической литературе «*М-технологии*» (или M-technologies).

До определённого времени (до 2010 года) известны этапы развития (или первый тренд): волоконная оптика FO (Fibre Optic) + оптическое усиление ОА (Optical Amplification) + мультиплексирование с разделением волн оптического диапазона WDM (Wavelength Division Multiplex).

Основные тренды (от англ. *trend* — *тенденция*) настоящего времени (после 2010 года, когда стали стандартами 40/100 Гбит/с цифровые потоки транспорта с оптической транспортной иерархией Ethernet/OTN, Optical Transport Hierarchy), представлены ниже и на рис.В.1:

1 – гибко управляемая когерентная передача цифровых потоков на скоростях от 100 Гбит/с до 1 Тбит/с и выше за счёт многоуровневой оптической модуляции (*Multilevel Modulation*) с квадратурными и фазовыми форматами от DPSK (Differential Phase Shift Keying) до 256 QAM (Quadrature-Amplitude-Modulation) на одной волне с двумя поляризационными составляющими и использования OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением) для реализации терабитных суперканалов на нескольких оптических поднесущих (тера – 10^{12}); цифровой когерентный приём [2];

2 – внедрение многосерцевинных оптических волоконных световодов *MCF (Multicore Fiber)* с числом от 2-х до 7, 19 и т.д., имеющих минимальные потери оптической мощности (в пределах 0,14 - 0,19 дБ/км), минимальную хроматическую (в пределах 4 - 10 пс/нм×км) и поляризационную (менее 0,05 пс/км^{0,5}) дисперсию в известном диапазоне волн 1490 – 1625 нм, высокий порог оптической мощности перегрузки (100 – 200 мВт), порождающей нелинейные оптические эффекты; волокна позволяют реализовать пространственно-разделённое мультиплексирование SDM (Space Division Multiplexing);

3 – пространственное мультиплексирование/демультиплексирование множества мод в одном волоконном световоде, управление множеством мод с множественным вводом и выводом *MIMO (Multiple Input and Multiple Output)*, решение, направленное на увеличение пропускной способности коротких и протяженных оптических линий в ЦОД и на межузловых линиях.

Эти тренды, называемые в научной литературе 3М (*Multilevel Modulation, Multicore Fiber, Multiple Input and Multiple Output*), подкрепляемые рядом экспериментов [3], позволяют предположить возможность по реализации уже к 2020 году систем на скорости до Петабит/с на волокно (пета – 10^{15}) как для связи между компонентами ЦОД, так и на оптических транспортных сетях (см. приложение 1), а в дальнейшем до 2030 года достигнуть скоростей Эксабит/с (экса - 10^{18}).

Однако на 3М трендах развитие телекоммуникаций не останавливается, а позволяет уверенно переходить к ряду других решений в рамках M-technologies, например, мультисервис, мультипротокол, мультизащита соединений за счёт множества альтернативных соединений и т.д.

Всё вместе позволит реализовать в ближайшее время новые виды сервисов телекоммуникаций с высокими скоростями передачи данных: связь для суперкомпьютеров с производительностью до 30 - 50 Петафлопс (от англ. FLOPS, flops, flop/s – Flouting Point Operations Per Second, величина для оценки производительности компьютеров, показывающая число операций с плавающей запятой в секунду, выполняемых вычислительной системой); прецизионная цифровая томография; телемедицина; видео высокой чёткости; 3D мультимедиа; информационные структуры банков, компаний, библиотек, учебных и научных заведений и т.д.; интеллектуальный транспорт и робототехника.

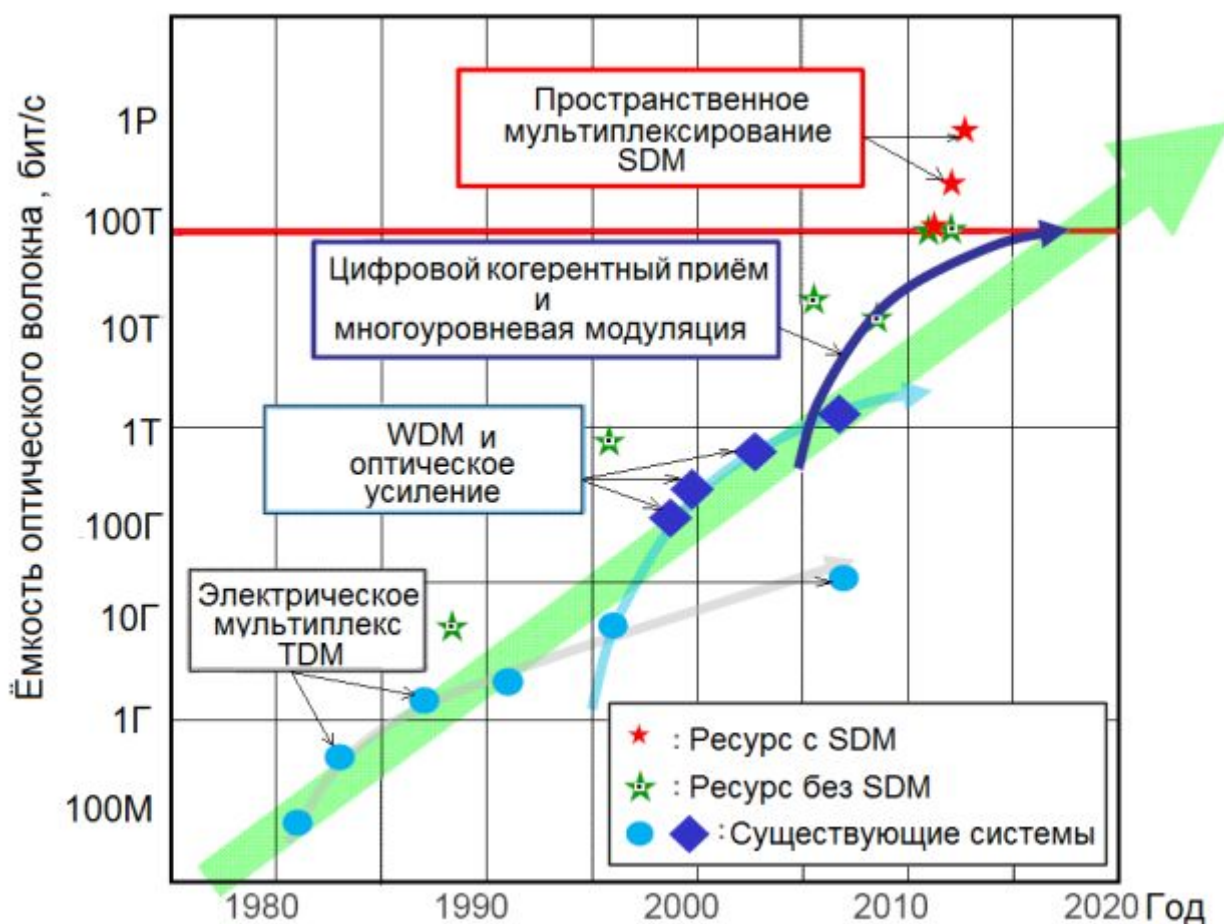


Рисунок В.1. Тренды в развитии оптических систем передачи [3]

Основное внимание в учебном пособии сосредоточено на реализациях новых оптических компонентов систем передачи и оптических сетей ближайшего времени (десятилетия). Для этого учебное пособие разделено на семь связанных между собой глав.

В первой главе рассматриваются системные проблемы ограничений существующих оптических систем.

Во второй главе представлены доступные способы расширения возможностей оптической передачи на существующих сетях связи и на основе новых компонентов.

В третьей главе достаточно подробно представлены конструкции, характеристики, способы согласования и варианты применения волоконных световодов типа MCF.

Четвёртая глава посвящена многоуровневым оптическим форматам модуляции оптического излучения.

В пятой главе представлены новые типы многомодовых волоконных световодов и рассмотрены возможности по пространственному межмодовому мультиплексированию.

В шестой главе сведены данные по новым оптическим компонентам, которые могут служить основой для построения терабитных и петабитных систем передачи.

В главе семь представлены примеры экспериментальной реализации нового класса оптических систем передачи с возможностями и проблемами. Также представлены варианты для оценочных расчётов систем передачи.

В главе восемь приводится краткий обзор возможностей современных систем программного моделирования оптических систем передачи, оптических сетей.

Каждая из глав учебного пособия заканчивается группой контрольных вопросов для самопроверки. Учебное пособие оснащено словарём терминов и сокращений на английском языке, используемых в главах. Также представлен полный список литературы, используемой для подготовки глав учебного пособия.

Учебное пособие рассчитано на подготовленных студентов и специалистов предприятий, знакомых с основами техники оптической связи, в том числе техники частотного (WDM) и временного (OTDM) оптического мультиплексирования, техники цифрового мультиплексирования (TDM) каналов и пакетов.

1. ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Весь ход развития оптических систем передачи последних 10 - 15 лет связан с тремя тенденциями: совершенствование характеристик существующих волокон для расширения полосы передачи, применения новых конструкций волокон, в том числе с пространственным и поляризационным мультиплексированием; плотного спектрального мультиплексирования для получения максимального числа спектральных и пространственных оптических каналов в существующих и новых волокнах; применении новых многопозиционных форматов модуляции, позволяющих в ограниченной полосе частот оптического канала наращивать скорости передачи информационных потоков.

В современных и в перспективных телекоммуникационных сетях на основе волоконных световодов и организуемых в их оптических каналах передача информационных потоков производится преимущественно в цифровом формате с двоичным импульсным представлением. Постоянный рост скорости передачи двоичных посылок ведёт к их сокращению по длительности, что требует расширения полосы частот передачи сигналов. Даже использование одномодовых волоконных световодов с полосой пропускания 30 ТГц не позволяет получить перспективные скорости выше 100 Тбит/с, учитывая, что уже реализованы в коммерческих системах передачи скорости более 10 Тбит/с на основе плотного мультиплексирования волн DWDM (0,8 нм; 0,4 нм; 0,2 нм между каналами) и спектральных суперканалов на основе OFDM (orthogonal frequency division multiplexing, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением) [4, 5], представляет интерес анализ возможностей существующих систем передачи и перспектив их дальнейшего развития по использованию стандартных и новых волокон, оптических трансиверов, коммутаторов, форматов кодирования оптических сигналов и т.д.

1.1. Информационные сигналы и волоконно-оптическая среда для их передачи

В оптических системах передачи для переноса информационных сигналов используются оптические частоты, излучаемые светодиодами и лазерами. Для детектирования оптических сигналов применяются полупроводниковые фотодетекторы. Самое простое и эффективное по различным показателям решение для передачи импульсных двоичных посылок связано с модуляцией интенсивности оптического излучения (обычно лазер непрерывного излучения CW, Continuous Wave) и его прямым детектированием на приёмной стороне. Двоичные информационные посылки позволяют сформировать излучение двух уровней интенсивности максимальной разности (включен и выключен источник излучения). Эти два уровня интенсивности преобразуются фотодетектором в две величины фототока (включен и выключен). При этом величина фототока в

состоянии «включено» многократно превосходит величину тока в цепи фотодетектора в состоянии «выключено». Для определения амплитудного значения импульсной посылки на приёме достаточно использовать простейшее пороговое устройство - компаратор (рис.1.1).

Форма представления информационных импульсных посылок может быть в одном из двух вариантов, в одной или двух полярностях (рис.1.2).

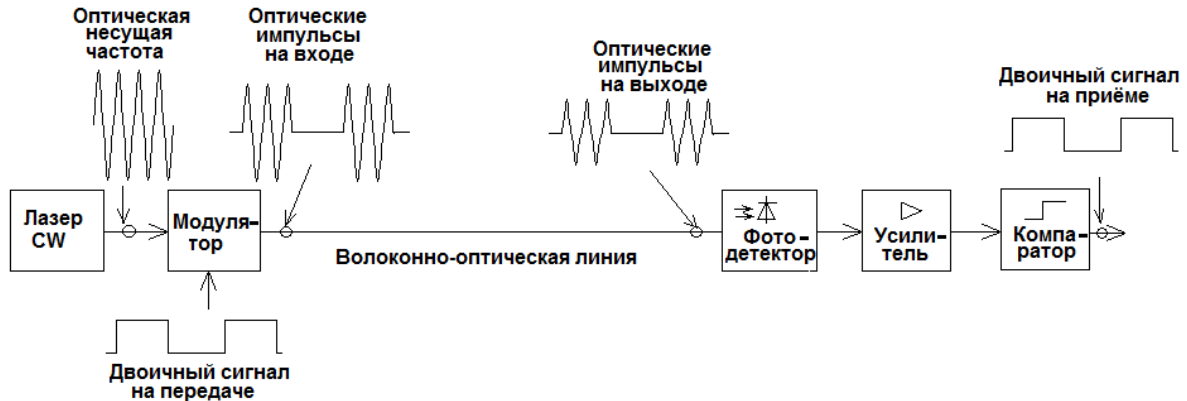


Рис. 1.1. Структурная схема передачи информационных импульсных сигналов в оптической системе

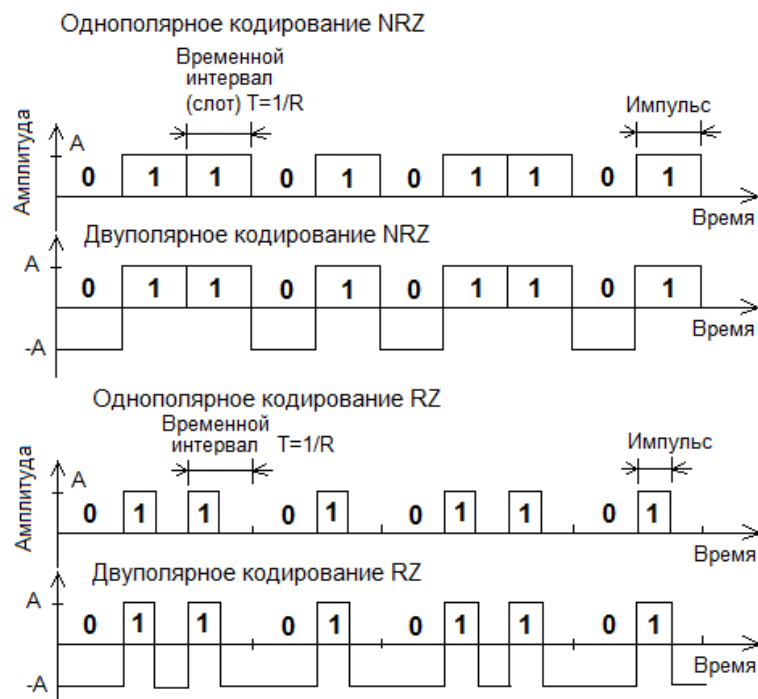


Рис. 1.2. Форматы кодирования информационных импульсных последовательностей в двоичном представлении

Форма представления рассматривается на тактовом интервале или интервале двоичной посылки, т.е. времени T , отведённом для передачи посылки. В двоичном представлении логическая единица «1» это высокий уровень одной из величин:

электрического напряжения, тока, мощности, интенсивности оптического излучения, а логический ноль «0», соответственно, низкого уровня указанных величин.

Импульсная посылка «1» на всём интервале T определила название формата – без возвращения к нулю на тактовом интервале, non return to zero, NRZ.

Импульсная посылка «1» на части интервала T также определила название формата – с возвращением к нулю на тактовом интервале, return to zero, RZ. При этом может быть указана часть тактового интервала присутствия «1» в процентах, например, RZ 50%, RZ 33%, RZ 69% и т.д. Чаще всего применяется формат RZ 50%.

Спектральные характеристики сигналов в этих форматах имеют существенные отличия по спектральной плотности мощности компонент (рис.1.3).

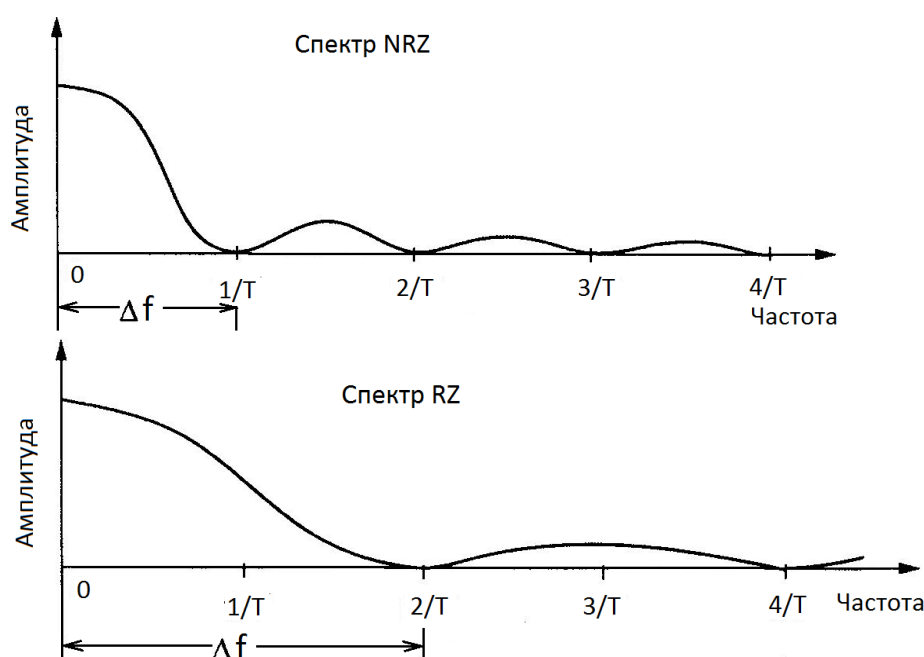


Рис. 1.3. Спектральная плотность мощности двоичных последовательностей в форматах RZ, NRZ

Спектральное распределение плотности мощности позволяет определить требуемый частотный диапазон для передачи импульсов с минимальными допустимыми искажениями, которые возможны в полосе частот, где сконцентрировано более 90% мощности сигнала. Для сигнала формата NRZ эта полоса составляет величину, оцениваемую соотношением для большого лепестка плотности мощности $\Delta f_{\text{NRZ}}=1/T$, для формата RZ 50% эта полоса составит $\Delta f_{\text{RZ}}=2/T$, т.е. спектр расширяется в два раза.

С модуляции информационным сигналом оптической несущей частоты начинается формирование оптического линейного сигнала, ширина спектра которого зависит от ширины спектра излучения источника (светодиода или лазера) и от спектра модулирующего сигнала. Учитывая, что максимальная эффективность использования полосы пропускания волокна достигается через плотное (DWDM)

мультиплексирование несущих волн, спектр излучения источников должен быть минимальным для уровня оценки -3 дБм (уровень половины мощности излучения) или -20 дБм от максимального значения мощности (рис.1.4). Принятые величины оценки $\Delta\lambda < 0,1$ нм или $\Delta f < 100$ МГц.

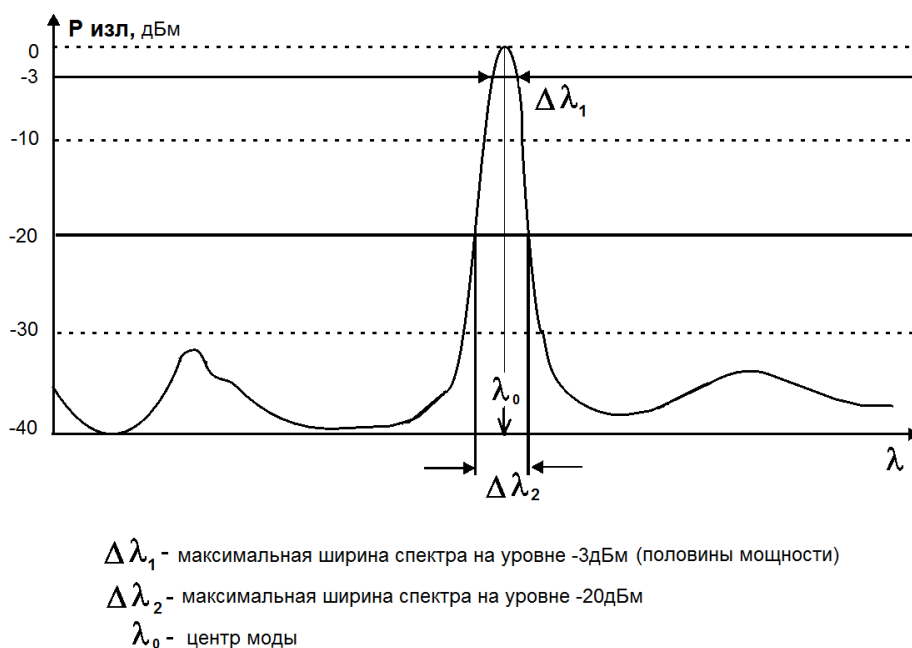


Рис. 1.4. Оценка ширины спектральной линии источника излучения

Достижимые скорости передачи информации двоичными посылками в современных технологиях, например, OTN/ОТН составляют: 2,7 Гбит/с; 10,7 Гбит/с; 43 Гбит/с; 112 Гбит/с. Нетрудно установить связь между скоростью передачи двоичного символа R и длительностью тактового интервала T , т.е. $T=1/R$ и тогда временные интервалы для указанного примера составят величины: $0,37 \times 10^{-9}$ с; $0,93 \times 10^{-10}$ с; $2,3 \times 10^{-11}$ с; $8,9 \times 10^{-12}$ с. Для передачи в волоконной линии этих коротких по времени импульсных посылок оптической мощности формата NRZ потребуются минимальные полосы частот Δf с несущей f_c (рис.1.5): 5,4 ГГц; 21,4 ГГц; 86 ГГц; 224 ГГц. В формате RZ эти частоты удваиваются: 10,8 ГГц; 44,8 ГГц; 172 ГГц; 448 ГГц.

Учитывая, что МСЭ-Т определил в стандартах деление полосы частот передачи волоконных световодов на диапазоны (табл.1.1, рис.1.6), нетрудно подсчитать реальную пропускную ёмкость современных волоконных одномодовых световодов с учётом стандартных сеток частот G.694.1, где частотные интервалы между оптическими несущими составляют: 12,5 ГГц; 25 ГГц; 50 ГГц; 100 ГГц.

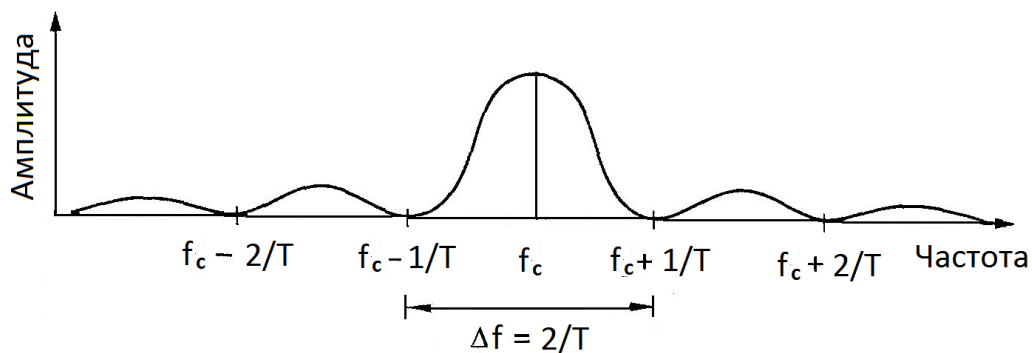


Рис. 1.5. Оптический спектр модулированного сигнала NRZ

Нетрудно заметить, что в стандартной сетке оптических частот предпочтительнее передавать сигналы в формате NRZ на скоростях до 43 Гбит/с. Для скорости 112 Гбит/с и формата NRZ требуется сетка частот с интервалом более 230 ГГц, которая гарантирует отсутствие взаимных помех между спектральными каналами.

Табл. 1.1. Диапазоны волн для одномодовых волоконных световодов

Обозначение МСЭ-Т	Диапазон волн, нм	Название
O	1260-1360	Основной
E	1360-1460	Расширенный
S	1460-1530	Коротковолновый
C	1530-1565	Стандартный
L	1565-1625	Длинноволновый
U	1625-1675	Сверхдлинноволновый

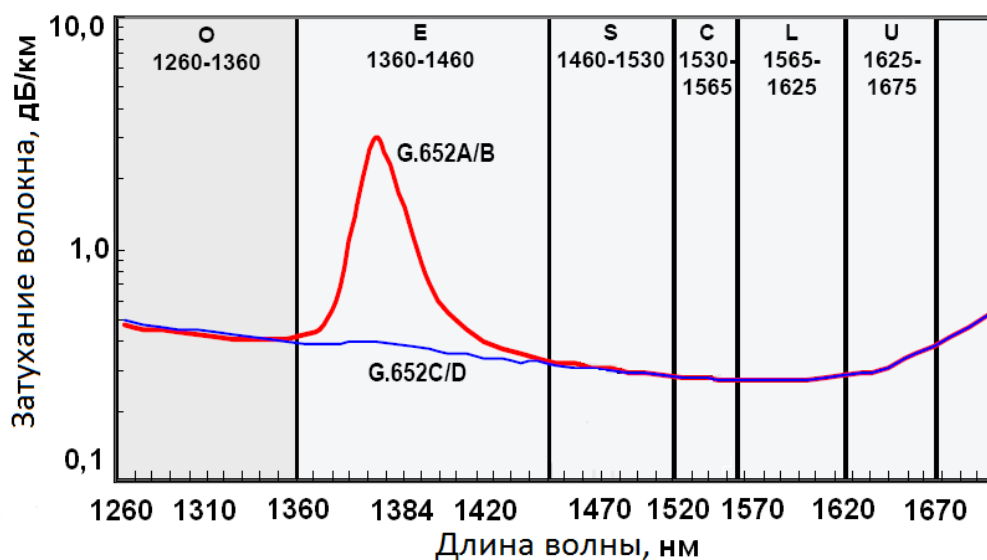


Рис. 1.6. Затухание оптического волокна стандарта ITU-T G.652 (a,b,c,d)

Оценка числа спектральных каналов в каждом из оптических волновых диапазонов приведена в табл.1.2. Она составлена на основе определения граничных оптических частот каждого диапазона через соотношения для длины волны и частоты: $f = C/\lambda$, где C скорость света в вакууме около 3×10^8 м/с, λ длина волны в м.

Полученные значения для полос частот диапазонов О, Е, S, С, L использованы для определения числа спектральных каналов в стандартных сетках частот и определения максимальной пропускной способности (ёмкости) для сигналов 112 Гбит/с в формате NRZ без учёта диапазона U, предназначенного только для мониторинга волокон. Предельная пропускная способность волокна одномодового типа G.652 (с, d) составляет около 26 Тбит/с для сигналов в формате NRZ. Нетрудно убедиться с помощью простых расчётов, что в формате RZ ёмкость для цифровой передачи сократиться почти в два раза.

Табл. 1.2. Ёмкость спектральных диапазонов одномодовых волокон для сигналов в формате NRZ

Диапазон	Полоса частот, ТГц	Число спектральных каналов в сетке волн					Ёмкость Тбит/с
		12,5ТГц	25ТГц	50ТГц	100ТГц	230ТГц	
О	17,42	1393	696	348	174	75	8,4
Е	15,0	1200	600	300	150	65	7,28
S	9,4	752	376	188	94	40	4,48
С	4,39	351	175	87	43	19	2,128
L	7,08	566	283	141	70	30	3,36
U	5,5	Диапазон служебного назначения					< 2,5

Реальным путём повышения эффективности использования полосы пропускания стандартных волокон, оцениваемой единицами бит/с/Гц, является переход к многоуровневым форматам модуляции оптической несущей частоты. В формате NRZ спектральная эффективность не превышает 0,5 бит/с/Гц, например, в широко используемой полосе С для протяженных линий передачи эффективность составит: $(2,128 \text{ Тбит/с}) / (4,39 \text{ ТГц}) \approx 0,48 \text{ бит/с/Гц}$. Кроме того, возможно использование диапазонов О, Е, S.

Вполне определённая полоса пропускания волоконного световода в области длин волн от 1260 нм до 1675 нм является наиболее востребованной при построении систем передачи благодаря наименьшим энергетическим потерям (от 0,15 дБ/км до 0,3 дБ/км), однако у волоконных световодов существует полоса волн, пригодная для передачи информационных сигналов (между 800 нм и 1260 нм), но существенно большими энергетическими потерями 0,5 - 3 дБ/км (рис.1.7). Такие потери вполне приемлемы для коротких линий (как правило, не превышающих по длине 10 км), однако в этом диапазоне нет волоконных световодов, поддерживающих одномодовый режим передачи, который не подвержен межмодовой дисперсии, ограничивающей полосу передачи информационных сигналов многомодовых волокон в диапазоне от 400 МГц/км до 1200 МГц/км.

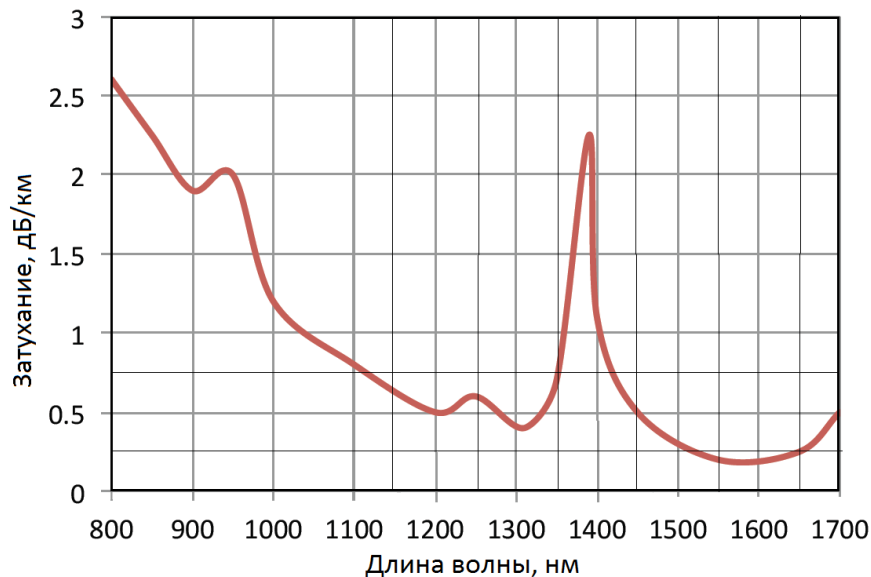


Рис. 1.7. Характеристика затухания стекловолокна

Для преодоления этой трудности могут быть предложены способы мультиплексирования отдельных мод в многомодовые световоды. При этом каждая из мод может модулироваться отдельным информационным сигналом.

Возможности современных одномодовых волоконных световодов имеют ограничения не только по полосе частот рабочих диапазонов. Эти ограничения имеют физическое объяснение и представлены двумя значимыми и связанными между собой факторами: дисперсией (от лат. *dispersio* — рассеяние) и нелинейными эффектами в волокнах и оптических компонентах.

Для одномодовых волокон за пределами длины волны отсечки, обозначаемой λ_c , (т.е. $\lambda_c < \lambda_i$, где i — номер спектрального канала), в сердцевине возбуждается от источника излучения один тип электромагнитных волн (или мода), распространяющихся на длинные участки. Ширина спектра моды зависит ширины спектра источника излучения и спектра модулирующего информационного сигнала. В пределах одной моды каждого из спектральных каналов формируется сигнал с шириной спектра от единиц до сотен ГГц. При распространении моды в стекловолокне наблюдается эффект различия скоростей спектральных компонент одной моды (рис.1.8), который в конечном результате ограничивает полосу частот для передачи информационных сигналов. При передаче импульсных сигналов это приводит к перекрытию во времени импульсов (или межсимвольной интерференции) и возрастанию вероятности ошибки приёма отдельных символов («0» вместо «1» и наоборот) (рис.1.9). Расширение приводит к снижению оптической мощности в центре импульса, что сказывается на принятии решения в приёмнике и также приводит к увеличению вероятности ошибки. Для практического учёта снижения мощности из-за дисперсии вводится показатель штрафа за изменение мощности. Этот штраф фиксируется в логарифмическом масштабе и оценивается величинами 1 - 2 дБ.

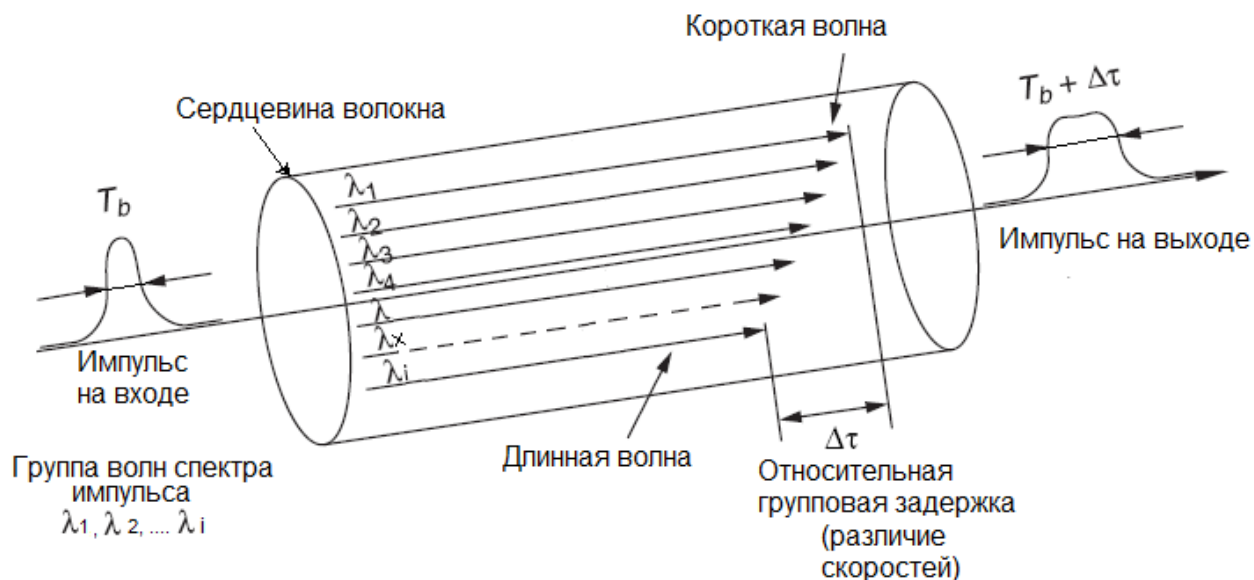


Рис. 1.8. Различие скоростей распространения спектральных компонент оптических импульсов в одномодовом волокне

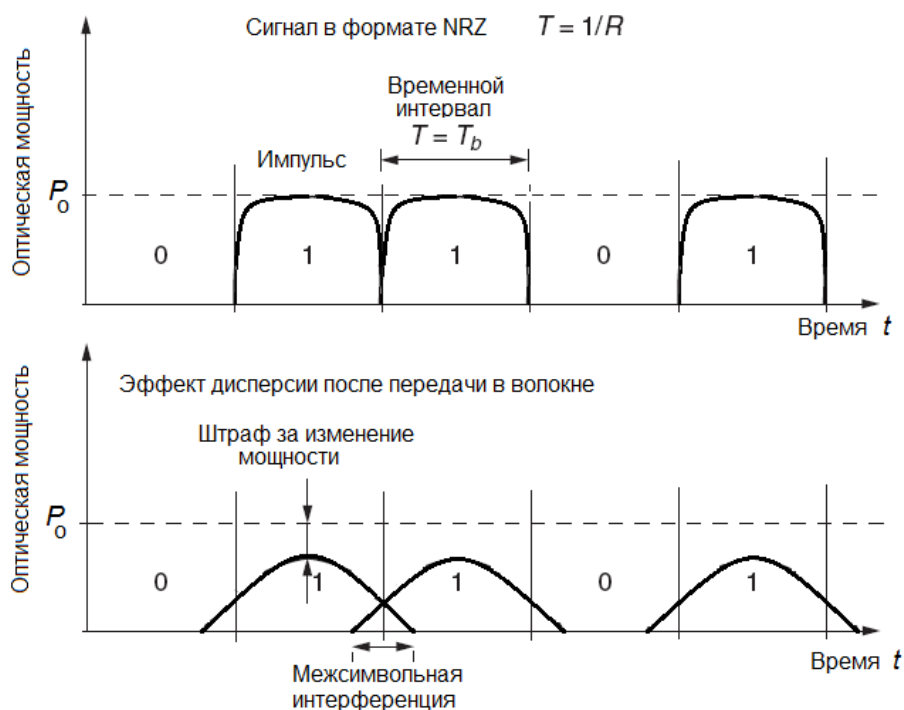


Рис. 1.9. Межсимвольная интерференция, вызванная дисперсией волокна

Дифференциация скоростей одной моды обусловлена зависимостью показателя преломления материала волокна от длины волны (материальная дисперсия, характеризуемая коэффициентом материальной дисперсии $M(\lambda)$), зависимостью распространения моды от конструкции оптического волновода (волноводная дисперсия, характеризуемая коэффициентом волноводной дисперсии $B(\lambda)$) и разностью скоростей распространения двух поляризованных ортогональных мод, порождаемых поперечной неоднородностью (овальность)

сердцевины волокна (поляризационная модовая дисперсия, характеризуемая соответствующим удельным коэффициентом ПМД $D_{\text{ПМД}}$).

Для оценки величины хроматической дисперсии используется понятие групповой скорости распространения оптического сигнала

$$V_{gp} = C / N_{gp} = \frac{C}{n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}}, \quad (1.1)$$

где C скорость света, n показатель преломления материала сердцевины волокна, λ длина волны, дифференциал указывает на зависимость показателя преломления от длины волны.

Величина групповой задержки определяется соотношением:

$$\Delta\tau = \Delta\lambda \frac{dt}{d\lambda} = \Delta\lambda \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{N_{gp} L}{C} \right) = -\frac{L}{C} \lambda \frac{d^2 n}{d^2 \lambda} \Delta\lambda, \quad (1.2)$$

где вводится обозначение коэффициента удельной материальной дисперсии

$$M(\lambda) = \frac{\lambda}{C} \frac{d^2 n}{d^2 \lambda} \text{ и получается материальная дисперсия } \Delta\tau = \tau_m = -L\Delta\lambda M(\lambda).$$

Аналогично определяется волноводная дисперсия:

$$\tau_B = L\Delta\lambda B(\lambda),$$

где коэффициент удельной волноводной дисперсии $B(\lambda) = \frac{2n_1^2 \Delta}{C\lambda}$,

Δ – разность показателей преломления, n_1 показатель преломления сердцевины волокна, λ – длина волны, C скорость света в вакууме.

Результирующая (хроматическая) дисперсия представляет собой сумму

$$\Delta\tau = D_{\text{ХД}} = \tau_m + \tau_B, \quad (1.3)$$

в которой материальная и волноводная составляющие имеют противоположные знаки. Благодаря этому на некоторой волне λ_0 наступает баланс хроматической дисперсии, когда $\Delta\tau=0$ (рис.1.10). Такой баланс предусмотрен в различных волоконных световодах на различных волнах λ_0 , например, волокна G.652 имеют $\lambda_0=1310\text{нм}$.

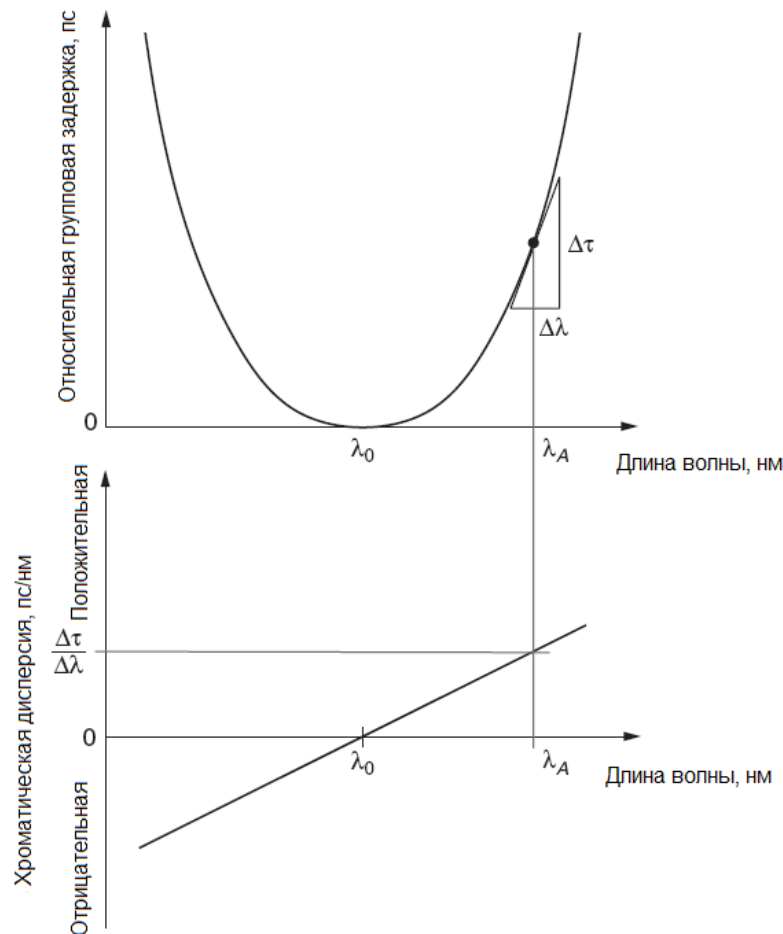


Рис. 1.10. Относительная групповая задержка и хроматическая дисперсия

Связь между шириной спектра сигнала и величиной групповой задержки нормируются для каждого типа волокна удельной относительной величиной

$\frac{ps}{nm \times km}$ и наклоном характеристики дисперсии $\frac{ps}{nm^2 \times km}$ (пример на рис.1.10 для волны λ_A). Типовыми являются показатели хроматической дисперсии, например, для SMF G.652 17 пс/нм×км на волне 1550нм, и наклона дисперсии 0,056 пс/нм²×км на волне 1550 нм. Другие типы волокон имеют смещённые характеристики дисперсии и наклон этих характеристик, обусловленный различным профилем показателя преломления (рис.1.11).

Волокна имеют различные названия и различные характеристики дисперсии (наклон и смещение дисперсии):

NDSF (SSMF), no dispersion shifted fiber (standard single mode fibers) – волокно без смещения дисперсии (стандартное одномодовое волокно) по рек. ITU-T G.652;

DSF, dispersion-shifted single mode fiber – стандартное одномодовое волокно со смещённой дисперсией по рек. ITU-T G.653;

NZ-DSF, non-zero dispersion-shifted single-mode – стандартное одномодовое волокно со смещённой ненулевой дисперсией (на рис.1.11 отмечен диапазон

дисперсий NZ-DSF с различным наклоном и смещением со знаками $\pm$) по рек. ITU-T G.655, G.656.

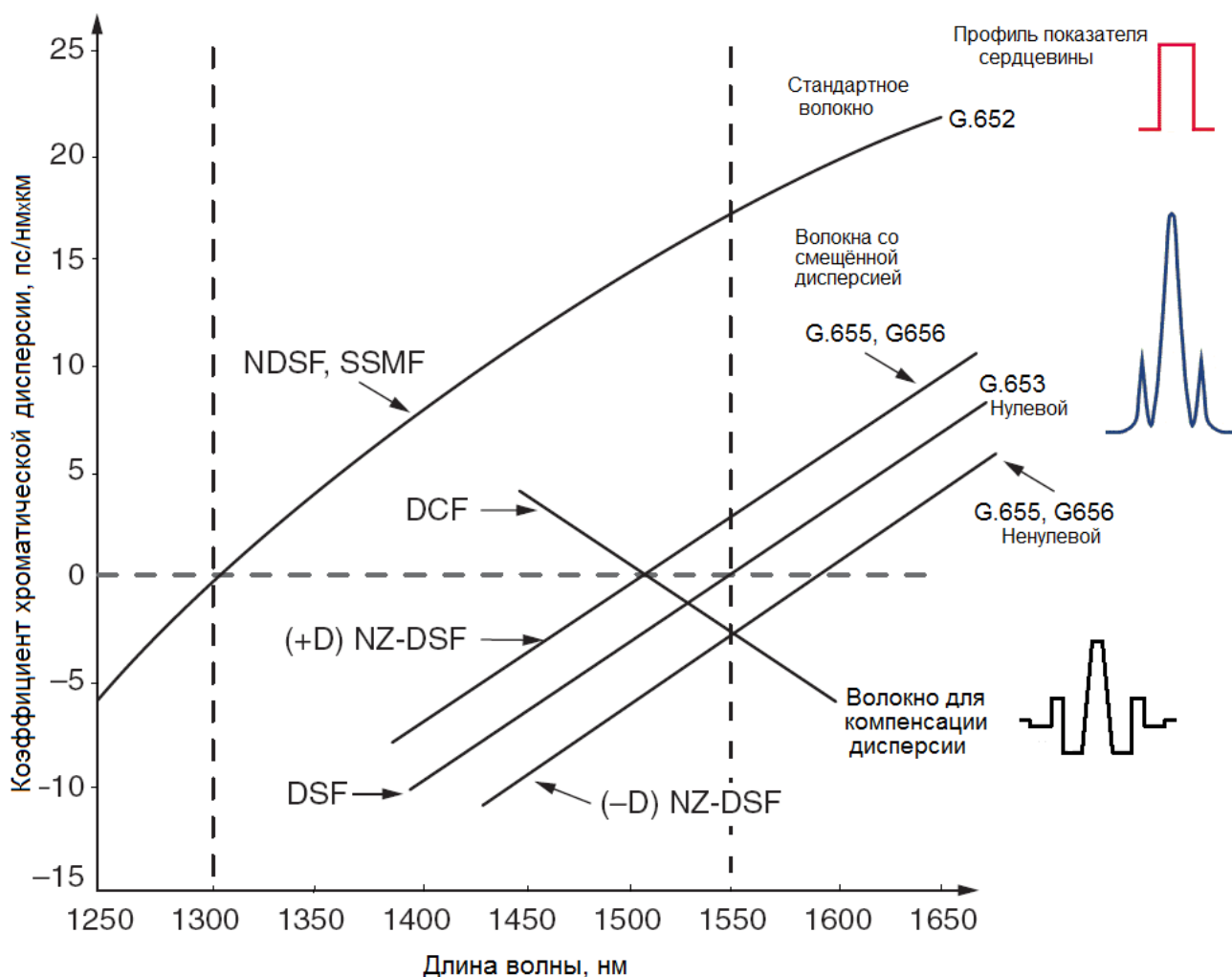


Рис. 1.11. Характеристики хроматической дисперсии стандартных волоконных световодов

Волокно DCF (Dispersion Compensating Fiber – волокно с компенсацией дисперсии) имеет наклон характеристики противоположный характеристикам стандартных волокон. Такие волокна позволяют подавлять накопление дисперсии стандартных волокон при каскадном включении в виде линейного кабеля или модуля в стационарном оборудовании.

Волновая область применения волокон со смещённой дисперсией для передачи информационных сигналов ограничена диапазоном 1460 – 1625 нм.

Дисперсия поляризованных мод также характеризуется удельным коэффициентом, учитывающим статистическую среднеквадратическую зависимость, величина которой нормируется для конкретных волокон в стандартах [6]. Например, величина ПМД волокон G.652 составляет $0,5\text{нс}/\sqrt{\text{км}}$, $0,2\text{нс}/\sqrt{\text{км}}$, $0,1\text{нс}/\sqrt{\text{км}}$ и имеет обозначение $\tau_{\text{ПМД}}$ или $D_{\text{ПМД}}$.

Расчёт величины ПМД производится в формуле:

$$D_{ПМД} = \tau_{ПМД} \sqrt{L}. \quad (1.4)$$

Результирующая удельная дисперсия одномодовых волоконных световодов представляет собой сумму:

$$\Delta\tau^2 = D^2 = (\tau_m + \tau_B)^2 + D_{ПМД}^2 = D_{ХД}^2 + D_{ПМД}^2, \quad (1.5)$$

где вклад каждой составляющей зависит от длины волны, ширины спектральной линии и удельного коэффициента. Эти составляющие вносят ограничения на возможности передачи оптических канальных сигналов для различных скоростей и форматов представления данных. Примеры таких ограничений по дальности передачи представлены в табл.1.3 для хроматической дисперсии и табл. 1.4 для ПМД. Критерием оценки является коэффициент битовых ошибок (BER, bit error rate), величина которого не должна превышать на приёме 10^{-12} .

Табл. 1.3. Ограничение возможностей передачи цифровых данных в волокнах G.652 из-за ХД

Скорость, Гбит/с	Иерархическая структура в формате NRZ	Дисперсионный предел (пс/нм) при штрафе		Дистанция передачи (км) при штрафе	
		1дБ	2дБ	1дБ	2дБ
2,5	STM-16	18800	30100	1100	1770
10	STM-64	1176	1880	69	111
40	STM-256	73,5	117	4,3	6,9
100	100G Ethernet	11,8	18,8	0,69	1,1

Табл. 1.4. Ограничение возможности передачи цифровых данных в стандартных волокнах из-за ПМД

Скорость, Гбит/с	Иерархическая структура в формате NRZ	Дисперсионный предел (пс) при штрафе более 1дБ
2,5	STM-16	40
10	STM-64	10
40	STM-256	2,5
100	100G Ethernet	Менее 1

Ограничение дистанции передачи по причине ПМД может быть рассчитано с помощью формулы:

$$L = \left(\frac{E}{B_{\max} \tau_{ПМД}} \right)^2, \quad (1.6)$$

где E доля битового интервала, на которую допускается изменение из-за ПМД при заданном коэффициенте ошибок. Например, для коэффициента ПМД $\tau_{ПМД} = 0,04 \text{ пс/км}^2$ и $E = 0,1 T_b$ при вероятности ошибки 10^{-12} на скорости 40 Гбит/с протяженность линии составит 3900 км.

Расход энергии оптического импульса на поляризацию излучения в волоконных световодах и оптических компонентах имеет достаточно заметный вес при учёте потерь в оптическом канале. Эти потери можно определить из

нормативных документов как поляризационно-зависимые потери PDL (polarization-dependent loss). Например, волокна стандарта G.652 имеют типовые значения $PDL < 0,05$ дБ на длине 10 км, угловой коннектор разъёмного стыка имеет PDL около 0,1 дБ, оптический изолятор 0,3 дБ и т.д. В протяженных оптических каналах эти потери необходимо учитывать в практике проектных расчётов энергетического потенциала конкретных оптических интерфейсов.

Ограничения возможностей передачи оптических канальных сигналов по причине возникновения нелинейных эффектов в основном связаны с протяженностью волоконных световодов и той совокупной мощностью излучения оптических каналов, которая концентрируется в сердцевине волокна на ограниченном участке. Эта связность обусловлена зависимостью показателя преломления материала сердцевины волокна n_1 от величины напряженности электрического поля когерентного излучения E :

$$n_1(\lambda, E) = n_{эфф}(\lambda) \pm \gamma \frac{P}{A_{эфф}} = n_{эфф}(\lambda) \pm \Delta n(P), \quad (1.7)$$

где $n_{эфф}(\lambda)$ показатель преломления сердцевины волокна при низком уровне мощности оптического излучения, γ коэффициент нелинейности (коэффициент Керра) для стекла от $2,0 \times 10^{-20}$ до $3,5 \times 10^{-20}$ м²/Вт, P мощность оптического излучения в Вт, $A_{эфф}$ эффективная площадь сердцевины волокна в м². Нелинейная зависимость показателя преломления стекловолокна приводит к дополнительному снижению мощности оптического сигнала, передаваемой в линии (рис.1.12).

Снижение мощности оценивается таким показателем, как ухудшающий фактор - штраф по мощности из-за нелинейности, учитываемом в расчётах протяженных линий. Штраф из-за нелинейного эффекта является обобщённой (интегрированной) оценкой таких эффектов, как фазовая самомодуляция SPM (self-phase modulation), фазовая кросс модуляция CPM (cross-phase modulation), четырёхволновое смешивание FWM (four-wave mixing), вынужденное комбинационное рассеяние Рамана SRS (stimulated Raman scattering), вынужденное комбинационное рассеяние Брюэллена SBS (stimulated Brillouin scattering).

При этом роль каждого из нелинейных эффектов может быть предметом детального анализа для конкретных разновидностей волоконных световодов. Примеры такого анализа известны по ряду публикаций [7 - 9], в которых предметом является величина вклада нелинейности в штраф по мощности для каждого из видов эффектов. Конечным результатом является определение штрафа при определённых мощностях оптических сигналов с различным числом образованных каналов для различных типов волокон. Величина штрафа за нелинейные эффекты обычно оценивается в пределах от 0,5 дБ до 1 дБ. Пример оценки штрафа по SRS для волокон G.655 при организации различного числа оптических каналов представлен в табл.1.5.

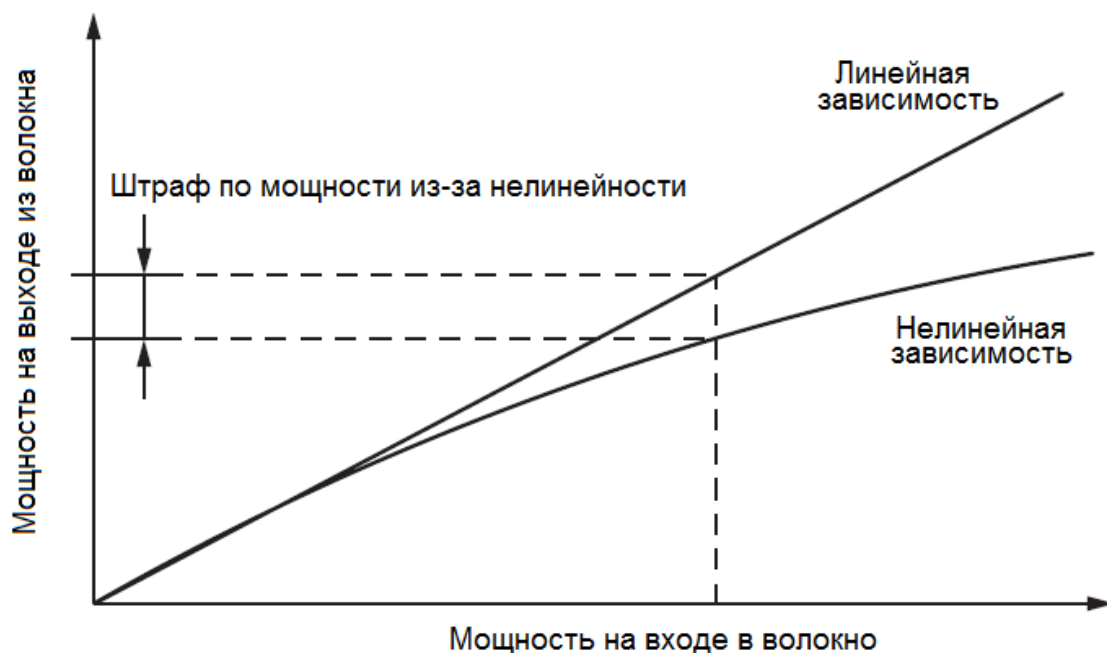


Рис. 1.12. Нелинейное свойство стекловолокна и оценочный показатель штрафа в системе

Аналогичный пример ограничений по мощности оптических сигналов для оптических каналов представлен в табл.1.6 при штрафе 0,5 дБ нелинейный эффект FWM зависит от числа каналов, интервала частот между ними и величины хроматической дисперсии. Очевидна положительная роль хроматической дисперсии для повышения энергетического потенциала оптического канала в системе до 8 дБ. Дисперсия снижает роль нелинейности волокна благодаря распределению интенсивности оптического излучения по длине волокна.

Табл. 1.5. Допустимые уровни передачи мощности в оптических каналах DWDM при штрафе 0,5.дБ за SRS в волокнах G.655

Число каналов	Максимальный уровень мощности в оптическом канале, дБм		
	200ГГц	100ГГц	50ГГц
8	15	18	21
16	8,6	11,6	14,7
32	2,5	5,5	8,5
40	0,5	3,6	6,6
80	-5,5	-2,5	0,5

Табл. 1.6. Допустимые уровни передачи мощности в оптических каналах DWDM при штрафе 0,5дБ за FWM в волокнах с различной ХД

Каналы DWDM		Коэффициент хроматической дисперсии		
Число каналов	Частотный интервал, ГГц	2пс/нм×км	5пс/нм×км	10пс/нм×км
		Максимальный уровень мощности сигнала, дБм		
8	10	-11	-6	-4
	25	-3	1	4
	50	3	7	10
	100	9	13	15
16	10	-13	-10	-6
	25	-5	-1	1
	50	0	4	8
	100	6	10	14
32	10	-14	-10	-6
	25	-6	-1	1
	50	0	4	8
	100	6	10	13

Преодоление нелинейных ограничений по передаче оптических сигналов в волоконных световодах находится на стыке баланса совокупного максимального уровня мощности, допустимой дисперсии и межканального интервала при заданной величине штрафа. Для протяженных линий наилучшие показатели по преодолению нелинейных ограничений могут дать одномодовые волоконные световоды с наибольшей величиной $A_{эфф}$, размеры которой для стандартных волокон следующие: NDSF G.652, ХД=18 пс/нм×км, 80 мкм²; NZ-DSF G.655, ХД=4 пс/нм×км, 72 мкм²; DSF G.653, ХД=0 пс/нм×км, 50 мкм². Можно также привести допустимые уровни мощности для этих волокон при организации 3-х спектральных каналов с частотным интервалом 100 ГГц допустимые уровни составят: +17 дБм; +13 дБм; +3 дБм соответственно.

1.2. Оптические передатчики, приёмники и усилители

Современные оптические передатчики, приёмники и оптические усилители выполняются в виде модулей, которые чаще всего называют трансиверами (от англ. TRANSmitter – передатчик и reCEIVER – приемник) - это приемопередающее устройство, используемое в волоконно-оптических линиях связи для приема и передачи данных между удаленными устройствами. Такие устройства различаются решениями электронных и оптических схем, алгоритмами обработки передаваемых данных на передаче и на приеме. Переход к скоростям передачи цифровых данных от 40 Гбит/с до 100 Гбит/с и выше обусловил принципиально новые решения в физическом исполнении приборов

(источников оптического излучения, модуляторов, кодеров/декодеров, фотодетекторов и фотоприёмных устройств, процессоров цифровой обработки сигналов) и алгоритмов кодирования/декодирования, коррекции искажений, восстановления несущих частот и т.д.

Для последующего изучения представляют интерес те решения для трансиверов, которые поддерживают уже указанные скорости передачи и перспективные стандарты скоростей от 240 Гбит/с до 1 – 100 Тбит/с и последующими возможностями роста до 1 Пбит/с. Большинство современных решений для высокоскоростных оптических трансиверов (рис.1.13) состоит в схемотехнике передатчиков с внешними модуляторами интенсивности на основе эффекта электроабсорбции EAM (electro-absorption modulator), управления интенсивностью или фазой непрерывного излучения лазера CW в модуляторе (-ах) Маха-Зендера MZM (Mach-Zehnder modulator) и также совместного управления и интенсивностью, и фазой излучения в более сложных схемах, в том числе в схемах с двойной поляризацией излучения CW. То что относится к приёмникам трансиверов, это фотодиоды конструкций p-i-n с волновыми секциями детектирования и лавинные фотодиоды APD (avalanche photodiode) высокой чувствительности и быстродействия на основе соединений InP, InGaAs, в которых использованы материалы с множеством «квантовых ям» MQW (multiple quantum wells). Для повышения чувствительности фотоприёмников используется когерентных гомодинный приём многопозиционных сигналов (в примере квадратурных), при котором в приёмнике размещается дополнительный CW лазер-гетеродин, настроенный на генерацию такой же оптической частоты как в передатчике. В структуры оптических передатчиков и приёмников, как правило, включаются оптические усилители (полупроводниковые и волоконные). Они позволяют поддерживать требуемый уровень мощности оптического сигнала на передаче и определённую чувствительность приёмника.

Для оптических трансиверов определён набор требований для практической реализации, закреплённый в Международных стандартах, в частности рекомендациях ITU-T. Этот набор требований базируется на физических возможностях приборов, т.е. лазеров, фотодиодов, модуляторов, усилителей и других компонентов, в том числе пассивных (компенсаторах дисперсии, волокнах, фазовращателях, планарных волноводах гибридных оптических схем (передатчик и приёмник на рис.1.13в) и т.д.).

Лазеры CW должны излучать волны заданного диапазона (например, C, L), узкого спектра ($\Delta\lambda_s \rightarrow 0$), требуемой мощности (от 1 мВт до 100 мВт) и поляризации (рис.1.14).

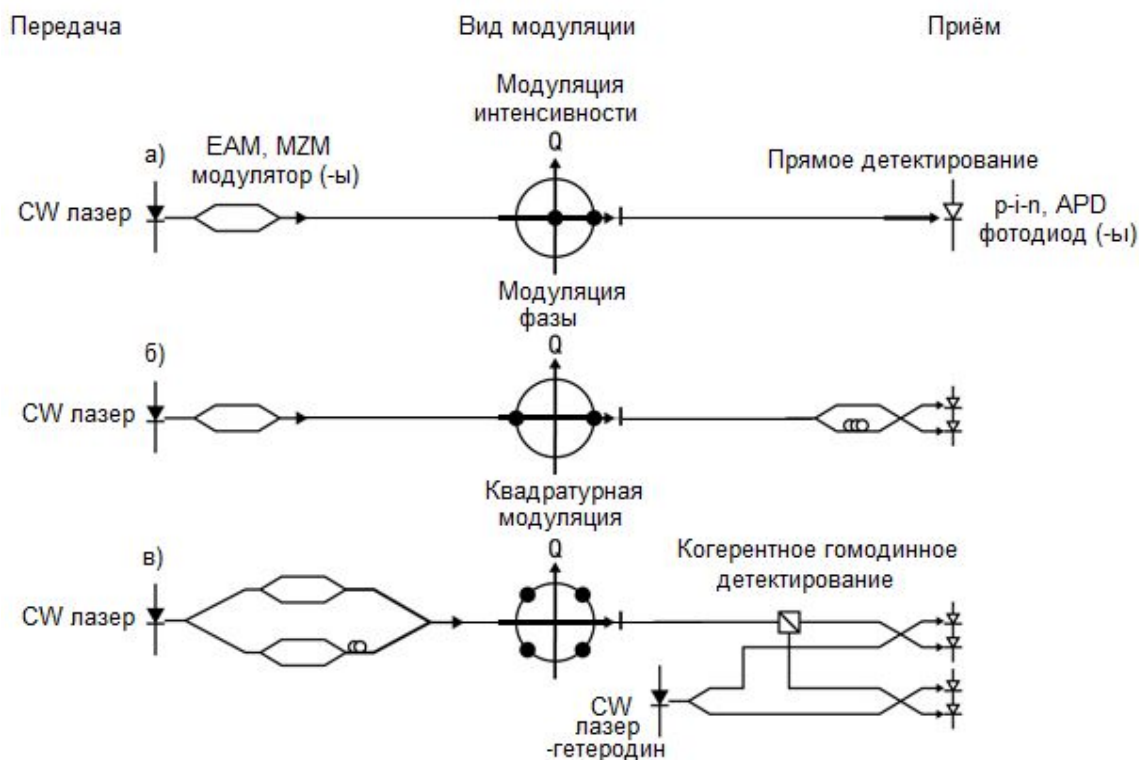


Рис.1.13. Структурные решения для оптических трансиверов высокоскоростных систем передачи: а – с модуляцией интенсивности; б – с модуляцией фазы; в – с комбинированной многоуровневой модуляцией

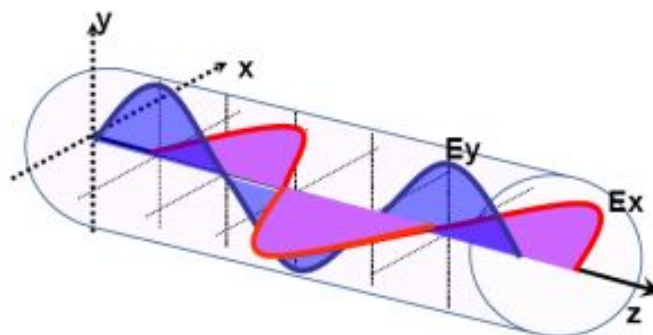


Рис. 1.14. Плоскости поляризации оптического излучения лазера CW

Все составляющие идеального оптического когерентного излучения можно представить напряжением электрической составляющей электромагнитной волны:

$$E_{CW}(t) = \sqrt{P_S} \times e^{j(\omega_S t + \varphi_S)} \times e_S, \quad (1.9)$$

где $\sqrt{P_S}$ - амплитуда, ω_S – круговая частота несущего колебания, φ_S – фаза несущего колебания, e_S – поляризация излучения (рассматриваются плоскости

X,Y). Направление распространения волны обозначается линией Z. С учётом этого в пространстве можно записать $E_{CW}(z,t)$.

Особенностями лазеров CW для когерентных систем с DWDM являются [11]: малогабаритная реализация в виде полупроводникового прибора; реализация возможности точной настройки ($\Delta f < 1 \text{ ГГц}$) на заданные длины волн в определённом диапазоне, достаточно широком, например, $\Delta \lambda_{\text{диапазона}} > (30 - 70) \text{ нм}$, и возможности по управлению уровнем мощности излучения. Долговременная стабильность излучения при этом поддерживается за счёт электронного управления током накачки и температурой тела излучателя, стабилизируемой схемой с микрохолодильником на основе эффекта Пельтье в полупроводниках различной проводимости (p^+ и n^+ проводимостей). Реализация лазеров CW с указанными возможностями имеет высокую стоимость (более 3500 \$) в сравнении с обычными (без перестройки) модулями (до 600\$). Пример структуры одной из разновидностей перестраиваемых лазеров типа SSG-DBR (superstructure grating distribute Bragg reflector) представлен на рис.1.15.

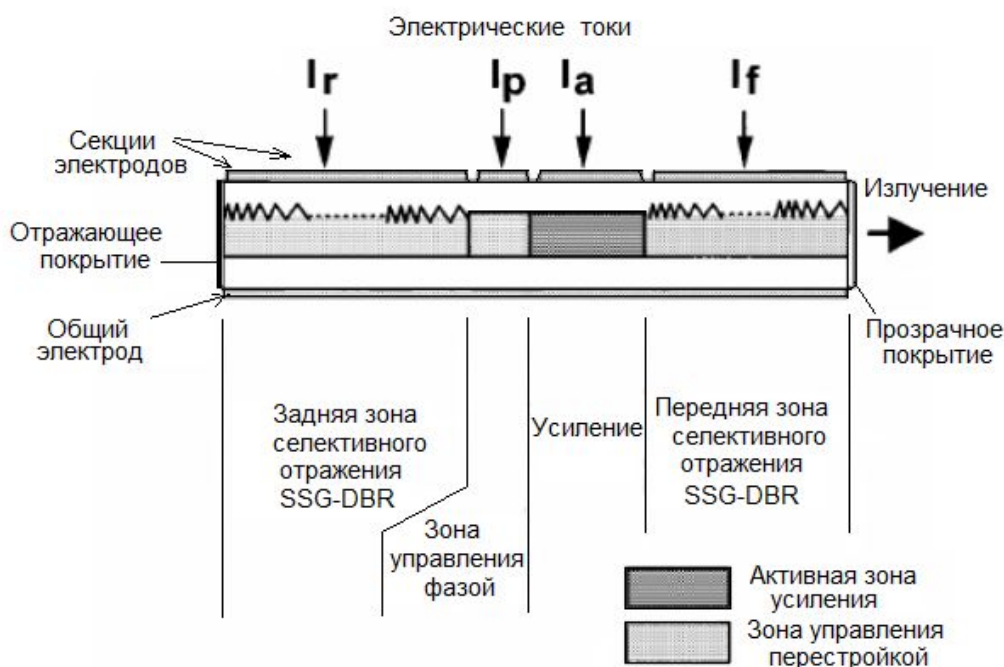


Рис. 1.15. Конструкция перестраиваемого лазера для когерентных систем

Для настройки лазера SSG-DBR используются различные электрические токи: управления отражателями I_r и I_f ; управления фазой I_p ; управления усилением I_a . Каждый из токов действует на определённые по длине участки ($L_{s,r}$, L_p , L_a , $L_{s,f}$) в теле лазера (рис.16). Задний и передний отражатели с брэгговскими решетками имеют различные периоды расположения отражателей и различное число мод отражения $N_{s,r}$ и $N_{s,f}$. Им соответствуют различные диаграммы отражения (пример на рис.1.17).

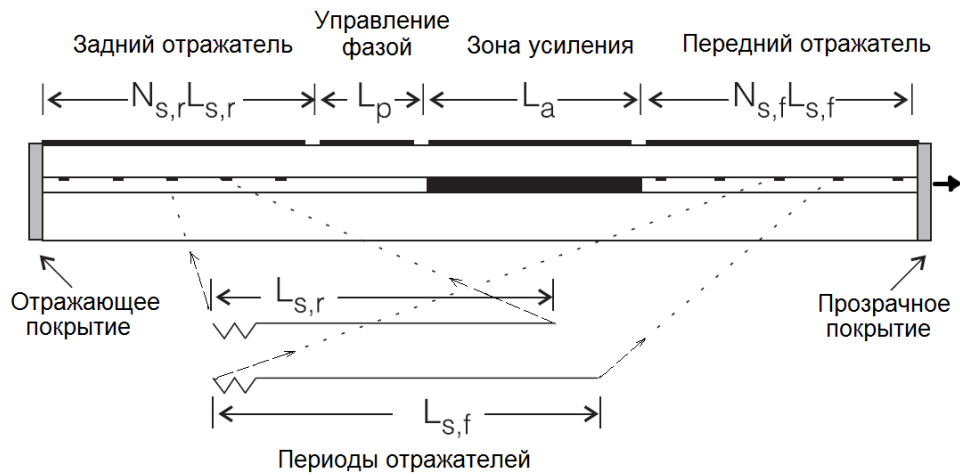


Рис. 1.16. Лазер SSG-DBR с функциональными участками

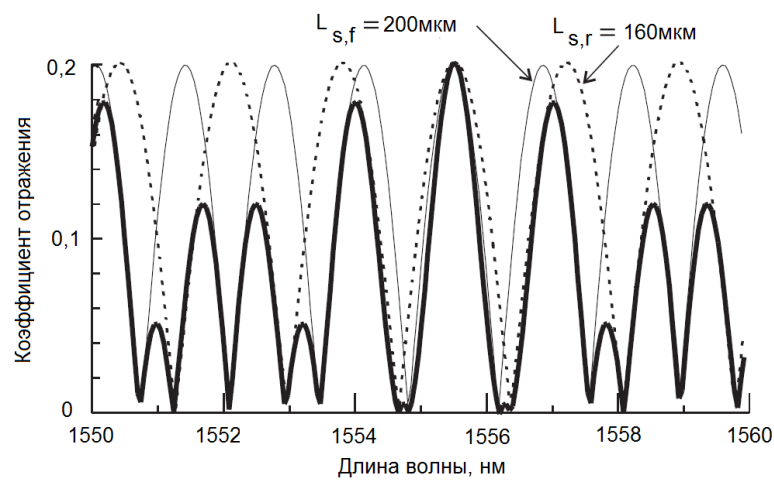


Рис. 1.17. Пример диаграмм отражения рефлекторов DBR

Каждый из двух отражателей имеет одинаковую структуру размещения брэгговских решеток (рис.1.18).

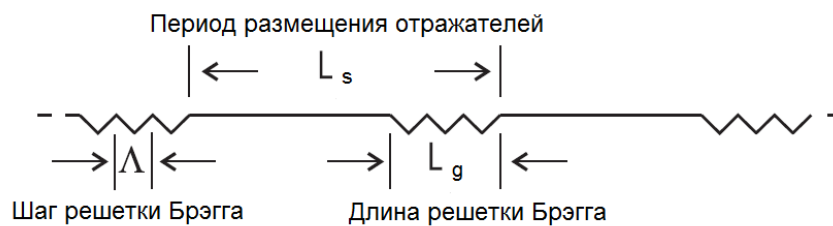


Рис. 1.18. Участки отражателей DBR

Шаг решетки Брэгга определяется фундаментальным соотношением Брэгга-Вульфа:

$$\Lambda \times n_g \times (1 + \sin Q) = m \times \lambda, \quad (1.10)$$

где Λ - расстояние между отражающими элементами, n_g эффективный показатель преломления материала (полупроводника), Q - угол между падающим лучом и отражающей плоскостью, λ - длина волны излучения, m - порядок дифракции.

Изменением величины токов управления можно добиться совпадения коэффициентов отражения двух решеток DBR на отдельных волнах с определённым шагом $\Delta\lambda$ (0,8 нм; 0,4 нм и т.д.). Токи управления определяют значения эффективных показателей преломления, т.е. существует связь между длиной волны и значением показателя преломления:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{\Delta n}{n}. \quad (1.11)$$

Величина шага перестройки каждого из отражателей определяется соотношениями:

$$\Delta\lambda_r = \frac{\lambda^2}{2n_{gr}L_{s,r}}, \quad \Delta\lambda_f = \frac{\lambda^2}{2n_{gf}L_{s,f}}, \quad (1.12)$$

где n_g эффективный показатель преломления, соответственно для каждого из отражателей (r, f), зависящий от величины проходящего электрического тока. Практический пример сетки настраиваемых волн для лазеров CW представлен на рис.1.19 [12].

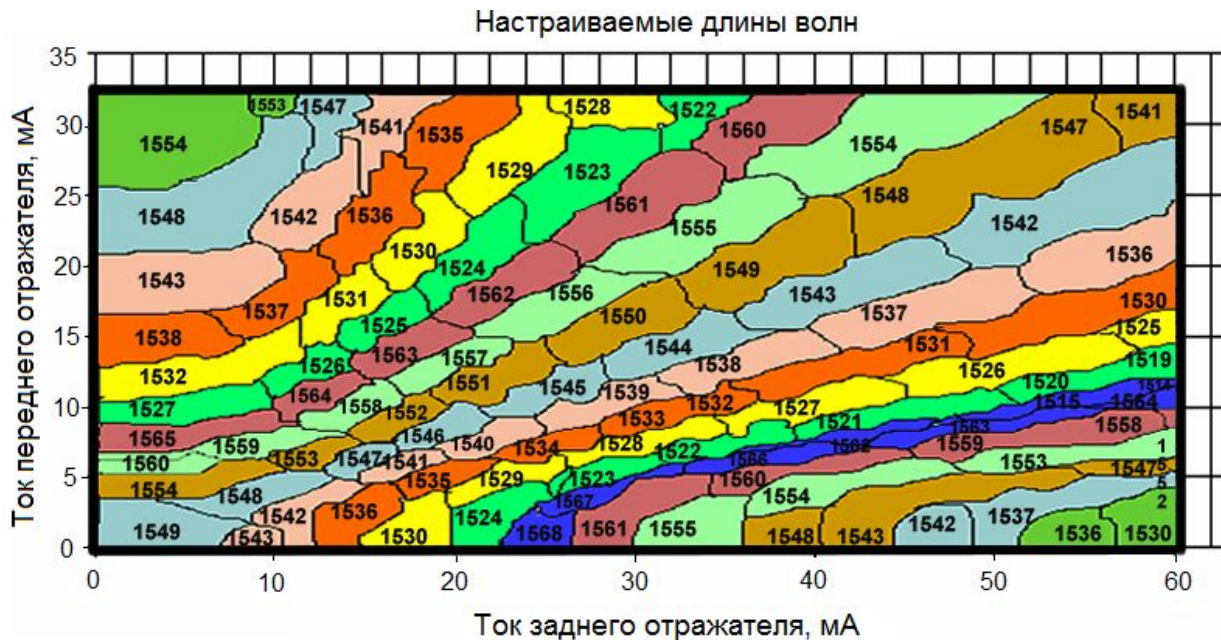


Рис. 1.19. Диапазоны токового управления в лазере SSG-DBR

Прибор может перестраиваться в диапазоне волн 1530 нм – 1565 нм с шагом 0,35 нм и точностью настройки 0,05 нм. Изменение тока на 1 мА изменяет частоту генерации на 1 ГГц. Время перестройки составляет 5 нс. Ширина спектральной линии не превышает 10 МГц.

В структуру лазера CW может быть включён дополнительный полупроводниковый усилитель оптического излучения и модулятор EAM или MZM, в том числе интегрирован в SSG-DBR (рис.1.20), что позволяет создавать малогабаритный, экономичный оптический модуль передатчика для простых форматов модуляции RZ, NRZ с ограничением скорости передачи величиной не более 40 Гбит/с, что обусловлено паразитными электрическими ёмкостями и сопротивлениями электродов и цепи модулирующего сигнала.

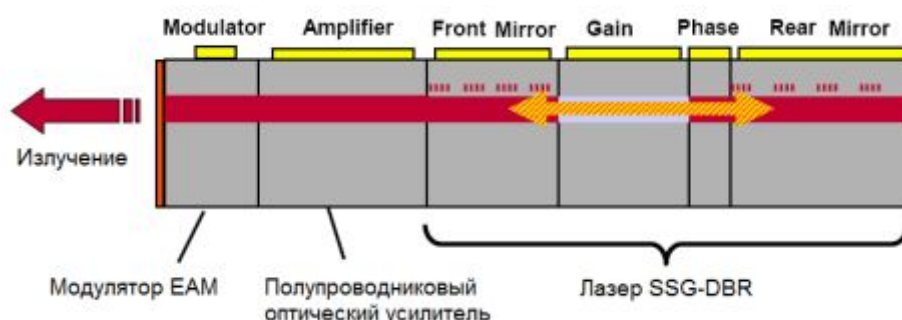


Рис. 1.20. Пример конструкции лазера CW с встроенными модулятором и оптическим усилителем

Более сложными решениями для передатчиков принято считать использование отдельных внешних модуляторов MZM с каскадным и параллельным включением (рис.1.21), которые позволяют реализовать различные форматы модуляции с высокими показателями спектральной эффективности при высоких скоростях передачи (свыше 40 Гбит/с).

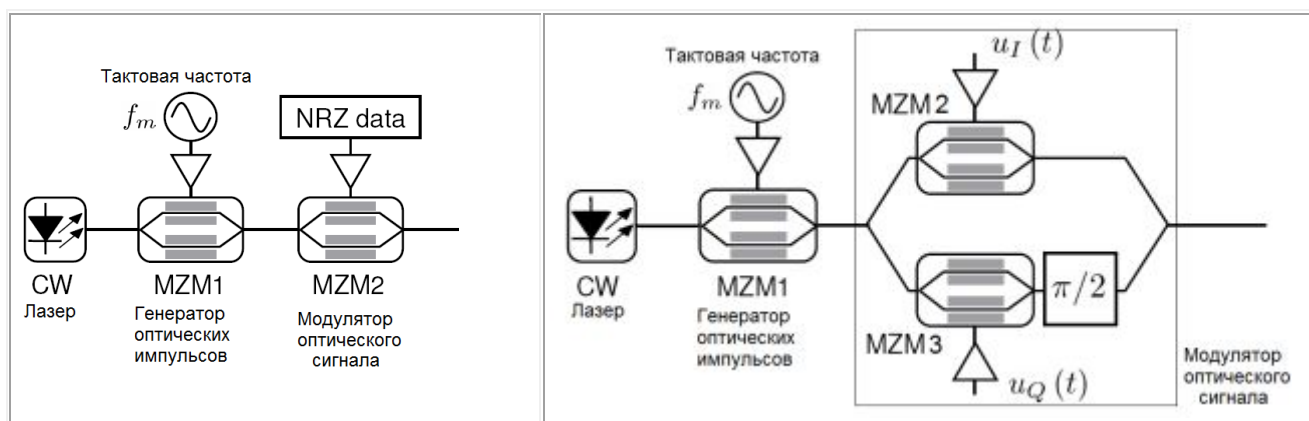


Рис. 1.21. Структуры оптических передатчиков с внешними модуляторами MZM (каскадное и параллельное включение)

Модуляторы MZM выполняются на электрооптических кристаллах, например на основе ниобата лития LiNbO_3 , оптические свойства которых зависят от величины электрического поля, создаваемого внешним генератором, и концентрируемым на определённый участок материала. Внешнее электрическое поле может изменить показатель преломления, т.е. скорость распространения оптического излучения. Это свойство используется в параллельных волноводных каналах MZM для управления фазовой скоростью поляризованных волн, создаваемых одним источником (рис.1.22). Если к параллельным волноводным каналам через коаксиальный разъём подключить источник сигнала с переменным напряжением $V(t)$, то можно изменять фазы излучения таким образом, что на выходе MZM излучения будут складываться в фазе и в любом сочетании фаз от 0° до 180° . Это приведёт к модуляции оптической мощности на выходе (рис.1.23). Напряжение, при котором оптическая мощность не проходит на выход называется полуволновым V_π , т.е. соответствующим сдвигу 180° .

Соотношение мощностей оптического излучения на входе и выходе MZM определяется разностью фаз, зависящей от управляющих напряжений (полуволнового и сигнала):

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} \cos^2 \frac{\Delta\Phi}{2}, \text{ где } \Delta\Phi = \Phi(t) - \Phi_0, \Phi(t) = \pi \frac{V(t)}{V_\pi}.$$

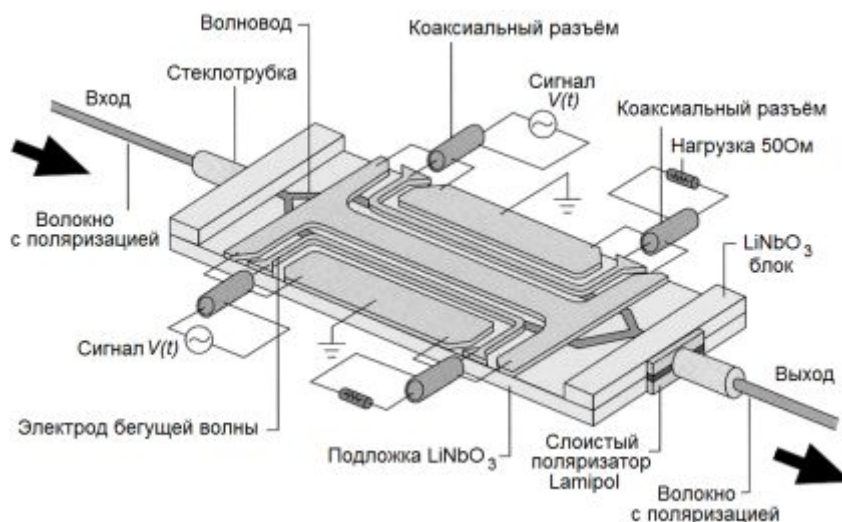


Рис. 1.22. Конструкция MZM (источник схемы : Sumitomo Osaka Cement Co., Ltd)

Управление разностью фаз является ключевым элементом MZM. Все форматы модуляции оптической несущей частоты от простейших (RZ, NRZ, CSRS) до наиболее сложных многоуровневых и многофазных mPSK, nQAM ($2 < m \leq 256$, $8 < n \leq 1024$) производятся в схемах MZM подходящим выбором напряжений смещения $V_{\text{см}}$, полуволнового V_π , сигнального $V(t)$.

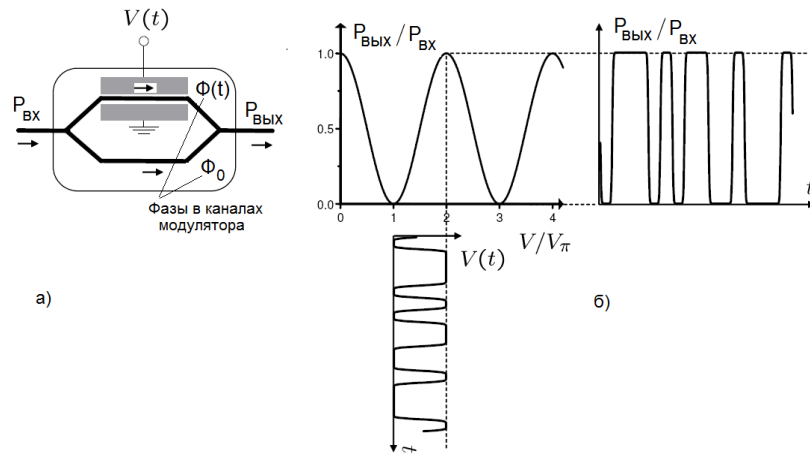


Рис. 1.23. Упрощенная схема (а) и принцип действия MZM (б)

Большее число фазовых и мощностных уровней оптического сигнала позволяет реализовать большие скорости передачи на одной оптической частоте. Однако при этом требуется существенное усложнение схемы приёмника многоуровневого и многофазного сигнала с учётом накопления оптических шумов различного происхождения (шумы спонтанной эмиссии оптических усилителей, нелинейные помехи волоконных световодов, переходные помехи соседних каналов) и дисперсионных искажений. При этом эффективным решением для повышения чувствительности приёмника оптического сигнала является применение когерентного гомодинного приёма (рис.1.24), что предполагает использование дополнительного оптического гетеродина LO (local oscillator). Входной сигнал с фазоманипулированными оптическими импульсами $E_s(t)$ смешивается на фотодетекторе с сигналом $E_l(t)$. При гомодинном детектировании частоты сигнала и гетеродина совпадают, т.е. $\omega_s = \omega_l$, а разность фаз $\Phi_s(t) - \Phi_l(t)$ даёт значение изменяющейся оптической мощности на ФД, что приводит к появлению фототока $I(t)$ в форме цифрового электрического сигнала. Величина этого сигнала зависит не только от входной мощности $P_s(t)$, но и от мощности гетеродина $P_l(t)$, что создаёт выигрыш по чувствительности перед прямым детектированием и в соотношении сигнал/шум.

Кроме того, в приёмнике используется каскадная цифровая обработка сигнала с целью компенсации дисперсионных искажений, выравнивания фаз оптической несущей и гетеродина, восстановления цифровых данных с допустимым коэффициентом ошибок (пример на рис.1.25 для квадратурного формата QPSK).

Фотодетекторы в составе когерентного приёмника вносят ряд ухудшений для детектируемых сигналов: ограничивают полосу частот электрического сигнала, чем искажают сигнал; вносят дробовые шумы широкополосного спектра, перекрывающегося со спектром детектируемого сигнала; различаются спектральной чувствительностью на различных волнах; схемы с лавинными фотодиодами требуют непрерывной коррекции коэффициента усиления.

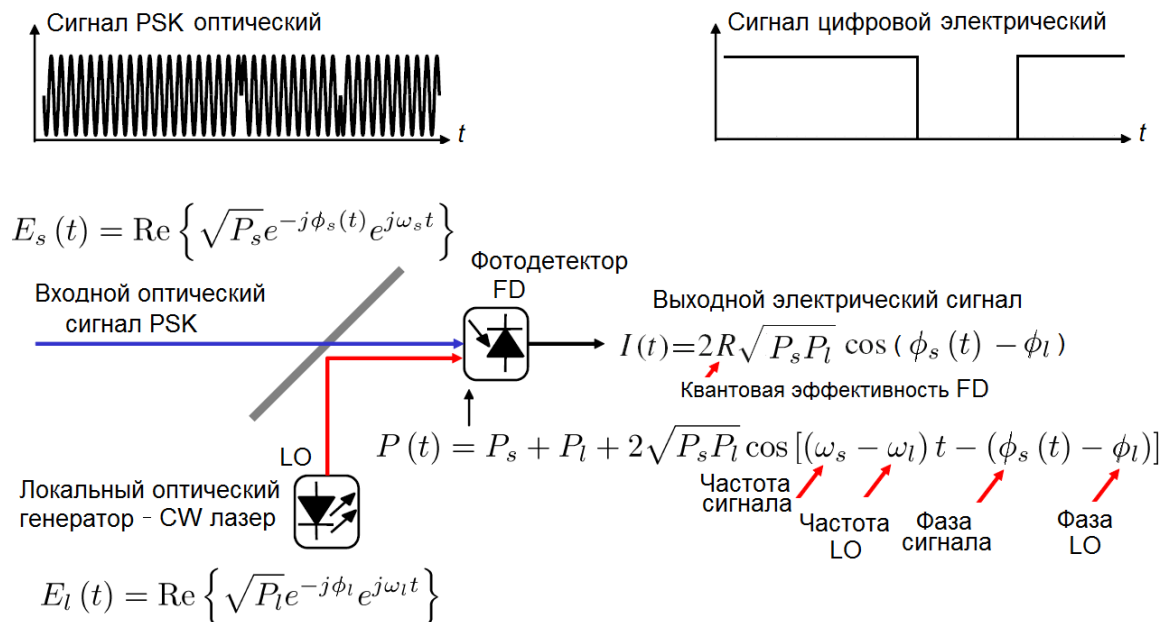


Рис. 1.24. Принцип когерентного приёма в оптической системе

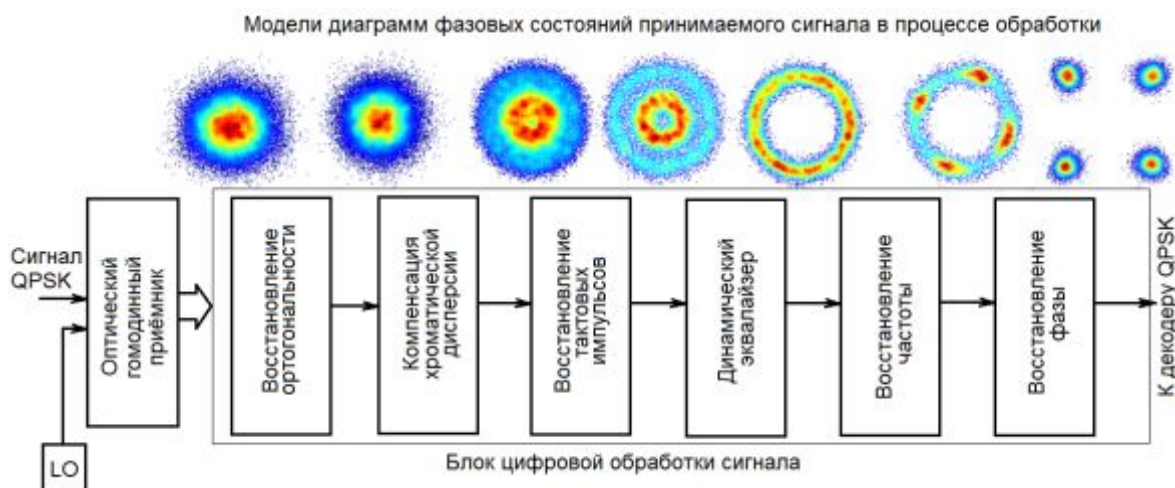


Рис. 1.25. Обработка сигнала в формате QPSK в когерентном приёмнике

Для широкополосных высокоскоростных систем специально созданы конструкции фотодиодов спектральной чувствительности в диапазоне частот до 400 ГГц и пониженными шумами с применением полупроводников с множеством квантовых ям MQW и конструкций типа «бегущая волна» TWPD (traveling-wave photodetector) (рис.1.26), UTC-PD (uni-travelling-carrier photodetector) [13]. Однако эти приборы имеют низкую спектральную чувствительность (около 0,06 А/Вт). В ограниченной полосе часто около 140 ГГц приборы этого типа позволяют получить чувствительность от 0,3 А/Вт до 0,5 А/Вт (рис.1.27) [16]. Приборы со спектральной чувствительностью свыше 0,5 А/Вт обеспечивают полосу частот до 30 - 40 ГГц. К ним относятся прежде всего мал шумные ЛФД типа APD

MQW с чувствительностью 0,3 - 0,8 А/Вт [14]. Такие приборы получили применение в когерентных системах на скорости передачи 100 – 120 Гбит/с с форматами кодирования канальных сигналов DP-QPSK, т.к. требуемая полоса частот на канал сужается до 30 ГГц.

Реально повысить чувствительность оптических приёмников когерентных систем, перекрыть большие дистанции передачи могут оптические усилители различных принципов построения и конструкций.

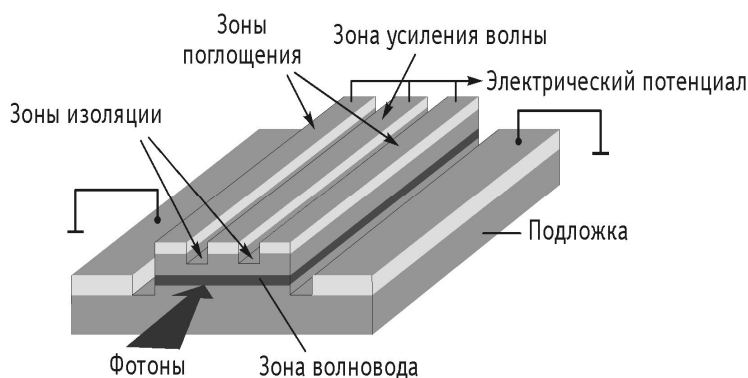


Рис. 1.26. Пример конструкции фотодетектора p-i-n TWPD

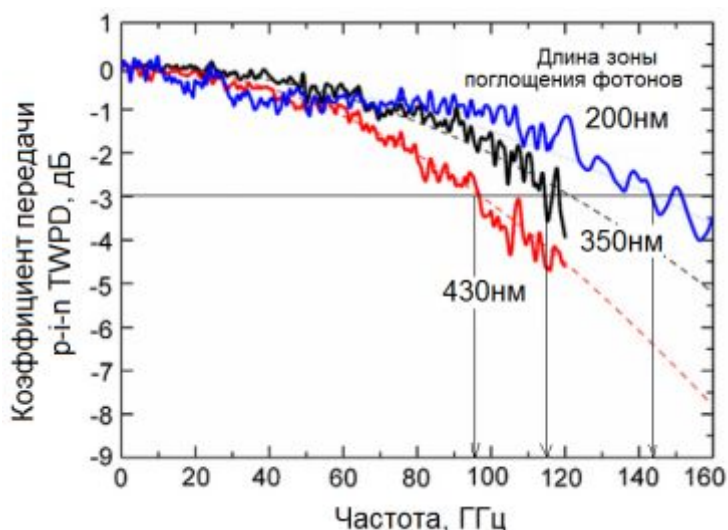


Рис. 1.27. Пример характеристик передачи фотодиода TWPD с различными по длине зонами поглощения фотонов

Все известные оптические усилители для систем передачи (полупроводниковые, волоконные примесные, рамановские на основе нелинейного эффекта в стекловолокне) пригодны для увеличения мощности оптических сигналов на входе детектора в каждом оптическом канале и для увеличения мощности многоканального оптического сигнала в промежуточных и оконечных устройствах передачи и приёма систем передачи. Варианты использования оптических усилителей представлены на рис.1.28. Они предусмотрены международными стандартами ITU-T: G.663, G.665, G.691,

G.692, Sup.39 и т.д. Усилители различаются своими характеристиками (диапазоном усиления, полосой часто усиления, чувствительностью усиления к поляризации волны, вносимыми шумами, способами накачки, вносимыми дисперсионными и нелинейными искажениями и т.д.). Примеры характеристик некоторых усилителей представлены в табл.1.7.

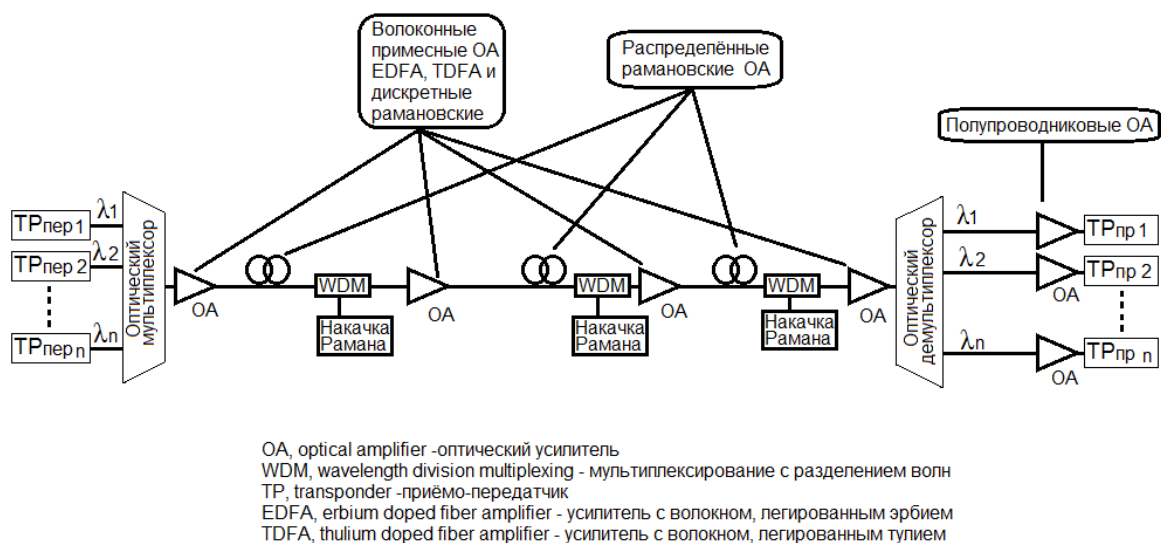


Рис. 1.28. Места использования оптических усилителей в системах DWDM

Табл. 1.7. Характеристики оптических усилителей

Показатели	EDFA	Raman	SOA
Коэффициент усиления	От 30дБ до 50дБ	От 5дБ до 30дБ более	До 30дБ
Рабочие волны, нм	1530-1560 (с возможностью расширения до 1625)	1280-1675	1280-1675
Полоса усиления по уровню -3дБ	30-60нм	Зависит от схемы накачки	60нм
Максимальный уровень мощности на выходе, дБм	22	0,75×мощность накачки	18
Поляризационная чувствительность	Нет	Нет	Есть
Коэффициент шума, дБ	5-7	4-5	8
Мощность накачки	25дБм	>30дБм	Ток до 400мА
Постоянная времени, секунда	10^{-2}	10^{-15}	2×10^{-9}
Исполнение	Блок в поддон	Отдельный модуль	Компактное с размещением на плату
Коммутационные возможности	Нет	Нет	Есть (может исполь- зоваться в составе коммутатора)
Стоимостной фактор	Средний	Высокий	Низкий

В протяженных линиях с оптическими волокнами эффективно использование комбинированных схем оконечных и промежуточных усилителей, которое даёт выигрыш в усилении и по соотношению сигнал/шум (OSNR) в несколько раз, например, за счёт встречной рамановской накачки (рис.1.29), которая порождает эффект усиления и тем компенсирует потерю оптической мощности равномерно на протяженном участке волоконной линии.

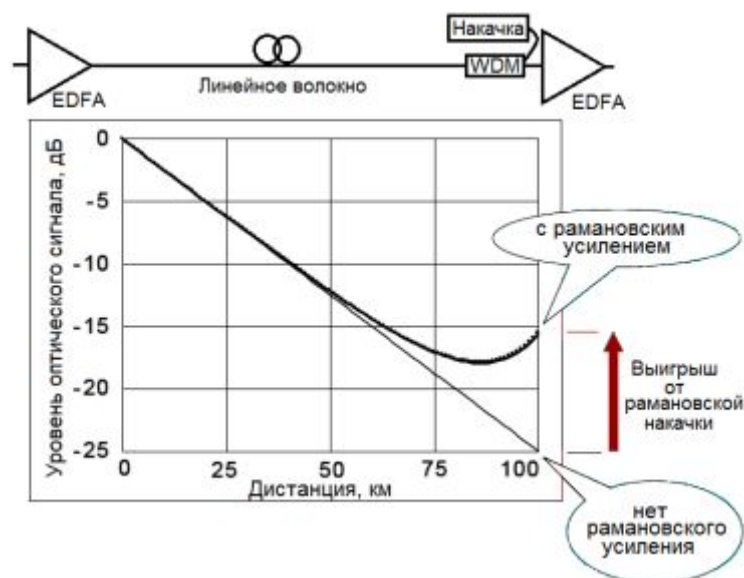


Рис. 1.29. Выигрыш от применение различных оптических усилителей в составе системы передачи

Накопление шумов от оптических усилителей в случае их каскадного включения оценивается через соотношение сигнал/шум OSNR (optical signal noise ratio), нормируемое относительно коэффициента ошибок BER (bit error ratio) цифровой передачи в оптическом канале (по рек. G.680 ITU-T):

$$OSNR = P_{out} - L - NF - 10\lg(N) - 10\lg(h \times f \times \Delta f), \quad (1.13)$$

где P_{out} – выходной уровень мощности ОА для одного оптического канала (дБм), L – потери в волокне на пролете (дБ), полностью компенсируемые оптическим усилением, NF – коэффициент шума оптического усилителя или фигура шума (международный термин) (дБ), h – постоянная Планка (в мДж×с, согласованная с P_{out} в дБм, т.е. произведение постоянной Планка и частот f и Δf , относительно 1мВт), f – оптическая частота (Гц), Δf – ширина полосы пропускания оптического канала (Гц), N – общее число усилителей при каскадировании.

Эти накопления ограничивают возможности по организации протяженных оптических каналов с широкой полосой частот передачи Δf . Они должны рассчитываться при выполнении проектных исследований и учитываться при выборе оборудования оконечных и промежуточных станций систем передачи по коэффициенту NF . Протяженность участка L (в дБ) определяется минимальным

значением чувствительности приёмника P_{in} (дБм) при заданном коэффициенте ошибок, т.е. $P_{in} \leq P_{out} - L$. В свою очередь, значение P_{out} определяется числом спектральных каналов n и допустимым значением мощности группового оптического сигнала P_{max} , не приводящим к паразитным нелинейным оптическим эффектам в стекловолокне:

$$P_{out} = P_{max} - 10 \lg n. \quad (1.14)$$

1.3. Оптические мультиплексоры выделения/ввода и коммутаторы в оптической сети

По своей классификации оптические мультиплексоры условно подразделяют на терминальные и выделения/ввода. Последние названные устройства в общем предполагают в своём составе оптические коммутаторы для изменения пути следования оптических сигналов отдельных каналов и групп каналов. При этом формируется доступ к отдельным каналам или группам каналов и возможен доступ ко всем каналам с их электрическим завершением на заданных скоростях (от 100 Мбит/с до 112 Гбит/с в стандартах Ethernet, OTN, TP-MPLS и в перспективе 400 Гбит/с и 1Тбит/с). Оптические мультиплексоры в сочетании с коммутаторами позволяют реализовать широкие возможности по построению надёжных, защищённых сетей с гибким управлением по распределению и перераспределению ресурсов (пропускной способности) оптических каналов для поддержки различных соединений (рис. 1.30). На рис.1.30 обозначено: TPD – транспондер на волне λ_i , где i – номер волны, выделенной для организации оптического канала; ОА - оптический усилитель; ТМ (terminal multiplexer) – терминальный оптический мультиплексор; ROADM (reconfigurable optical add-drop multiplexer) – управляемый (перестраиваемый) оптический мультиплексор выделения и ввода оптических волн (каналов) с возможностями переключения и ветвления оптических соединений; PXC (photonic cross-connect) – фотонный (оптический) кроссовый коммутатор.

При этом применение оптических мультиплексоров и коммутаторов в сетях связи наталкивается на ряд проблем, из-за которых накладываются штрафы на энергетический потенциал: дополнительные потери оптической мощности, которые компенсируются индивидуальными и групповыми оптическими усилителями ОА, снижающими отношение OSNR; уменьшение полосы передачи оптического канала из-за оптических фильтров разделения и объединения во всех типах мультиплексоров ROADM; внесение неравномерности в характеристику передачи каждого оптического канала и дифферент передачи между каналами; взаимные влияния между каналами; дополнительные дисперсионные искажения; накопление помех нелинейного происхождения из-за волоконных компенсаторов дисперсии с волокнами DCF, имеющими повышенным коэффициентом нелинейности.

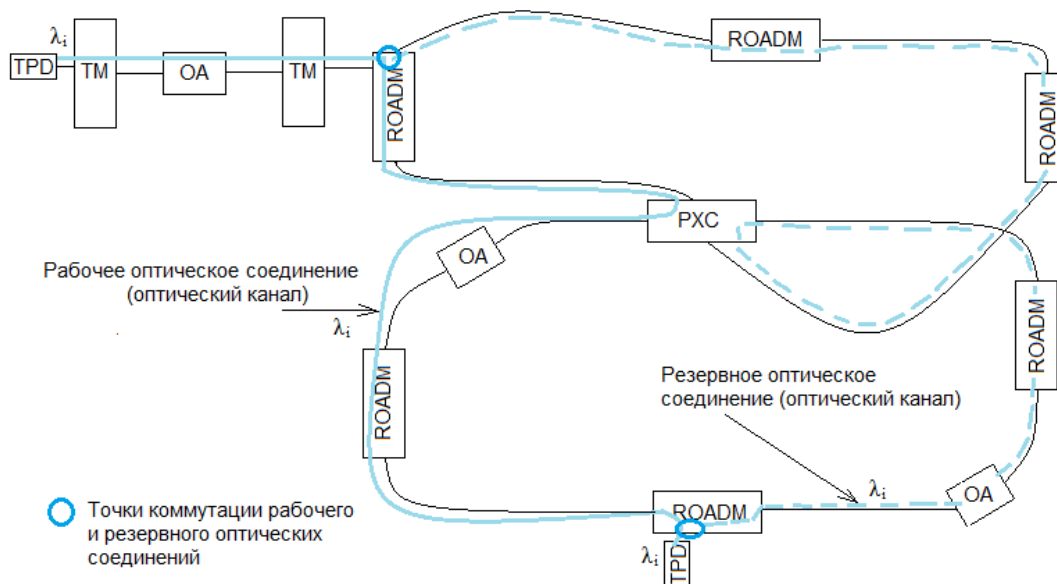


Рис. 1.30. Структура оптической сети с различными сетевыми элементами

Обобщённая оценка оптических каналов по соотношению OSNR для ряда каскадированных оптических устройств (усилителей, мультиплексоров выделения/ввода, коммутаторов и др.), называемых оптическими сетевыми элементами ONE (optical network element), производится через соотношение (по рек. Sup.39 ITU-T):

$$OSNR_{out} = -10 \lg \left(10^{-0,1(OSNR_{in})} + 10^{-0,1(P_{in1} - NF_1 - 10 \lg(hf \Delta f))} + 10^{-0,1(P_{in2} - NF_2 - 10 \lg(hf \Delta f))} + \dots + 10^{-0,1(P_{inN} - NF_N - 10 \lg(hf \Delta f))} \right),$$

где $OSNR_{out}$ отношение оптический сигнал/шум на выходе ONE; $OSNR_{in}$ отношение оптический сигнал/шум на входе ONE; P_{in} уровень мощности сигнала оптического канала на входе ONE; NF коэффициент шума ONE; h постоянная Планка, согласованная с уровнем мощности (мДж×с); f центральная частота оптического канала (Гц); Δf полоса частот оптического канала (Гц). Полученное значение OSNR может стать ещё меньше по указанным выше причинам. Нормируемое значение OSNR в современных и перспективных ВОСП определяется также форматом представления сигнала в оптическом канале.

В обобщённой оценке OSNR необходимы коррективы для оптических суперканалов, представляемых в широкой и измкняемой оптической полосе с несколькими поднесущими, и шумы нелинейного происхождения в волокнах.

Оптические мультиплексоры ROADM и кроссовые коммутаторы PXC для обработки оптических суперканалов должны быть сконструированы на управляемые полосы частот выделения, ввода и коммутации нетолько для статичных, т.е. фиксированных полос частот, но и для гибко перестраиваемых.

1.4. Форматы кодирования, оптическое отношение сигнал/шум и предел Шеннона для оптических систем передачи

Для поддержки нарастающих скоростей передачи в оптических каналах (от 40 Гбит/с на канал и до 1 Тбит/с) разработаны и внедряются несколько видов форматов модуляции оптических несущих частот (рис.1.31), в которых предусмотрены изменения амплитудных ASK (amplitude shift keying), фазовых PSK (phase shift keying) и поляризационных PolSK (polarization shift keying) составляющих оптического излучения, формируемого лазером CW. Схемотехника таких модуляторов базируется, как правило, на MZM (рис.1.21, 1.22) и электронных компонентах логических кодеров. Электронными компонентами создаются необходимые уровни напряжений кодируемого сигнала и такты формирования оптических импульсов для управления несколькими MZM.

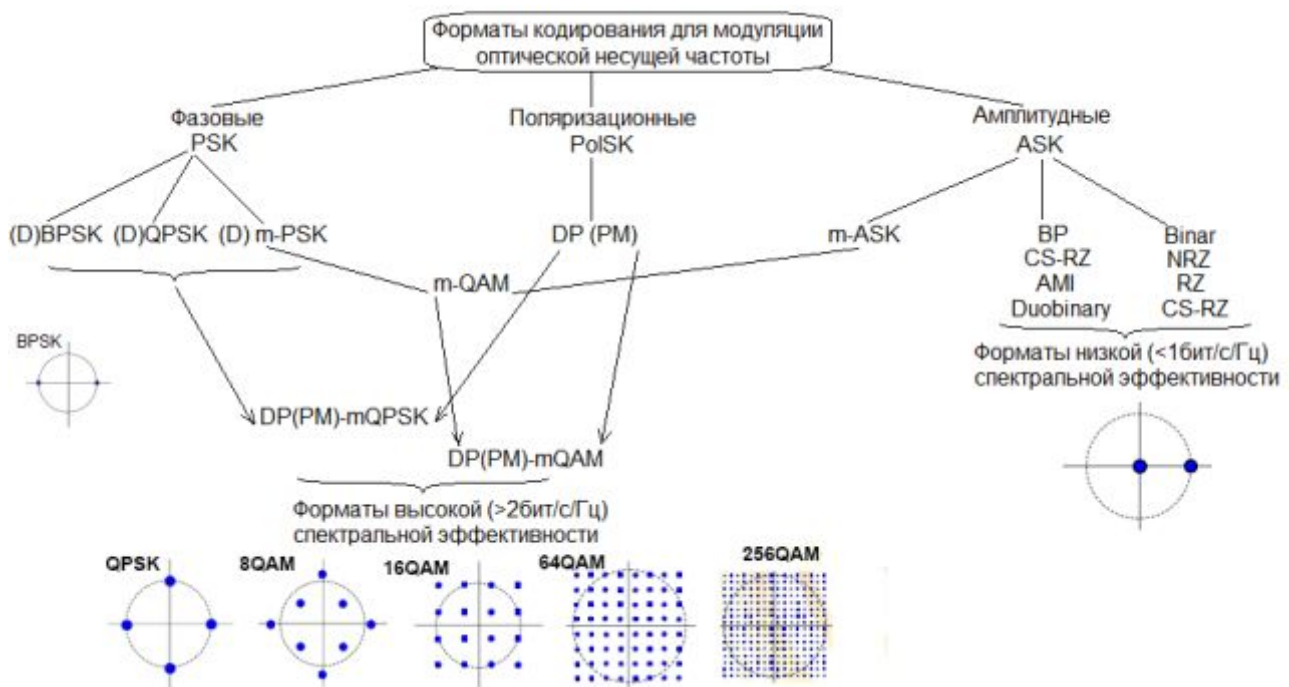


Рис. 1.31. Виды форматов модуляции для передачи в оптических каналах

Электрические сигналы, закодированного информационного потока, управляют амплитудным и фазовым состоянием оптических импульсов. Эти состояния принято для наглядности представлять диаграммами состояний, где по горизонтальной оси отмечаются амплитуды, а по вертикальной оси фазы импульсов оптического излучения. При наращивании скорости передачи информационных данных и для сохранения полосы частот оптического канала используется амплитудно-фазовое и поляризационное кодирование, что способствует увеличению спектральной эффективности использования полосы канала от низкой (менее 1 бит/с/Гц) до высокой (свыше 2 бит/с/Гц),

достигающей величины 12 бит/с/Гц. Амплитудные форматы кодирования ASK (BP - bipolar, CS-RZ - carrier suppressed return to zero , AMI - alternate mark inversion , RZ - return to zero , NRZ - non return to zero , binary) не представляют интереса для терабитовых систем из-за их низкой спектральной эффективности. Предметно могут рассматриваться в сравнении форматы высокой спектральной эффективности с применением амплитудно-фазового и поляризационного кодирования DP(PM) - mPSK, DP(PM)-mQAM (m=4, 8, 16 и т.д.). Пример для сравнения форматов модуляции по спектрам представлен на рис.1.32. Видно, что формат модуляции может повысить спектральную эффективность с 2 бит/с/Гц до 4 бит/с/Гц без учёта поляризационного мультиплексирования PM.

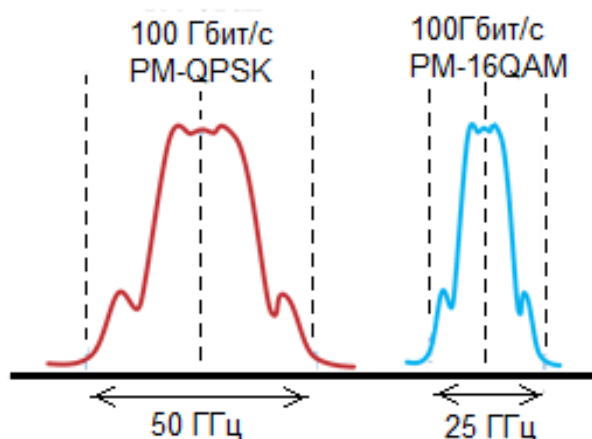


Рис.1.32. Спектры форматов оптической модуляции для цифрового сигнала 100Гбит/с

Однако для высокоуровневых решений по форматам существуют ограничения. Эти ограничения спектральной эффективности модуляционных форматов связаны, прежде всего, с оптическими шумами, протяженностью оптического канала, числом допустимых амплитудно-фазовых состояний, полосой частот оптического канала. Теоретические ограничения объясняются критерием Шеннона

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right),$$

где C – пропускная способность оптического канала (бит/с), B – полоса частот оптического канала (Гц), S – мощность оптического канального сигнала, N – мощность шума в оптическом канале.

Уточнённые соотношения Шеннона для различных форматов модуляции на передаче и детектировании на приёме показывают преимущество когерентного приёма [17]:

Прямая модуляция (амплитуда+фаза) с прямым детектированием в системе

$$\frac{C}{B} \cong \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

Фазовая модуляция с когерентным детектированием

$$\frac{C}{B} \cong \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{S}{N} \right) + 1.1$$

Прямая модуляция (амплитуда+фаза) с когерентным детектированием

$$\frac{C}{B} \cong \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{S}{N} \right) - 1.0$$

Пример взаимосвязи между теорией Шеннона (Shannon limit) и практическими результатами представлен на рис.1.33. Практические результаты имеют нелинейные ограничения в волоконных световодах, т.к. поддержание заданного OSNR при увеличении спектральной эффективности требует увеличения оптической мощности многопозиционного оптического сигнала, что неминуемо приводит к известным нелинейным эффектам стекловолокна. Такой предел спектральной эффективности получил название «Нелинейный предел Шеннона».

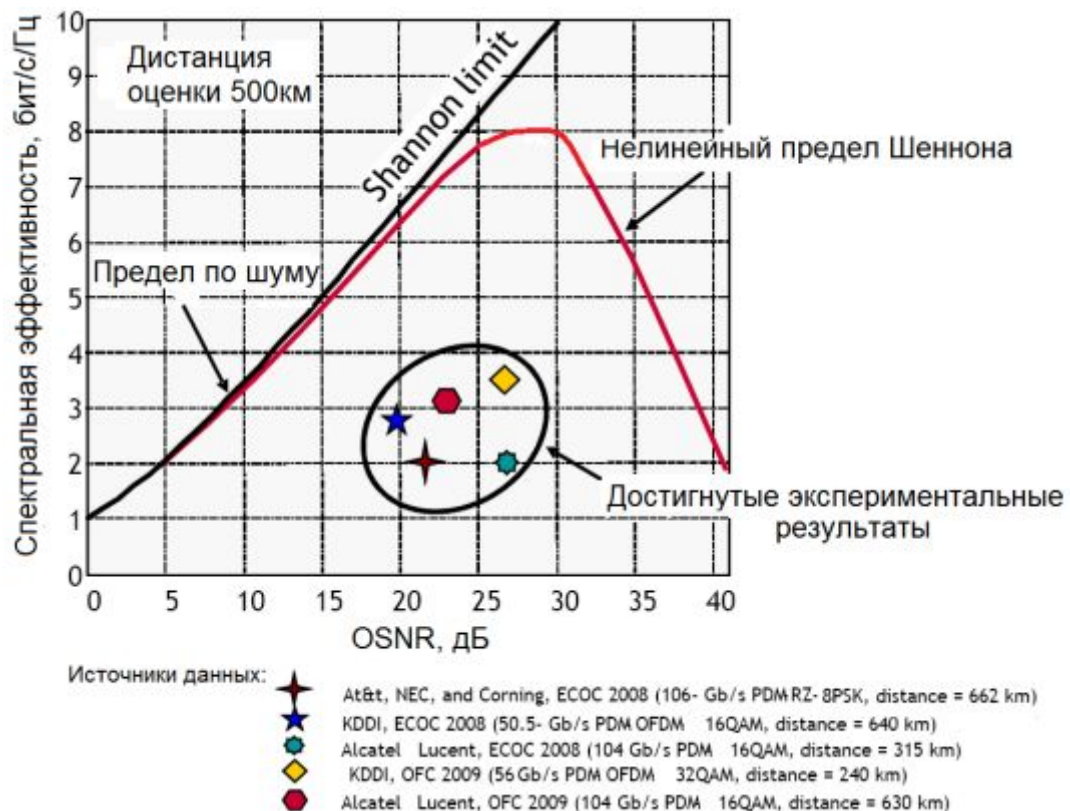


Рис. 1.33. Теоретический и экспериментальный пределы спектральной эффективности оптических систем

Для достижения скоростей передачи до 1 Тбит/с в спектральном канале с полосой частот до 100 ГГц необходимо иметь спектральную эффективность не менее 10 бит/с/Гц. Какими путями этого можно достигнуть?

Известны несколько способов:

- на протяженных секциях оптической передачи и мультиплексирования применять малозумные рамановские оптические усилители вместо примесных (EDFA, TDFA);
- использовать упреждающую коррекцию ошибок (FEC, forward error correction) в электронной обработке сигнала на передаче и приёме при качестве сигнала в линии с коэффициентом ошибок около 10^{-3} ;
- использовать волоконные световоды с наименьшим коэффициентом нелинейности;
- использовать поляризационное мультиплексирование (PM, polarization multiplexing), например, двойную поляризацию (DP, dual polarization);
- применять многопозиционную модуляцию m - QAM (m=8, 16, 32, 64, 128, 256, и т.д. (рис.1.34)) и m - PSK;
- применить формат плотного расположения поднесущих частот оптических каналов OFDM.

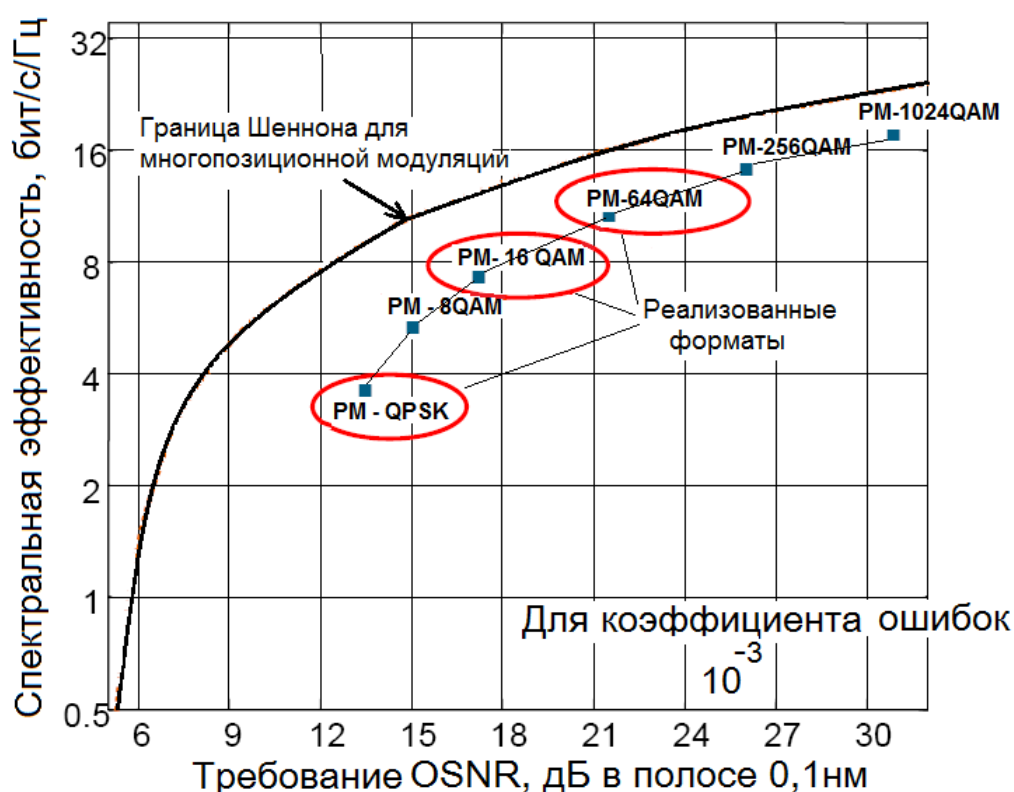


Рис. 1.34. Рост спектральной эффективности и требование по OSNR

Для практической (расчётной) оценки OSNR важен параметр штрафа за ухудшение соотношения сигнал/шум при росте числа позиционных состояний и

снижении информационной или символьной скорости (ГБод/с). Пример такой оценки штрафа представлен на рис.1.35, где заметно, что рост штрафа становится сопоставимым с энергетическим потенциалом реальных каналов, например, когерентный интерфейс Cisco (www.cisco.com) на скорости 120 Гбит/с имеет потенциал 14 - 20 дБ при штрафе 0,5 дБ за формат PM-QPSK. Данное обстоятельство указывает на необходимость сокращения дистанции передачи оптического канала в два и более раз для выполнения требования по OSNR при заданном коэффициенте ошибок.

Детальные исследования ряда модуляционных форматов, приведённые в [18], показывают на сокращение дистанций оптических каналов с ростом спектральной эффективности для цифровых потоков оптической иерархии OTN OTU - 4 на скорости 112 Гбит/с (рис.1.36).

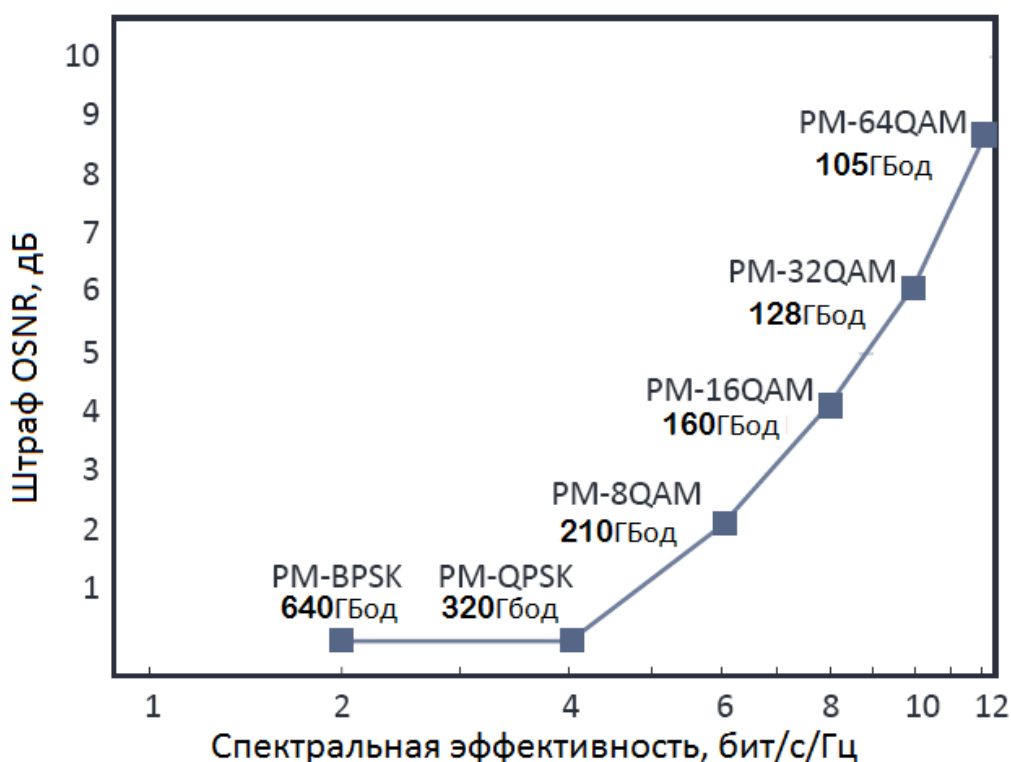


Рис. 1.35. Взаимосвязь спектральной эффективности и штрафа за ухудшение OSNR в оптическом канале с различными форматами модуляции на скорости 1 Тбит/с

При этом в лучшем состоянии оказываются оптические каналы, организуемые в волокнах SMF по сравнению с волокнами NZDSF, с максимальным интервалом между оптическими каналами 50 ГГц в сравнении с интервалами до 27,75 ГГц. Теоретически достижимой скоростью передачи информационных данных в одной паре стандартных одномодовых волокон на расстояние не более 500 км (характерно для организации связи внутри крупных мегаполисов) является величина около 25 Тбит/с [2]. При использовании стандартного волоконно-оптического кабеля с числом волокон 48 можно

получить общую скорость 0,6 Пбит/с. На протяженных линиях междугородней связи (более 2000 км) возможна реализация скорости до 8 Тбит/с на пару волокон и при использовании стандартного оптического кабеля с числом волокон 48 можно получить общую скорость 192 Тбит/с, что превосходит все существующие на сегодня пропускные способности оптических транспортных сетей. Однако для получения петабитовых скоростей нужно либо наращивать волоконную ёмкость кабеля и объёмы оборудования DWDM, либо искать принципиально другие решения без изменения ёмкости кабеля, числа параллельно проложенных кабельных линий и числа стоек с поддонами электрических и оптических мультиплексоров в узлах связи, с соответствующим ростом энергопотребления и снижением надёжности.

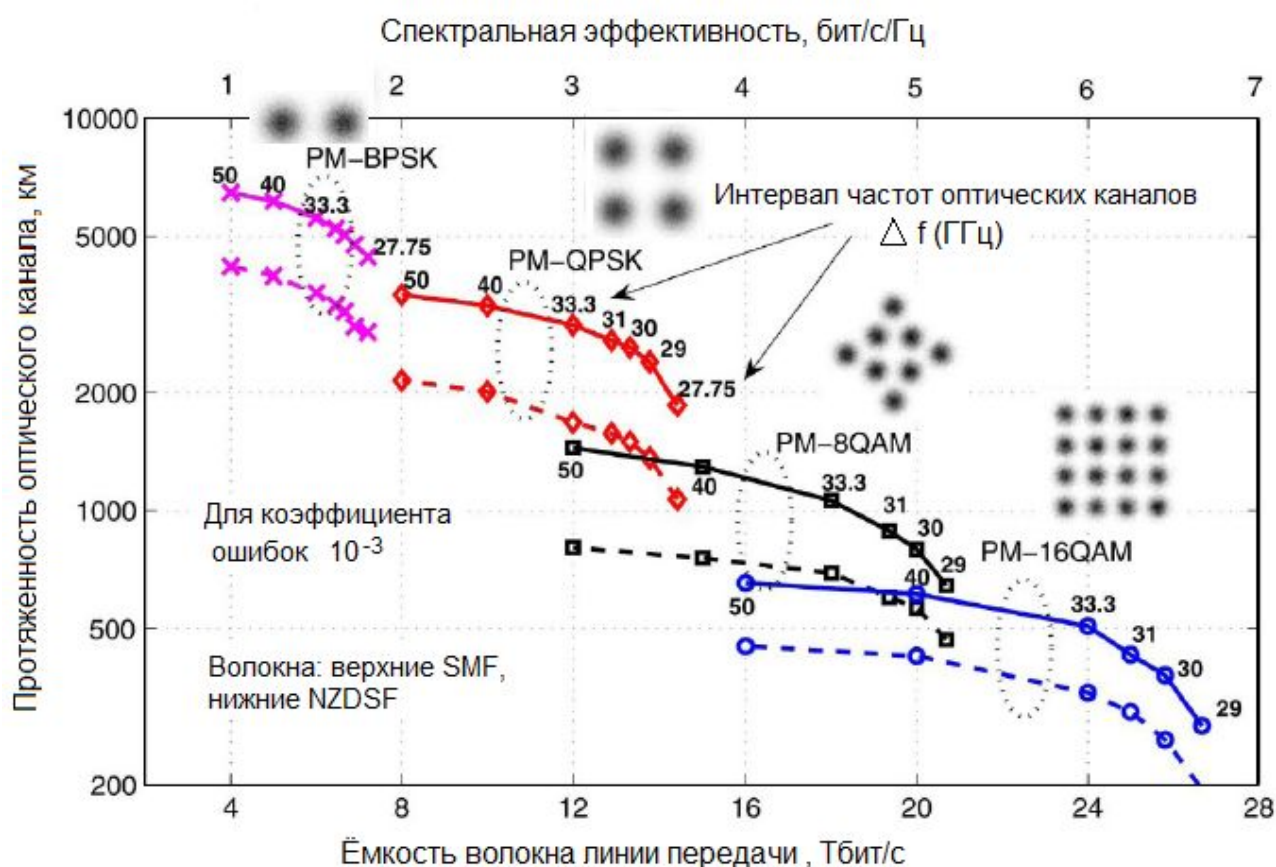


Рис. 1.36. Возможности по организации оптических когерентных каналов со скоростью 112 Гбит/с в системах с DWDM на различных волоконных линиях

1.5. Выводы

Для увеличения скорости передачи информационных сигналов в оптических каналах требуются высокоэффективные форматы модуляции.

Для увеличения числа оптических каналов необходимо для существующих волокон с применением C, L диапазонов использовать и диапазоны O, E, S.

Для преодоления ограничений затухания и дисперсии оптического волокна необходимо применение различных оптических усилителей и компенсаторов дисперсии.

Для построения высокоэффективных передатчиков и приёмников необходимы перестраиваемые одномодовые лазеры с узким спектром излучения и высокочувствительные широкополосные и селективные фотодетекторы с минимальными собственными шумами и оптические усилители, совмещённые с передатчиками и приёмниками.

Для достижения высоких скоростей передачи в оптических каналах (терабитных и петабитных) требуется применение многопозиционных форматов модуляции (от 16 и до 256).

Формирование высокоскоростных оптических сигналов с многопозиционными форматами ограничивает дистанции оптических каналов.

Контрольные вопросы

1 Какая полоса пропускания у современного одномодового оптического волокна?

2 Какие частотные и волновые интервалы между спектральными каналами DWDM предусмотрены стандартами?

3 Что необходимо для передачи информационных импульсных сигналов в волоконных линиях?

4 Чем принципиально отличаются форматы модуляции оптического излучения RZ и NRZ?

5 Как принято оценивать ширину спектральной линии источника оптического излучения?

6 Какие диапазоны волн одномодовых волокон предусмотрены для протяженных оптических линий DWDM?

7 Какие скорости передачи цифровых потоков доступны в линиях с DWDM в формате NRZ?

8 Какие ограничения создаёт дисперсия в оптическом волокне?

9 Чем отличаются волокна SMF и NZDSF в части дисперсии?

10 Какое назначение имеет волокно DSF?

11 Почему в стекловолокнах ограничивают мощность оптического сигнала?

12 Какие штрафы предусмотрены при оценке передачи оптических сигналов в волоконных линиях?

13 Как сказывается увеличение числа спектральных каналов на величине уровня мощности каждого из каналов?

14 Какие параметры оптических волокон снижают роль нелинейных эффектов при передаче оптических сигналов?

15 Какие приборы используют для построения оптических передатчиков и приёмников?

16 Что представляет собой лазер CW?

17 Как перестроить длину волны излучения и мощность лазера CW?

- 18 Чем формируется узкий одномодовый спектр излучения лазера CW?
- 19 В каких пределах может изменяться волна излучения лазера CW при перестройке?
- 20 Какое назначение в оптических передатчиках имеет MZM?
- 21 Какие преимущества имеют когерентные оптические приёмники?
- 22 Что относится к функциям цифровой обработки сигналов в когерентном приёмнике?
- 23 Какие особенности имеют фотодетекторы для высокоскоростных когерентных приёмников?
- 24 Какие разновидности оптических усилителей используются в современных ВОСП-WDM?
- 25 Чем принципиально отличаются оптические усилители EDFA, Raman, SOA?
- 26 Почему в оптических каналах накапливаются шумы?
- 27 Чем оценивается накопление шума в оптических каналах?
- 28 Что показывает критерий Шеннона?
- 29 Что обозначает нелинейный предел Шеннона для оптических каналов?
- 30 Что такое спектральная эффективность оптического канала?
- 31 Какой должна быть спектральная эффективность оптического канала для организации передачи на скорости 1Тбит/с в полосе канала 50ГГц с использованием DP?
- 32 Чем может быть достигнута высокая спектральная эффективность?
- 33 Чем нужно «заплатить» за увеличение спектральной эффективности?

2. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ

Для повышения эффективности существующих систем передачи на основе стандартных одномодовых волокон (G.652, G.653, G.655, G.656) возможны решения, частично уже обозначенные выше и дополнительные, связанные с применением компенсации дисперсионных искажений и оптического усиления, детальным исследованием когерентного приёма и цифровой обработкой сигнала, переходом в транспондерах на многоуровневые форматы модуляции, поляризационное мультиплексирование. В разделе обсуждаются возможности и ограничения для систем передачи в ключе этих позиций. В приложении 2 приведена общая схема повышения эффективности систем оптической передачи.

2.1. Использование компенсаторов дисперсии и оптических усилителей

С ростом скорости передачи информационных данных, представленных в оптическом канале различными форматами, повышает требования к допустимой величине дисперсионных искажений (рис.2.1). Наибольшие искажения вносятся хроматической дисперсией и накоплением ПМД.

На протяженных линиях волоконно-оптической связи величины дисперсии составляют сотни и десятки сотен пс/нм (например, при длине линии в 1000км на волокнах G.652 для волны 1550нм совокупная хроматическая дисперсия составит около 18 000пс/нм), что требует применения специальных технических решений по компенсации дисперсионных искажений практически для любого формата оптического сигнала.

Несколько меньшая величина дисперсионных искажений от ПМД (например, при длине линии в 1000 км на волокнах G.652 $\text{ПМД}=0,2 \text{ пс/км}^{0,5}$ совокупная дисперсия составит около 66пс, что в примере на рис.2.1 допустимо только для формата низкой спектральной эффективности ODB), которая накапливается не только в волокне, но и в оптических устройствах аппаратуры и также ограничивает возможности передачи оптических сигналов, и требует решений по компенсации.

Какие технические решения по компенсации дисперсии существуют? Чем они отличаются? В чём их достоинства, недостатки и эффективность применения? На эти вопросы необходимо далее сформулировать обоснованные ответы.

На протяженных оптических линиях для компенсации вносимых потерь оптической мощности применяются различные оптические усилители. Сочетание в одной промежуточной (оконечной) станции компенсатора дисперсии и усилителя мощности позволяет восстанавливать оптические сигналы с высокой точностью. При этом каскадное включение большого числа (как правило, более 10) оптических усилителей приводит к снижению оптического отношения сигнал/шум (OSNR) по причине накопления шума спонтанной эмиссии усилителей, от которого практически невозможно

избавиться. Кроме того, различные схемы использования компенсаторов дисперсии и усилителей могут порождать дополнительные ухудшения OSNR, например, вызванные нелинейными оптическими эффектами в волокне компенсатора, что накладывает ограничения на дистанции между усилителями, величину усиления, равномерность усиления и т.д.



Рис. 2.1. Пример допустимых значений дисперсии для различных форматов данных для скорости 100 Гбит/с в оптическом канале [20]

Схемы линейных трактов оптических систем передачи обычно рассматриваются для диапазона длин волн 1490 - 1625 нм, т.е. того участка, где организуют оптические каналы DWDM (50, 100 ГГц) со скоростями 100 Гбит/с и выше. В этом диапазоне волн эффективно работают усилители Рамана и волоконные усилители с эрбием (EDFA). Также для этого диапазона разработаны волоконные компенсаторы хроматической дисперсии на основе волокон DCF. Известен ряд типов волокон DCF, например, волокна DCF3 с большим значением отрицательной дисперсии ($-49 \dots -30$ пс/нм $\times$ км), с эффективной площадью 48 мкм^2 , с собственными потерями 0,22дБ/км для компенсации дисперсии SMF (G.652), волокна DCF38 с малым значением отрицательной дисперсии ($-4,3 \dots -1,6$ пс/нм $\times$ км), с эффективной площадью 27 мкм^2 , с собственными потерями 0,265 дБ/км для компенсации дисперсии NZDSF (G.655, 656) и ПМД менее $0,05 \text{ пс/км}^{0,5}$ [21]. Эти волокна могут служить в качестве линейных волокон, включаемых в состав оптического кабеля для построения комплексной линии (рис. 2.2), где чередуются кабели с волокнами G.652 и DCF3, или G.655 и DCF38. На стыке различных по характеристикам волокон используется оптическое устройство согласования – оптический трансформатор, снижающий потери на отражение.

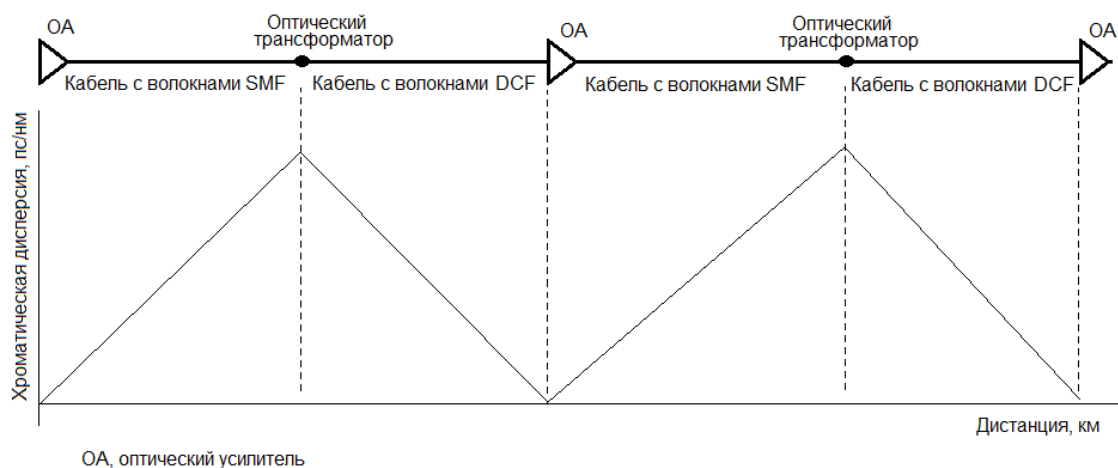


Рис. 2.2. Волоконно-оптическая линия с компенсирующими дисперсию волокнами

Альтернативным вариантом построения волоконно-оптической линии с компенсацией хроматической дисперсии может служить схема с модульным исполнением компенсации дисперсии (рис.2.3), где используются волокна с большим, чем в стандартных волокнах, удельным значением отрицательной хроматической дисперсии ($-115 \text{ пс/нм} \times \text{км}$), эффективной площадью не более 21 мкм^2 , затуханием $0,4 - 0,53 \text{ дБ/км}$ [22]. При этом модули имеют привязку к длине волокна линии, например, 40 км (-680 пс/нм на волне 1550 нм) с вносимыми потерями $2,7 \text{ дБ}$, 60 км (-1020 пс/нм на волне 1550 нм) с вносимыми потерями 4 дБ , 100 км (-1700 пс/нм на волне 1550 нм) с вносимыми потерями $6,2 \text{ дБ}$.

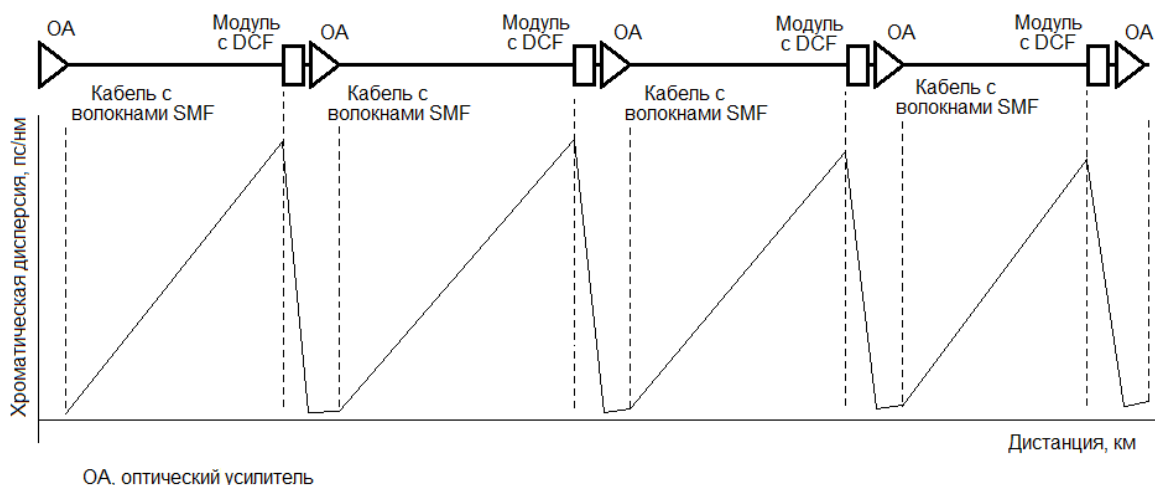


Рис. 2.3. Волоконно-оптическая линия с модулями компенсации дисперсии

Учитывая, что модули компенсации дисперсии (МКД) вносят дополнительные потери оптической мощности сигналов перед приёмником, возможен вариант включения этих модулей после оптических передатчиков с оптическими усилителями, компенсирующими потери. Такое применение МКД называется предкомпенсацией (рис.2.4). Однако существенным недостатком

предкомпенсации является образование нелинейных помех в МКД из-за высокого коэффициента нелинейности, обусловленного меньшей площадью сердцевины и высокой концентрацией оптической мощности в малом объеме. Также предкомпенсация дисперсии на передаче способствует нелинейным искажениям в линейном волокне (табл.1.6), т.к. наличие дисперсии способствует распределению оптической мощности сигналов DWDM на протяжении волокна.

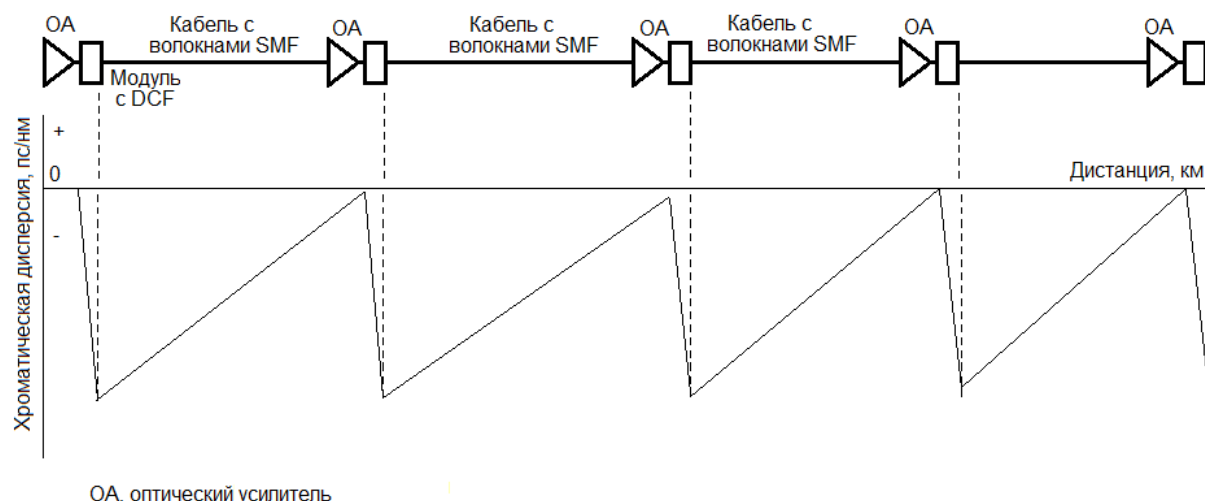


Рис. 2.4. Волоконно-оптическая линия с модулями предкомпенсации дисперсии

Компромиссным решением по компенсации хроматической дисперсии принято считать совместное использование частичной предкомпенсации на передаче и полной компенсации на приёме (рис.2.5). При этом предкомпенсаторы могут устанавливаться перед усилителями оптической мощности (бустерами, от англ. booster), что понижает вероятность образования нелинейных помех для сигналов DWDM. Однако это решение не устраняет вероятность образования нелинейных помех.

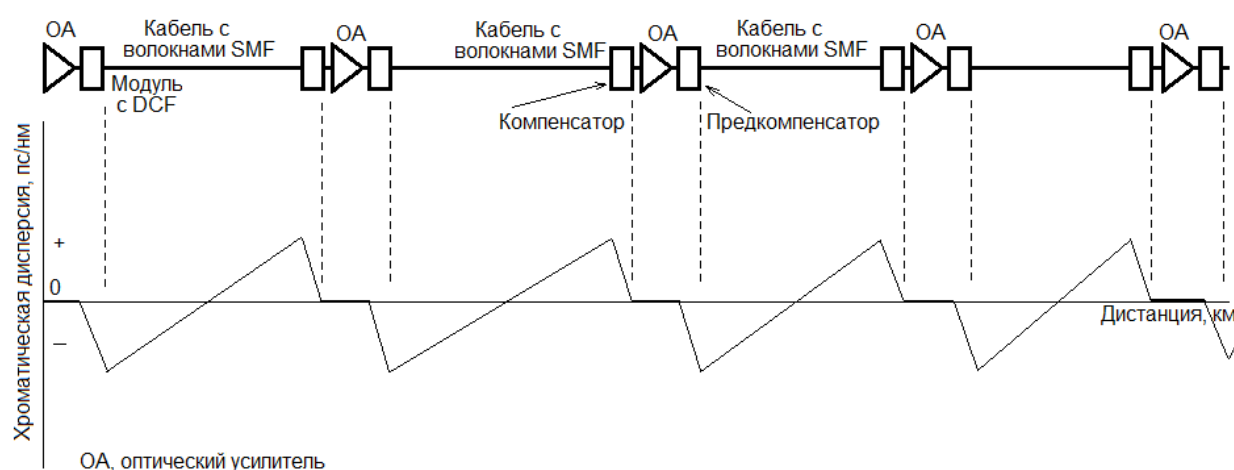


Рис. 2.5. Волоконно-оптическая линия с модулями предкомпенсации и компенсации дисперсии

Свойства волокон DCF могут использоваться не только для компенсации хроматической дисперсии, но и для поддержания необходимого соотношения OSNR при использовании накачки этих волокон в режиме распределённого рамановского усиления и также совместно с эрбиевыми усилителями (рис.2.6). Рамановские оптические усилители, как известно, имеют низкий шум спонтанной эмиссии по сравнению с эрбиевыми и пригодны для предварительного усиления, т.е. как минимум компенсации затухания волокон DCF за счёт распределённого усиления по длине этих волокон.

К общим недостаткам всех выше рассмотренных схем компенсации хроматической дисперсии относится:

- вероятность образования и накопления нелинейных помех, что снижает OSNR на приёмной стороне оптического канала;
- применение пассивной компенсации приводит к дополнительным потерям оптической мощности и фактически требует сокращения длины усилительной секции, при этом повысить оптическое усиление для поддержания максимальных длин секций не представляется возможным из-за нелинейных эффектов в волоконной линии;
- необходимость использования различных номенклатур компенсаторов (на разные длины участков, на разные волокна) и средств их сопряжения (переходных оптических трансформаторов) с линейными волокнами из-за различной эффективной площади сердцевин волокон, также модули компенсации дисперсии имеют ограниченную температурную стабильность;
- необходимость применения на протяженных линиях (как правило, более 2000км) адаптивных компенсаторов ПМД.

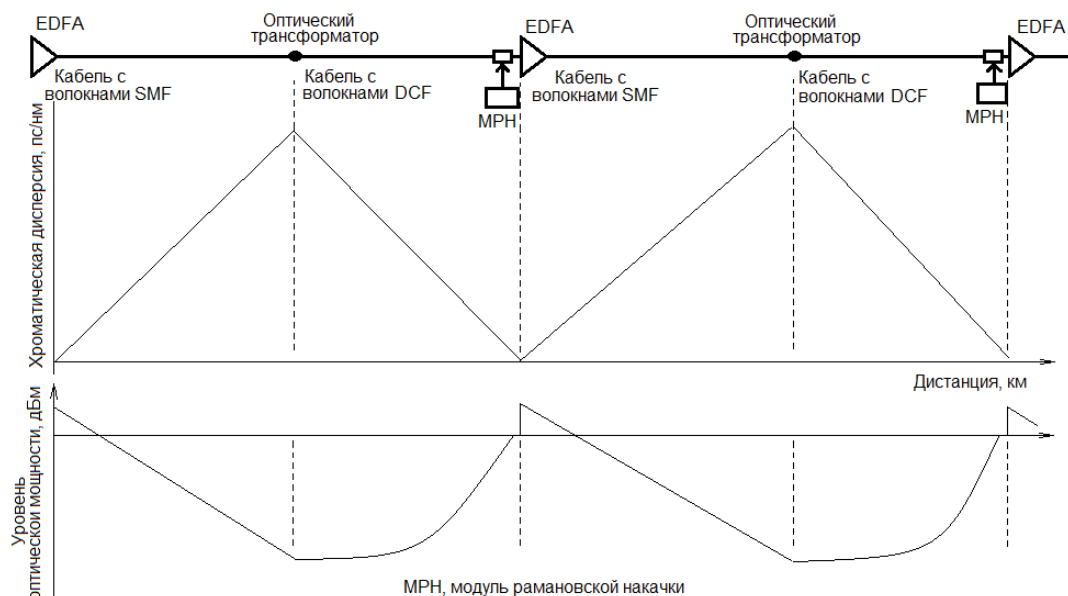


Рис. 2.6. Волоконно-оптическая линия с компенсацией дисперсии и смешанным эрбиево-рамановским усилением

Решением по всем недостаткам компенсации дисперсии в оптических каналах с высокой скоростью передачи (100 Гбит/с и выше) служит применение цифровой обработки, принятого и преобразованного в электрический формат, каждого канального сигнала в системе DWDM средствами транспондеров (рис.2.7). Общий вид этого решения представлен на рис.1.26, где для компенсации дисперсии предусмотрены два алгоритма (компенсации хроматической дисперсии и динамический эквалайзер для ПМД), реализуемые в схеме оптического процессора с другими алгоритмами коррекции и восстановления цифрового сигнала.

Это решение позволяет свести к минимуму образование нелинейных помех в системе DWDM, уменьшить количество пассивных компонент в оптическом канале, не применять волоконные световоды с низким порогом нелинейных эффектов. Достигнуты динамические возможности по компенсации накопленных дисперсионных искажений до 70 000 пс/нм, что при стандартном значении дисперсии SMF на волне 1550 нм 18 пс/нм×км позволяет организовать оптический канал на дистанции около 3,8 - 4,0 тысяч км.

Необходимо также отметить, что помимо рассмотренных способов компенсации дисперсионных искажений в оптических линиях и каналах возможны другие реализации, например, компенсаторы дисперсии с брэгговскими волоконными решетками, отличающимися низкими потерями мощности и недостаточной полосой рабочих частот при использовании в DWDM – системах, сложностью перестройки под длины волокон; компактные компенсаторы с перестраиваемыми волноводными решетками, рассчитанными на ограниченный диапазон волн (1530 - 1560 нм) и диапазон перестройки (± 2500 пс/нм, т.е. компенсация дисперсии SMF на волне 1550 нм до 150 км), но с простым размещением в составе транспондера.

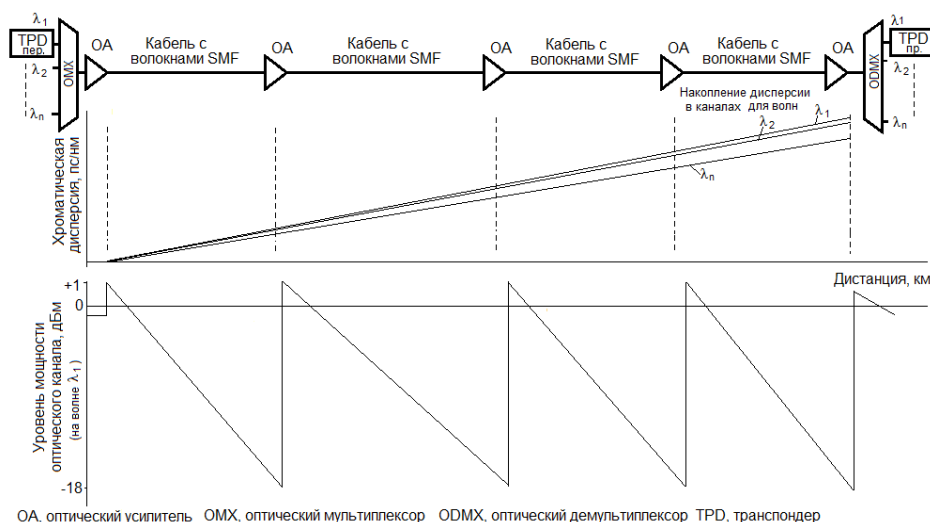


Рис. 2.7. Волоконно-оптическая линия с модулем обработки канального сигнала для компенсации дисперсии в приёмной части транспондера $TPD_{пр}$.

Также важным достижением в компенсации дисперсии и снижении нелинейных эффектов волокон можно считать метод JNLCD (joint nonlinearity and chromatic dispersion pre-compensation method for CO-OFDM systems – метод предкомпенсация хроматической дисперсии и нелинейности для когерентных систем OFDM), разработанный для оптических суперканалов на скоростные режимы до 1Тбит/с [89]. Оптическая предкомпенсация нелинейности и дисперсии волоконного световода позволяют на несколько дБ снизить пороговое значение OSNR и тем самым создаётся возможность нарастить мощность каждого оптического канала для преодоления затухания протяженных секций передачи.

2.2 Использование когерентного приёма и цифровой обработки сигнала

Применение когерентного приёма для сигналов с многоуровневыми форматами сигналов позволяет получить существенный выигрыш в чувствительности приёмника (рис.1.24), оцениваемый через величину фототока в балансном фотодетекторе с чувствительностью R , величиной мощности входного сигнала P_s и мощностью оптического гетеродина P_l :

$$I(t) = 2R\sqrt{P_s P_l} \cos\{\phi_s(t) - \phi_l(t)\}. \quad (2.1)$$

Для когерентного приёма сигналов DP-QPSK Международный Оптический Форум (OIF) рекомендовал значения уровня мощности оптического гетеродина для различных уровней оптического сигнала на входе приёмника (таб.2.1).

Табл. 2.1 Рекомендованные OIF предельные характеристики оптической мощности и токов для фотодиодов с чувствительностью 0,8 А/Вт

Уровень мощности сигнала, дБм	Уровень мощности гетеродина, дБм	Величина фототока в каждом детекторе, мА
0	3	0,715
-3	6	0,715
-6	9	0,715
-10	13	0,715
-13	16	0,715
-16	16	0,506
-18	16	0,402

При этом выигрыш от применения гетеродина, согласно табл. 2.1, может составить от 3 дБ до 34 дБ. Такой выигрыш предполагает в последующем сложную алгоритмическую обработку детектированного оптического сигнала, называемую цифровой обработкой.

Виды цифровой обработки сигнала после фотодетектирования представлены на рис.1.25. Каждый этап обработки предусматривает свои алгоритмы:

- алгоритм аналого-цифрового преобразования;
- алгоритм восстановления тактовой частоты;
- алгоритм компенсации накопленной хроматической дисперсии в структуре трансверсального и/или рекурсивного цифрового фильтра;
- алгоритм компенсации накопленной поляризационной модовой дисперсии в структуре цифрового эквалайзера;
- алгоритм восстановления оптической несущей частоты и фазы для выравнивания квадратурных компонент (алгоритм Витебри) для получения гомодинного приёма;
- алгоритм восстановления цифрового потока с приемлемым коэффициентом ошибок BER (не хуже 10^{-2}).

К цифровой обработке относится и восстановление качества цифрового сигнала, соответствующего заданному коэффициенту ошибок не хуже 10^{-12} в оптических каналах сети OTN/ОТН. Для этого в составе цифрового блока OTUk (Optical channel Transport Unit, транспортный блок оптического канала) (рис.2.8), где k=1,2,3,4 (в перспективе 5-й на 480 Гбит/с, 6-й на 1 Тбит/с) уровни иерархии с соответствующими скоростями передачи G.709 ITU-T, предусмотрен блок упреждающей коррекции ошибок FEC (forward error correction).

Блок FEC, являясь избыточным по ёмкости (255×4) байт, позволяет обнаруживать и исправлять большинство ошибок полей нагрузки и заголовков при самых неблагоприятных условиях приёма, т.е. при малом OSNR (рис.2.9). Для этого используются различные виды кодирования проверочных групп байт, например, коды Рида-Соломона RS (Reed–Solomon) с различными структурами блоков (255/239), (255/241), для которых правила кодирования подробно представлены в [23, 24]. Выигрыш от применения этого вида цифровой обработки имеет размерность энергетического потенциала (на примере, от 3дБ до 9дБ и до 12дБ в зависимости от избыточности поля FEC от 7% до 20% и 30%).

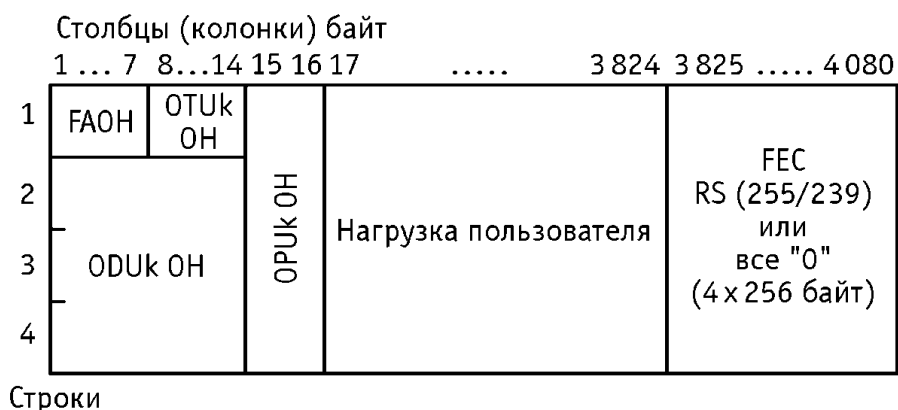


Рис. 2.8. Структура цифрового блока OTUk для передачи информационных данных в оптических каналах

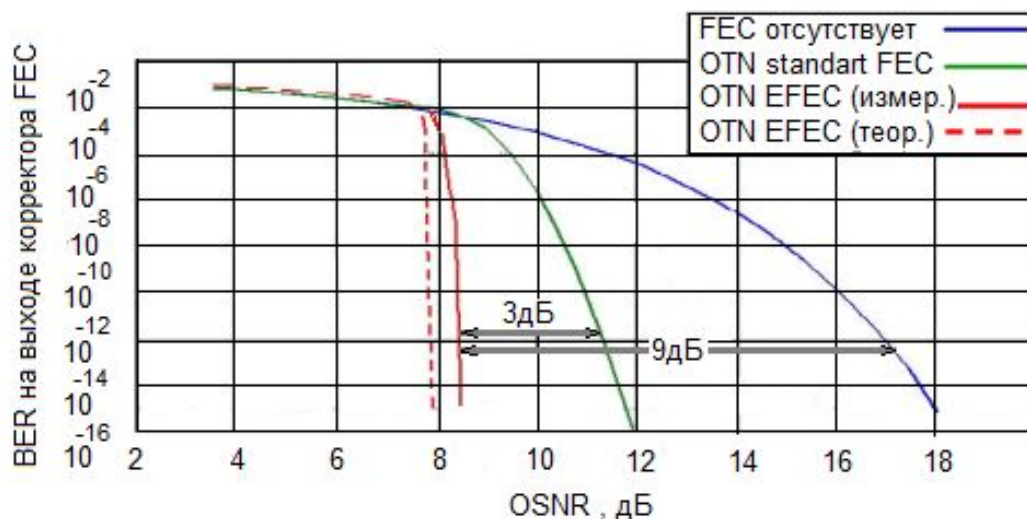


Рис. 2.9. Выигрыш от применения FEC в оптических каналах [23]

Выигрыш от использования FEC с наибольшей избыточностью 30% актуален при переходе к скорости 448 - 480 Гбит/с (4×112 и 4×120 Гбит/с) в полосе частот канала, не превышающей 100 ГГц и не менее 50 ГГц, с приемлемой спектральной эффективностью 6-8 бит/символ, обусловленной нелинейным пределом Шеннона (рис.2.10) и форматом кодирования [99].

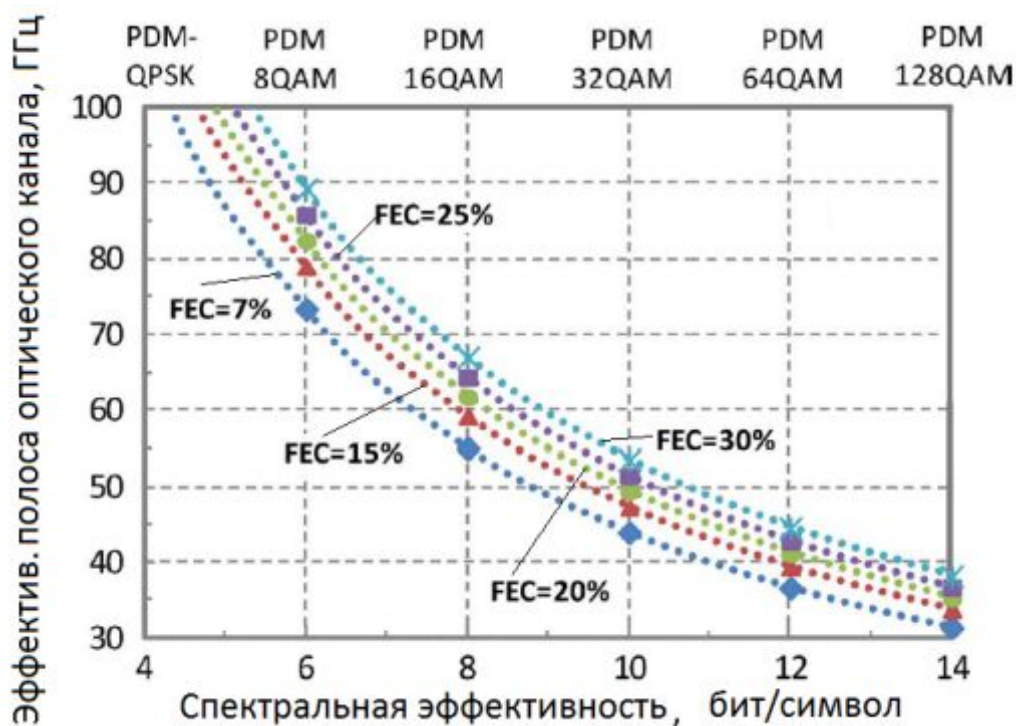


Рис.2.10. Применение FEC для оптического канала 448-480 Гбит/с

Цифровая обработка принятого сигнала в когерентной системе реализуется в оптических процессорах на основе схем перепрограммируемых универсальных процессорных логик FPGA (field - programmable gate array, программируемая пользователем вентильная матрица — полупроводниковое устройство, конфигурируемое производителем или разработчиком после изготовления).

Т.о., когерентный приём и цифровая обработка принятого информационного потока данных вместе с существенным усложнением и удорожанием оборудования по причине использования многопозиционных оптических сигналов в состоянии решить задачи по реализации скоростей передачи данных свыше 100 Гбит/с на требуемых дистанциях между узлами сетей связи.

2.3. Использование многоуровневых форматов модуляции, поляризационного мультиплексирования и суперканалов

Достигнуть терабитной скорости передачи в волоконном световоде можно относительно просто с использованием 10 спектральных каналов с сеткой частот 50 и 100 ГГц и многоуровневых форматов модуляции, начиная с двухфазного кодирования с мультиплексированием двух поляризованных мод PDM-BPSK (polarization-division multiplexed - binary phase-shift keying) и заканчивая 16-ю квадратурными состояниями с мультиплексированием двух поляризованных мод PDM-16QAM (polarization-division multiplexed - quadrature amplitude modulation) (рис.2.11). Нарастивание числа квадратурных компонент повышает спектральную эффективность и приближает скорость передачи информационных данных к 480 Гбит/с в стандартных оптических каналах в тех же сетках часто 50 - 100 ГГц. Однако это ведёт к существенному возрастанию требования по OSNR (табл.2.2), которое превышает 30 дБ. Сформировать оптический канал с многопозиционной модуляцией и поляризационным мультиплексированием для скорости 1Тбит/с в сетке частот 100 ГГц не представляется возможным из-за символьной скорости свыше 100 ГБод. В этом случае требуется сетка оптических частот порядка 200 ГГц и поддержание OSNR около 30 дБ, что реально близко к энергетическому потенциалу оптического канала (34 - 36 дБ). Такое соотношение между энергетическим потенциалом и требуемым OSNR не позволяет получить протяженные оптические каналы свыше 50 км даже с использованием когерентного приёма.

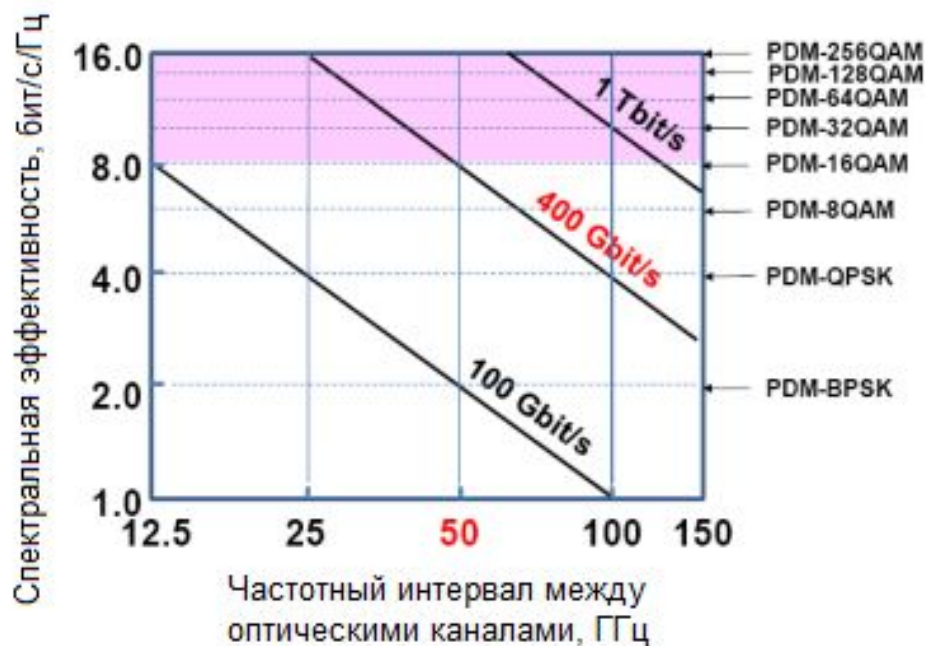


Рис. 2.11. Достижение терабитной скорости передачи в стандартном волокне

Достигнуть повышения спектральной эффективности более 10 - 12 бит/с/Гц при использовании только одной несущей оптической частоты в дальнейшем не представляется возможным, что показано в табл.2.2.

Выходом на новые решения по повышению скорости передачи в оптических каналах стало применение двух и большего числа оптических поднесущих частот в каждом канале, расположенных по спектру ближе, чем в стандартных сетках 12.5, 25, 50, 100 ГГц. Такие оптические каналы получили название – суперканалы. Формирование оптических поднесущих частот суперканалов предусматривается, как правило, от одного оптического генератора в некоторой нелинейной (волокна DCF) или линейной (модулятор MZM) оптической среде (рис.2.12). После формирования поднесущих частот производится их разделение пространственным оптическим фильтром – демультиплексором и последующая модуляция сигналами информационного потока, разделённого между модуляторами. Промодулированные поднесущие частоты объединяются оптическим мультиплексором в спектр суперканала. Сформированные таким образом, суперканалы объединяются другим оптическим мультиплексором в линейный групповой оптический сигнал (рис.2.13) с гарантированной защитной полосой между суперканалами.

Табл. 2.2. Характеристики многоуровневых форматов для достижения терабитовых скоростей в оптических каналах и волокнах [19]

Формат модуляции	PM-QPSK	PM-16QAM	PM-QPSK	PM-8QAM	PM-16QAM	PM-32QAM	PM-64QAM	PM-256QAM	PM-32QAM	PM-64QAM
Скорость, Гбит/с	100	200	400						1000	
Символьная скорость, ГБод	28-32	28-32	112-128	75-85	56-64	45-51	37-43	28-32	112-128	93-107
Символьная эффективность, бит/сим	4	8	4	6	8	10	12	16	10	12
Сетка частот, ГГц	50	50	200	133	100	80	67	50	200	166
Спектр. эффек. бит/с/Гц	2	4	2	3	4	5	6	8	5	6
Число каналов в полосе С	88	44	22	33	44	55	66	88	22	26
Общая ёмкость линии, Тбит/с	8.8	17.6	8.8	13.3	17.6	22	26.4	35	22	26
OSNR, дБ	12.2	19.2	18.2	20.2	22.2	24.2	26.7	> 30	28.2	30.7
Штраф относительно 100Гбит, дБ	0	7	6	8	10	12	14.5	> 20	16	18.5

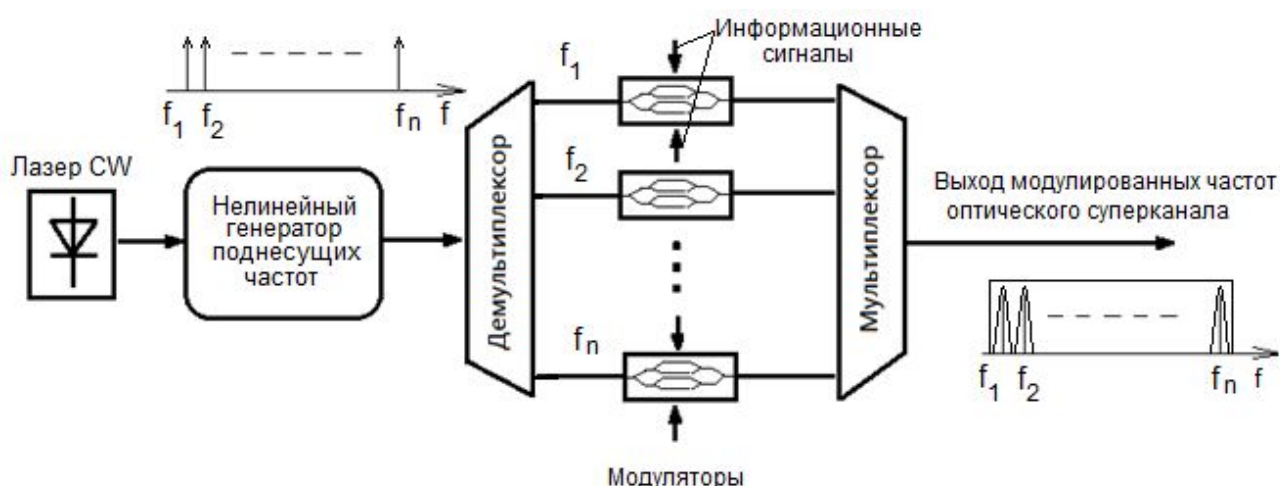


Рис. 2.12. Структура формирователя поднесущих оптического суперканала с нелинейным генератором

Для надёжного, с минимальными взаимными помехами разделения поднесущих частот на приёмной стороне суперканала используется чередование различных соседних поднесущих с ортогональной поляризацией (поляризационный интерливинг - перемежение) и совпадающих по частоте, но также ортогональных по поляризации поднесущих (поляризационное мультиплексирование PM) (рис.2.14).

Какая потребуется полоса частот для организации оптического суперканала на скорость 1 Тбит/с при использовании 10 потоков по 100 Гбит/с, формата модуляции на каждой поднесущей частоте QPSK и использовании WDM +

поляризационный интерливинг с частичным перекрытием спектров соседних сигналов?

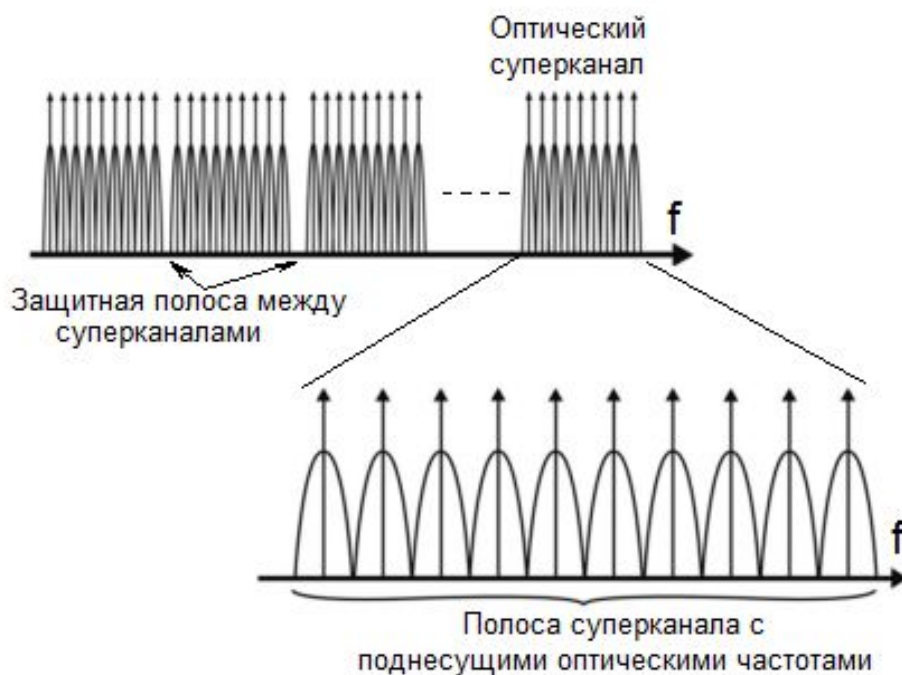


Рис. 2.13. Частотный спектр с оптическими суперканалами

В таком варианте построения суперканала возможно применение сетки частот 25 ГГц между поднесущими частотами. Общая полоса частот суперканала составит 250 ГГц. При использовании стандартной сетки волн 50 ГГц и формата DP-QPSK требуемая полоса частот оптической передачи на 1 Тбит/с составит 500 ГГц. Так можно удвоить спектральную эффективность с помощью организации оптического суперканала, сохранив дистанцию передачи, как для 100 Гбит/с канала, и возможности обработки суперканала в оптических мультиплексорах при коммутации.

Эти решения в настоящее время имеют перспективу дальнейшего развития и являются предметом разработок для практической реализации [25, 26, 27]. Основу этих разработок составляет теория OFDM (optical orthogonal frequency division multiplexing – оптическое ортогональное мультиплексирование частот).

Дополнительные возможности по наращиванию скорости передачи информационных сообщений могут обеспечить многосердцевинные волокна MCF (multicore fiber) с числом сердцевин от 2 до нескольких десятков, производство и применение которых уже начато и заслуживает особого внимания (пример конструкции на 7 сердцевин на рис.2.15). Тем более что внешние габариты волокон MCF (140 - 220 мкм) не существенно отличаются от волокон стандартных (125 мкм), т.е. SMF, NZDSF, разработаны приборы для сращивания таких волокон (сварка, разъёмные соединения), присоединения к оптическим передатчикам, приёмникам и тестирования (рефлектометры MCF).

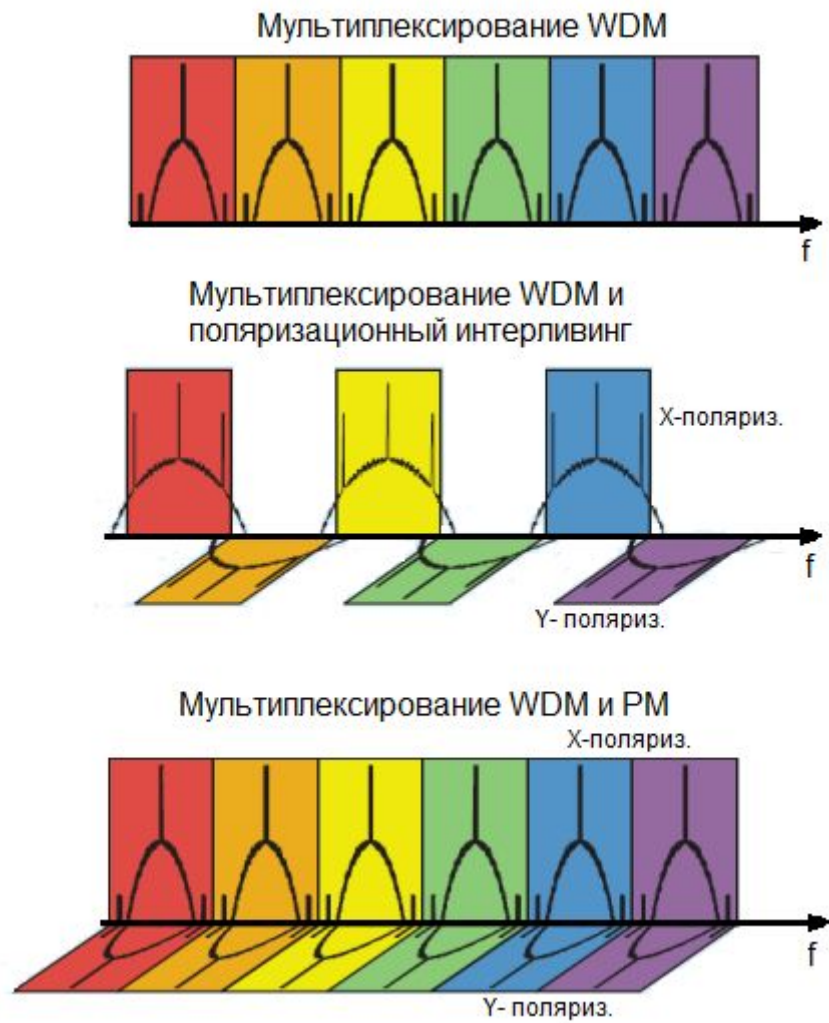


Рис. 2.14. Варианты мультиплексирования для построения суперканала

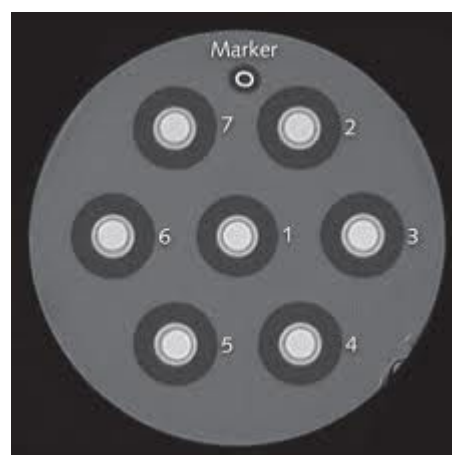


Рис. 2.15. Пример структуры MCF с семью сердцевинами

Такие волокна позволяют реализовать пространственное оптическое мультиплексирование OSDM (optical space division multiplexing) в параллельных средах (сердцевинах) и тем нарастить пропускную способность волоконных линий до терабитных и петабитных скоростей.

2.4. Выводы

Все рассмотренные позиции по наращиванию скорости передачи информационных сигналов в системах передачи ограничиваются реальными физическими пределами по соотношению сигнал/шум, нелинейными эффектами в волокнах, дистанцией передачи и т.д.

Для исключения наращивания волоконной ёмкости оптического кабеля принципиально использовать новые типы волокон, в частности, как с одной SCF (single core fiber) так и с множеством сердцевин MCF (multi core fiber) [28-48]. Внешне габариты этих волокон практически совпадают с геометрическими размерами стандартных волокон и имеют характеристики передачи близкие стандартным волокнам, что позволяет использовать их в стандартных кабельных конструкциях (от 4 волокон до 48 и более) (рис.2.16).

Переход к многоуровневым форматам передачи информационных данных (свыше 4 амплитудно-фазовых позиций), суперканалам на основе OFDM, с поляризационным PM и модовым мультиплексированием позволяет получить скорости передачи на волне оптического канала или в суперканале с несколькими поднесущими волнами до 1Тбит/с и больше.

Сочетание многосердцевинных волокон, многопозиционных форматов, нескольких мод и OFDM могут позволить получить гарантированные скорости передачи до Пбит/с и рассматривать перспективы на экзабитные (Ебит/с) скорости (приложение 2, 3).

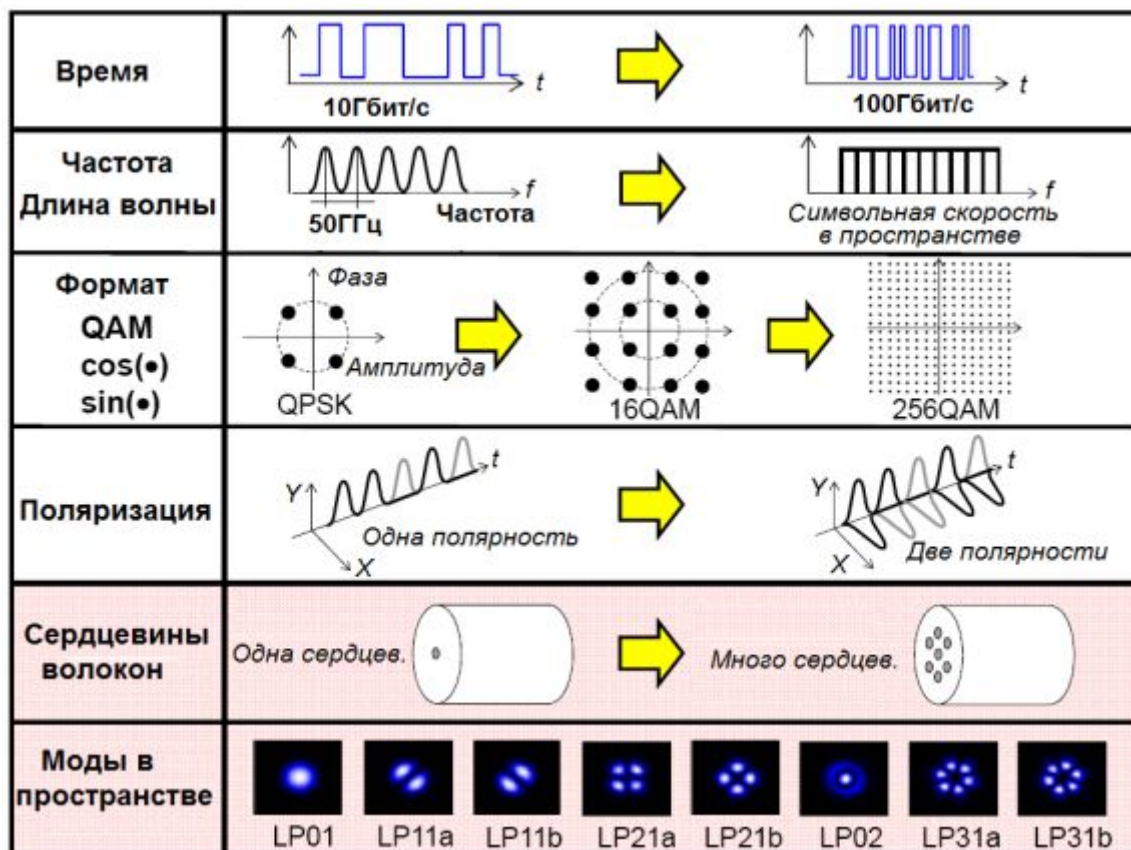


Рис. 2.16. Пути повышения пропускной способности оптических систем передачи

Контрольные вопросы

- 1 С какой целью в оптических системах передачи применяются компенсаторы дисперсии?
- 2 Какие виды дисперсии необходимо устранять в оптических каналах?
- 3 Какие форматы модуляции оптических несущих частот оптических каналов для скорости передачи 100 Гбит/с наиболее устойчивы к дисперсии?
- 4 Какие варианты схем компенсации дисперсии предпочтительны в оптических каналах и по каким причинам?
- 5 Какие преимущества имеет электронная компенсация дисперсии в оптическом канале?
- 6 Какие преимущества даёт использование когерентного оптического приёма в оптических каналах?
- 7 Какие алгоритмы цифровой обработки сигналов используются в оптических когерентных приёмниках?
- 8 Что обеспечивает FEC?
- 9 Какие ограничения в оптическом канале снимаются с помощью FEC?
- 10 Какие оптические форматы модуляции повышают спектральную эффективность до предельных значений?

- 11 Какими решениями по модуляции оптической несущей частоты можно добиться скорости передачи информационного потока в 1Тбит/с?
- 12 Чем ограничено наращивание числа уровней в форматах модуляции?
- 13 Что представляет собой оптический суперканал?
- 14 Какими способами можно формировать оптические суперканалы?
- 15 Что такое OFDM?
- 16 Чем конструктивно отличаются оптические волокна SMF от волокон MCF?
- 17 На что нацелены работы по созданию MCF?

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ С МНОЖЕСТВОМ СЕРДЦЕВИН

Первое предложение о применении волоконных световодов с множеством сердцевин для OSDM появилось в компании Furukawa Electric в 1979 году. Первые детальные исследования волокон с множеством сердцевин произведены в компании Franc-Telecom в 1980-х - 1990-х годах. В это время определились направления создания волокон с множеством сердцевин различных видов:

- волокна на фотонных кристаллах PCF (photonic crystal fiber) с различным числом сердцевин в полых областях (рис.3.1);
- много сердцевинные волокна с единой оболочкой MCF (multi core fiber) с числом сердцевин от 3, 5, 7 до нескольких десятков (рис.3.2);
- мало модовые волокна FMF (few mode fiber) с одной сердцевиной, но числом мод передачи 2, 3, 4 и более (рис.3.3) и также с множеством сердцевин.

Каждая из разновидностей волокон имеет набор характеристик для оценки возможностей применения этих волокон для организации различных по протяженности и пропускной способности волоконно-оптических линий передачи и возможных других применений (в качестве датчиков, в качестве приборов для генерации излучения – волоконных лазеров, генераторов сетки оптических частот и т.д.). Для построения систем передачи предпочтение отдаётся волокнам типа MCF и FMF (с англ., few wire fiber, волокно с малым числом проводов или направляющих сердцевин – расширенный термин по отношению к FMF) из-за сравнительно малых потерь оптической мощности (0,16 - 0,22 дБ/км), допустимых величин хроматической и поляризационной дисперсий, близких по значениям для волокон SMF.

Термин мода (mode) применительно к стеклянным волоконным световодам принято трактовать как тип колебательного или волнового процесса для электромагнитных волн в структуре сердцевины и оболочки волокна. Каждая мода характеризуется распределением электрических и магнитных составляющих в объёме волокна для определённого диапазона частот (волн) и возможностью распространения внутри волокна на протяженные расстояния, измеряемые от сотен метров до нескольких тысяч км. Каждая мода может быть переносчиком оптических сигналов для спектра волн.

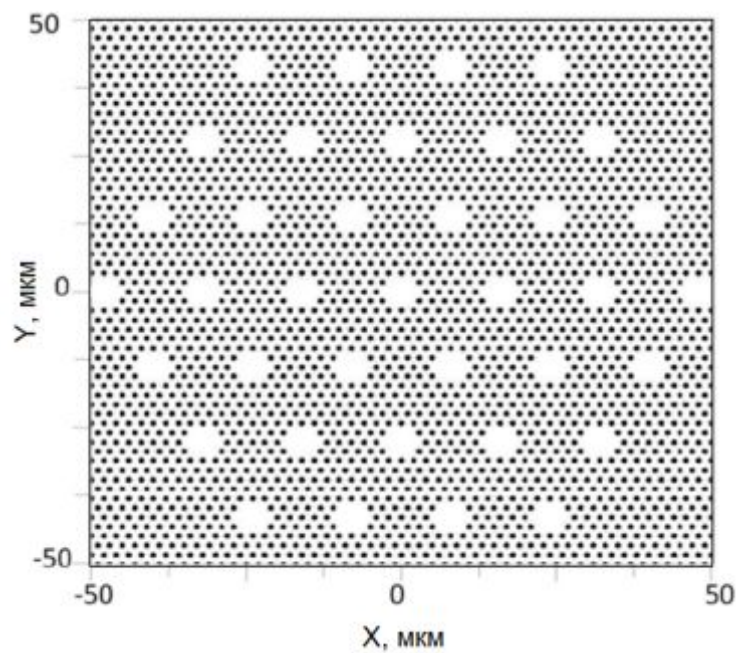


Рис. 3.1. Фотонно-кристаллическая структура волокна с 37 полыми сердцевинами

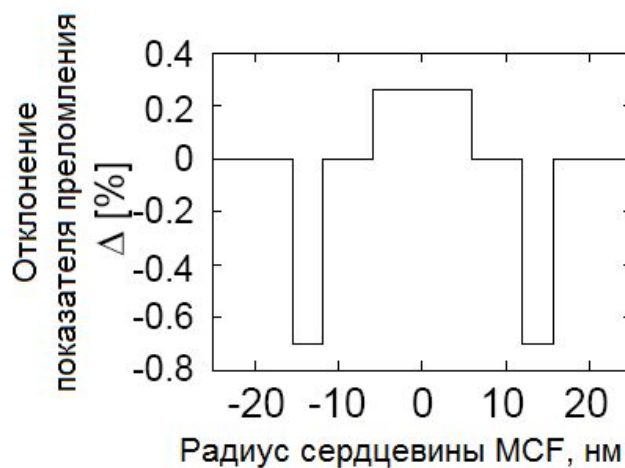
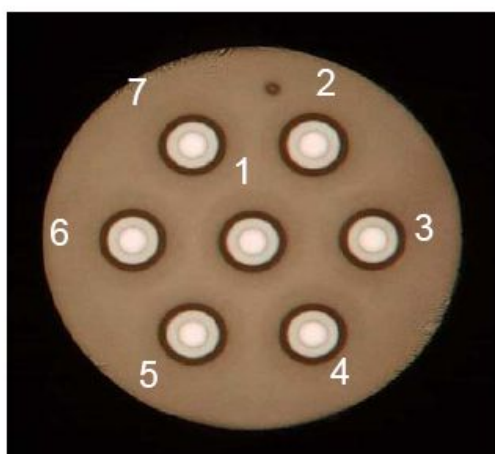


Рис. 3.2. Структура 7-ми сердцевинного волокна MCF и показателя преломления для одной сердцевины

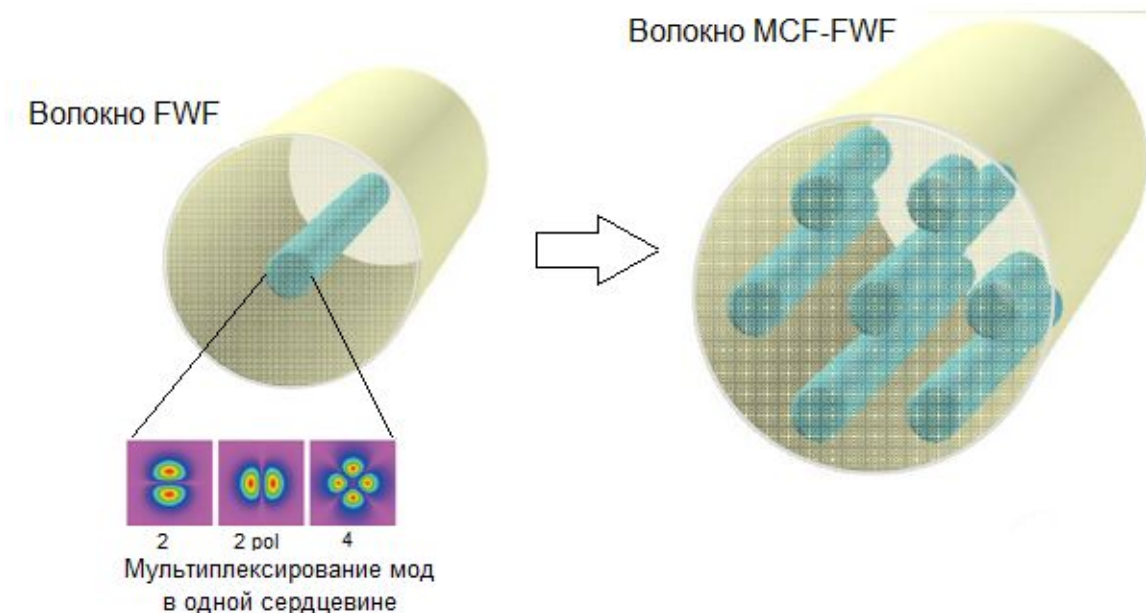


Рис. 3.3. Структура волокна FWF, мультиплексируемых мод и MCF-FWF/M

Востребованность разработок и исследований по MCF и FWF началась во втором десятилетии 21 века в связи с бурным ростом потребностей в транспортировке больших объёмов информационных сообщений, когда ресурс пропускной способности одномодовых волокон с одной сердцевиной оказался исчерпанным на многих направления оптической связи. Кроме того, резко возросли объёмы кабельной продукции в узлах связи, усложнилась их эксплуатация (рис.3.4), т.е. разметка кабелей, контроль характеристик передачи, сложность замены, надёжность стыков и т.д.

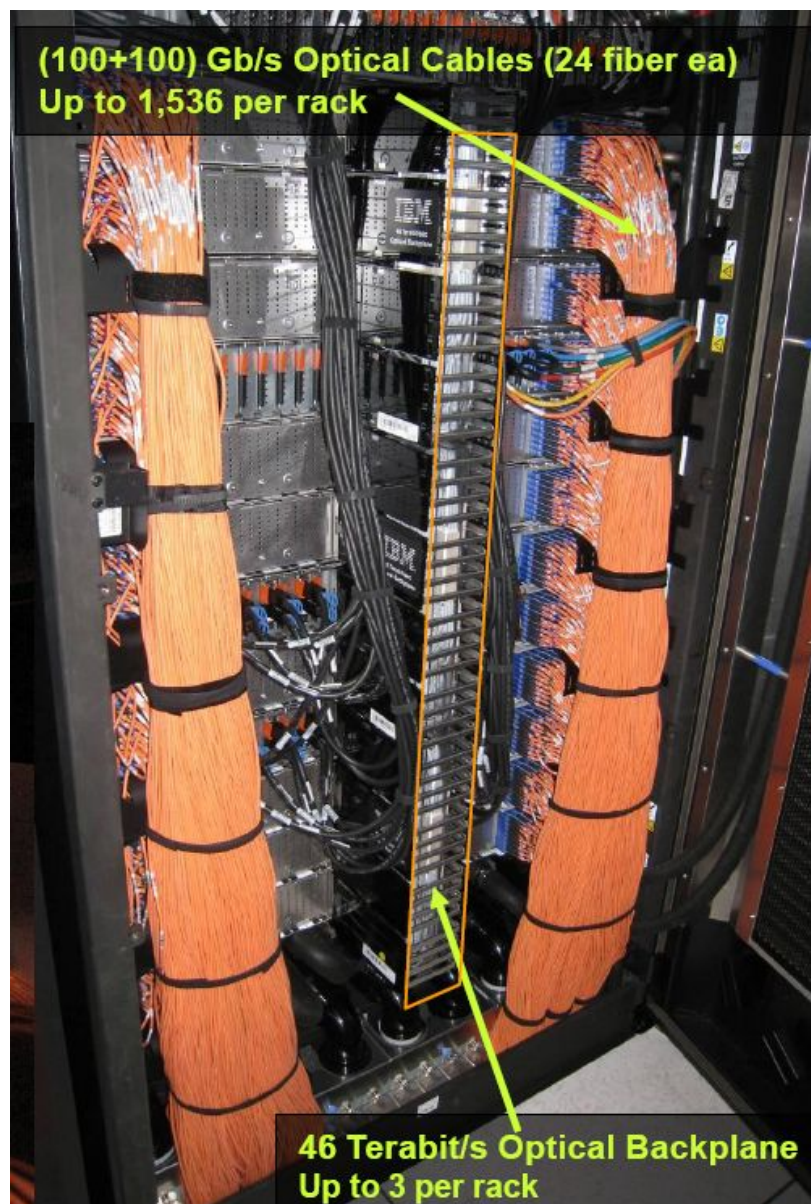


Рис. 3.4. Наполнение оптическими кабельными линиями коммутационного оборудования

3.1. Типы и конструкции многосерцевидных волоконных световодов MCF

На рис. 3.5 приведены современные решения для волоконных световодов SCF и MCF с различными типами сердцевин (одномодовые SM, маломодовые FM и многомодовые MM) и объединением (coupled, uncoupled) сердцевин в волокне.

Сердцевины coupled, как правило, имеют определённую конфигурацию, например, ксеагональную структуру HCPS (hexagonal close-packed structure) (на рис. 3.4 ряд SM), однокольцевую структуру ORS (one ring structure). Сердцевины uncoupled, как правило, имеют изменчивую конфигурацию, например, с двумя кольцами сердцевин TPS (two-pich structure) (рис.3.5) и другие (рис.3.6).

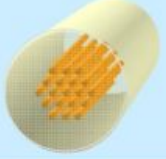
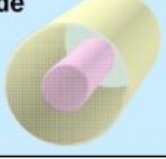
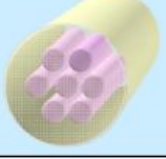
Single-Core Fiber (SCF)	Multi-Core Fiber (MCF)	
	Uncoupled MCF	Coupled MCF
Single-Mode (SM) 		
Few-Mode (FM) 		
Multi-Mode (MM) 		

Рис. 3.5. Типы волокон с одной сердцевиной и множеством сердцевин

Связанное и несвязанное размещение сердцевин в оболочке MCF определяет набор характеристик передачи сигналов в одном направлении и во встречных направлениях (в различных сердцевинах), варианты согласования с источниками и приёмниками оптического излучения, оптическими мультиплексорами/демультиплексорами, оптическими усилителями, коммутаторами и другими оптическими компонентами. Конструктивные характеристики (рис. 3.6, 3.7) геометрических размеров (D , d , Λ , r_1 , r_2 , r_3) и показателей преломления (Δ_1 , Δ_2 , Δ_3) во многом определяют возможности передачи оптических сигналов с минимальными взаимными влияниями между сердцевинами, потери оптической мощности, модовый режим (одномодовый, многомодовый), дисперсионные искажения и потери.

В ряде исследовательских публикаций приводятся практические характеристики волокон MCF [28 - 48]:

- диаметр оболочки волокна $D = (140 - 240)$ мкм в зависимости от числа сердцевин;
- показатель преломления сердцевины $n_{co}=1,486$;
- отклонения показателя преломления $\Delta_1=0,26\%$, $\Delta_2= 0,0 - 0,01\%$; $\Delta_3= -0,7\%$;
- эффективная площадь сердцевины $A_{eff}= (75 - 140)$ мкм² на волне 1550 нм в зависимости от числа сердцевин;
- расстояния между центрами сердцевин $\Lambda= (35 - 70)$ мкм в зависимости от числа сердцевин;
- расстояния до защитной оболочки $d= (30 - 50)$ мкм;
- радиусы конструкции цилиндрической сердцевины $r_1=(4,1 - 5,7)$ мкм, $r_2=(9 - 12)$ мкм, $r_3= (13 - 18)$ мкм в зависимости от числа сердцевин.

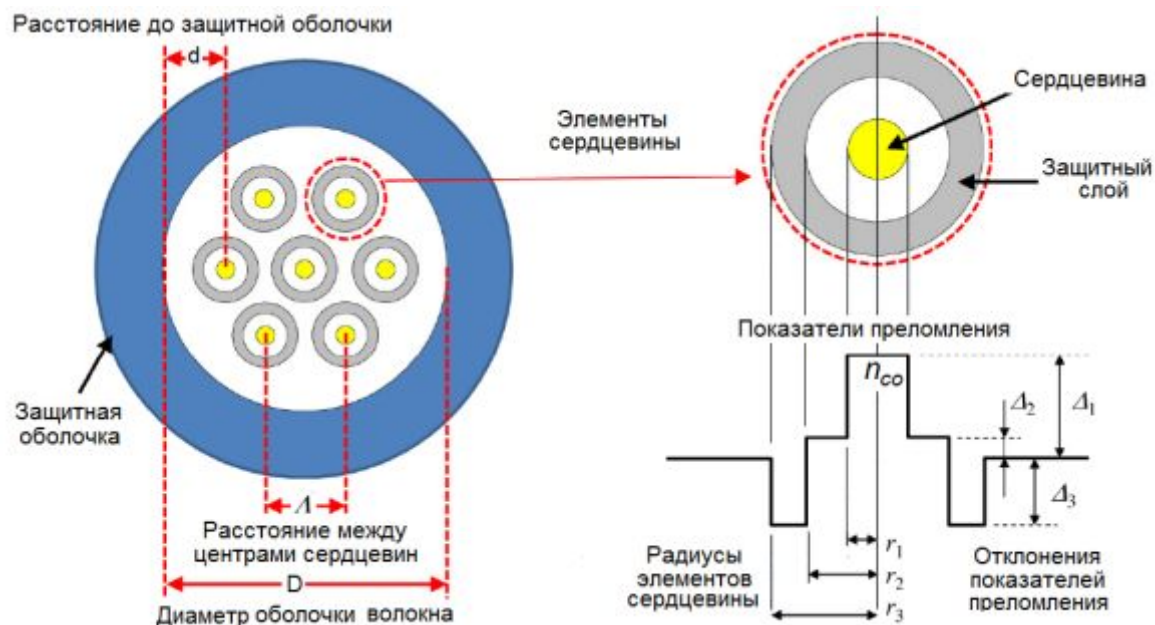


Рис 3.6. Пример конструктивных элементов волокон MCF с 7 сердцевинами и их геометрические показатели

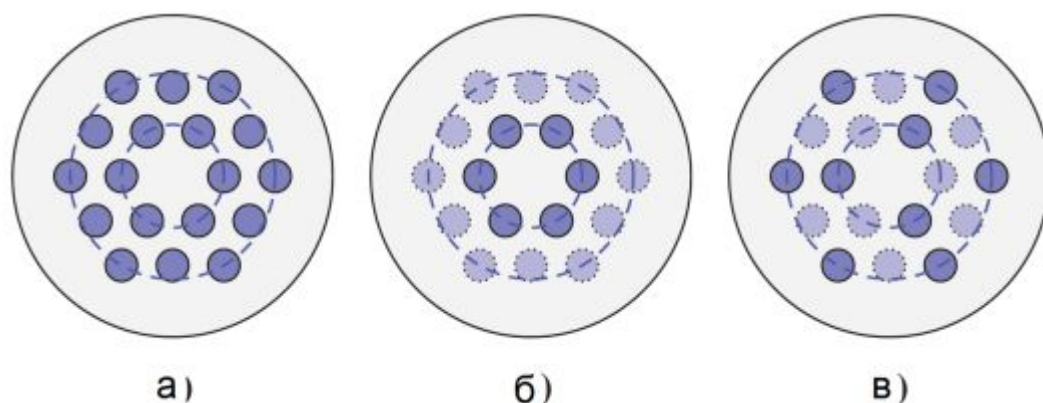


Рис. 3.7. Примеры конструкций волокон MCF радиально-кольцевой структуры с однонаправленной (а) и двунаправленной передачей сигналов перемежением колец (б) и перемежением в кольцах (в)

Внутри любой пары рядом расположенных сердцевин с сонаправленной или противонаправленной передачей (рис.3.8) оптических сигналов образуются переходные (перекрёстные) помехи (intercore crosstalk, XT). Величина этих помех может быть критичной для передачи информационных сигналов и поэтому подлежит исследованиям с конкретными оценками уровней помех и изменением OSNR в оптических каналах.

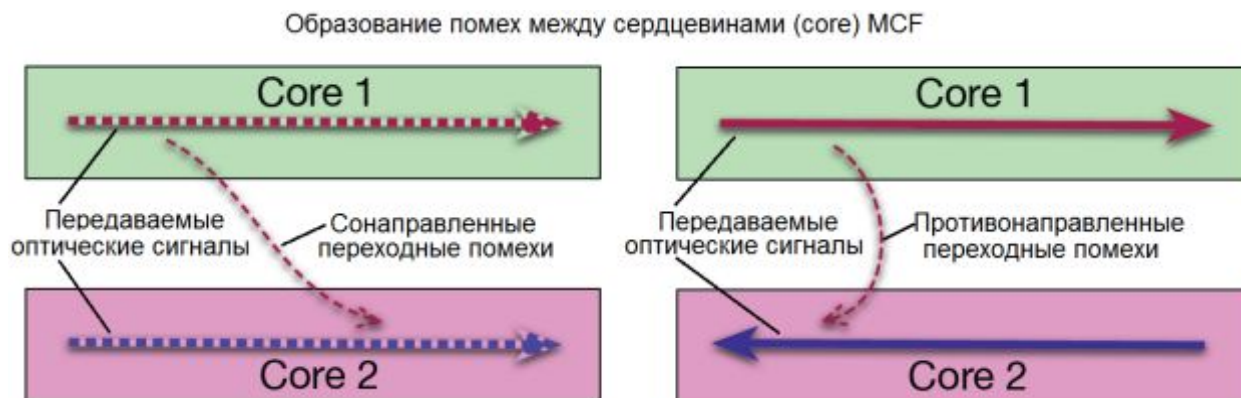


Рис. 3.8. Схемы образования помех между сердцевинами MCF

Пример исследований взаимных помех между сердцевинами волокон MCF с их различным количеством и сонаправленной (параллельной) передачей сигналов приведён на рис.3.9, где A_{eff} – эффективная площадь одной сердцевины, зависящая от конструкции.

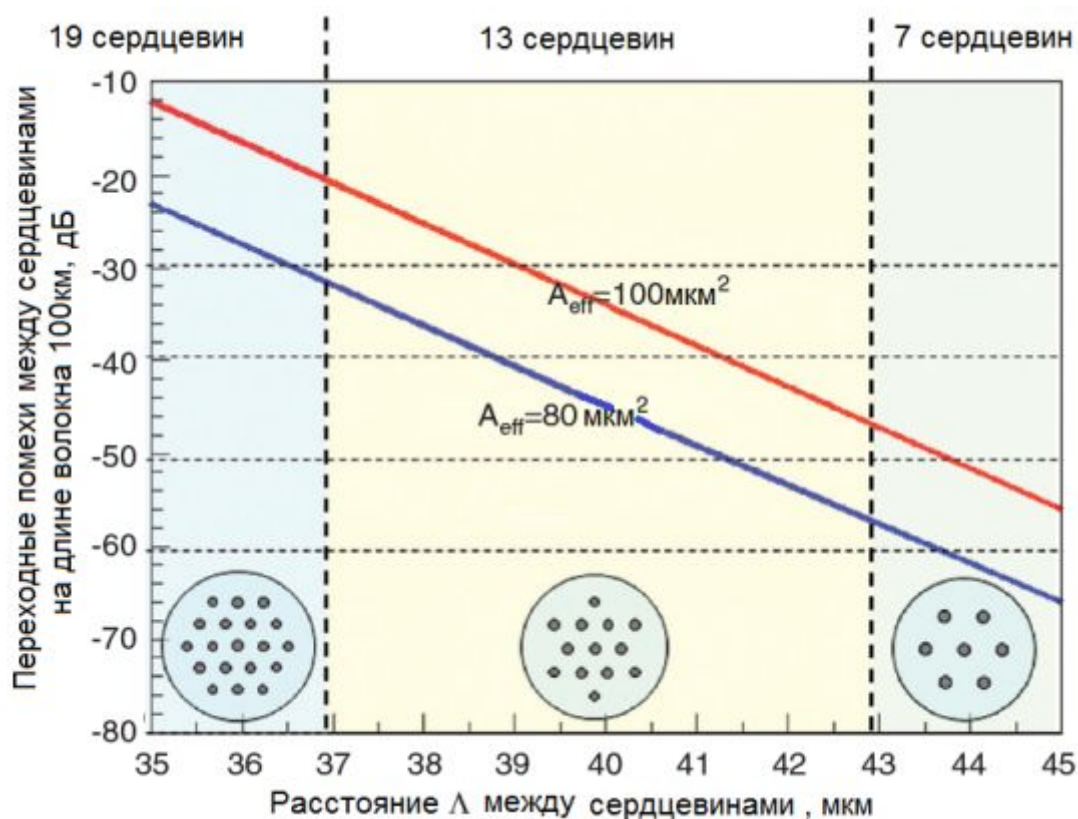


Рис. 3.9. Пример влияния конструктивных решений на величины переходных помех между сердцевинами MCF [48]

Очевидна взаимосвязь между числом сердцевин и величиной переходных помех. Для реализации систем передачи актуально нормирование переходных помех и их учёт в зависимости от протяженности параллельной (или встречной) передачи. Для

реального проектирования систем передачи с MCF требуется знание гораздо большего числа характеристик сердцевин в структурах волокон.

3.2. Характеристики многосердцевинных волоконных световодов

Для использования волокон MCF в системах передачи необходимы детальные передаточные характеристики каждой сердцевинки (затухание, дисперсия, волна отсечки, модовый режим и т.д.), характеристики согласования с источниками и приёмниками оптического излучения (числовая апертура, эффективная площадь, допустимый радиус изгиба и т.д.), характеристики переходных влияний ХТ и т.д. Многочисленные результаты исследований различных MCF, приводимые в периодических научных изданиях (IEEE Photon. Technol. Lett., Optics Express, J. Opt. Soc. Am., J. Lightwave Technol.) и изданиях конференций (ECOC, OSA и др.) позволяют производить численные оценки возможностей построения терабитных и петабитных систем передачи. Ниже представлены числовые данные по результатам исследования волокон в виде таблиц, графиков и рисунков ряд наиболее важных характеристик MCF.

В табл. 3.1 представлены характеристики передачи и согласования для семисердцевинного волокна (рис.3.5) на волнах 1550нм и 1625нм, относящихся к диапазонам волн С и L с наименьшими потерями мощности и нормированным значениям дисперсии. Из данных можно отметить различие ряда характеристик, используемых в проектировании систем, например, погонное затухание различных сердцевин, поляризационная дисперсия (ПМД), волна отсечки и т.д.

Длина волны отсечки от 1483нм до 1550нм указывает на ограничения одномодового режима сердцевин только диапазонами С и L (1530нм - 1625нм).

Табл. 3.1. Примеры характеристик 7-ми сердцевинного MCF

Парам. Core	Затухание, дБ/км		MFD, мкм	A _{eff} , мкм ²	$\lambda_{сс}$, нм	Хр. дисп., пс/нм км	Накл.Хр.дисп., пс/нм ² км	Потери на изгиб (R=5мм), дБ/виток		ПМД, пс/км ^{1/2}
λ , нм	1550	1625	1550	1550	N/A	1550	1550	1550	1625	C+L
Констр.	N/A	N/A	9.86	79.6	1496	23.3	0.063	0.010	0.021	N/A
Core 1	0.176	0.196	9.83	80.2	1509	22.2	0.062	0.011	0.020	0.132
Core 2	0.179	0.197	9.76	80.2	1550	22.2	0.062	0.010	0.020	0.134
Core 3	0.181	0.202	9.88	81.3	1504	22.2	0.062	0.010	0.020	0.044
Core 4	0.177	0.199	9.85	80.8	1498	22.2	0.062	0.011	0.021	0.093
Core 5	0.175	0.192	9.74	79.0	1485	22.2	0.062	0.011	0.022	0.205
Core 6	0.179	0.200	9.80	79.9	1483	22.1	0.062	0.011	0.022	0.116
Core 7	0.177	0.197	9.72	78.2	1498	22.2	0.062	0.010	0.019	0.106

MFD, диаметр поля моды N/A, нет данных $\lambda_{сс}$, волна отсечки ПМД, поляризационная модовая дисперсия

Величина перекрёстных помех между сердцевинами волокна может быть оценена аналитически из соотношения при наличии соответствующих данных [42]:

$$XT = 2k^2 RL / \beta \Lambda, \quad (3.1)$$

где k коэффициент связи между взаимодействующими сердцевинами, R радиус связи, L длина волокна, β постоянная распространения в сердцевине, Λ расстояние между центрами сердцевин. Пример результатов измерений и расчётов для 7-ми сердцевинного волокна представлен на рис.3.10. Необходимо отметить, что приведённый результат не является обобщающим для многих исследований и в других исследования отличающихся конструкций MCF результаты также могут отличаться заметно как по помехам (на 10 - 20 дБ) так и по другим характеристикам. Общую оценку ухудшения (worst) XT можно записать

$$XT_{worst} = XT + 10 \log n, \quad (3.2)$$

где n – число влияющих сердцевин.

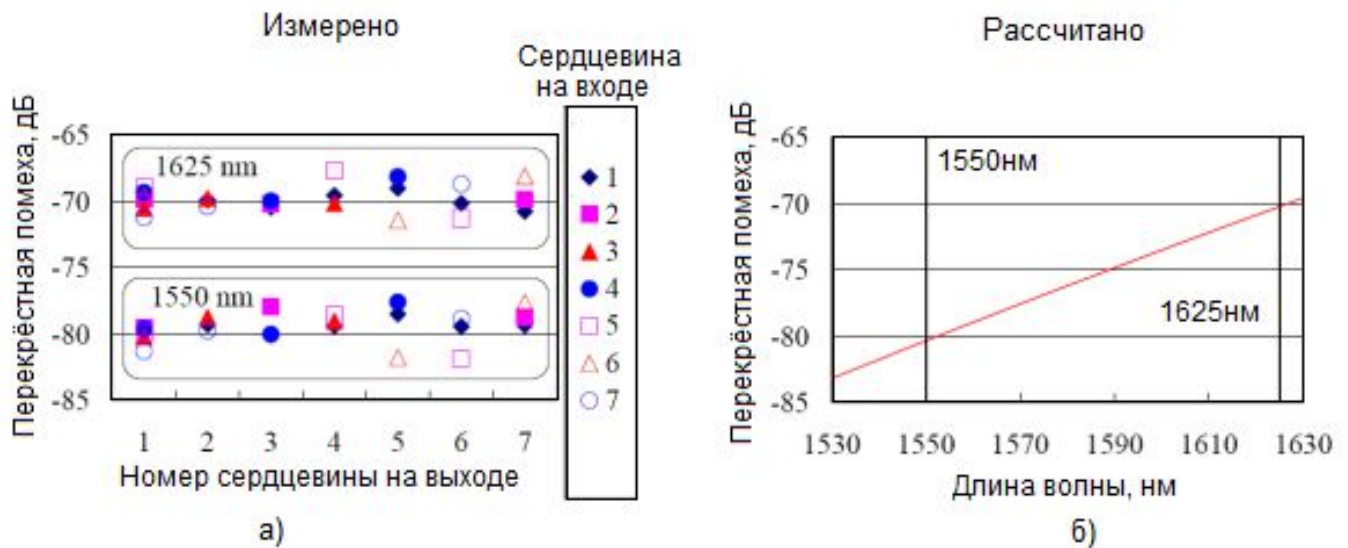


Рис. 3.10. Оценка взаимных перекрыстных помех между сердцевинами MCF по опытным измерениям (а) (длина волокна 17,4км, радиус намотки волокна $R=140$ мм) и расчётам (б)

Дистанция передачи сигналов в сердцевинах при наличии взаимных перекрыстных влияний будет зависеть от формата кодирования. Усложнение форматов кодирования требует увеличения OSNR, т.е. снижения перекрыстных помех (рис.3.11). Нетрудно отметить, что наибольшей устойчивостью к перекрыстным помехам обладает канальный оптический сигнал в формате QPSK.

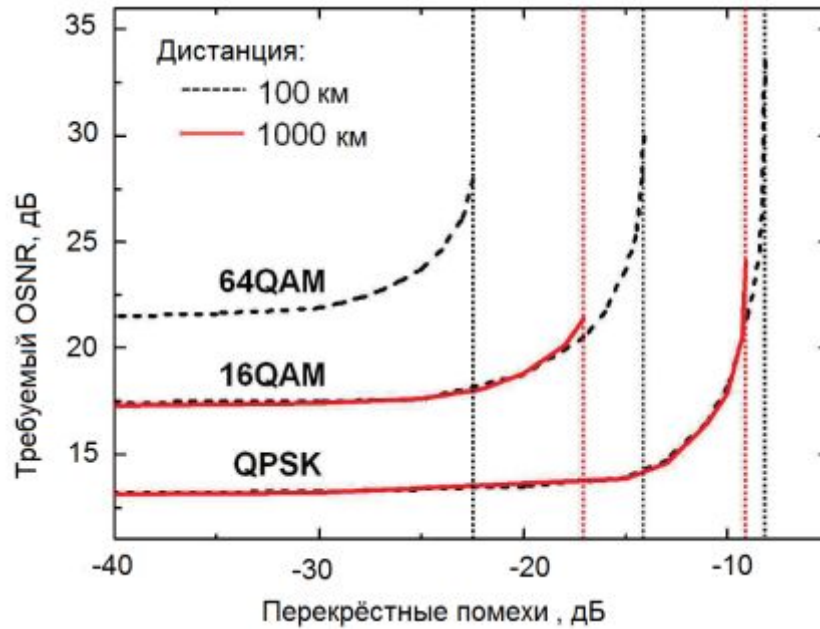


Рис. 3.11. Перекрёстные помехи в MCF 7 сердцевин и форматы кодирования в оптических каналах для FEC (limit BER=3.8×10⁻³) по материалам исследования [50]

В общую оценку OSNR для MCF вместе с шумом спонтанной эмиссии P_{ASE} , вызванным активными оптическими компонентами, и шумом из-за нелинейных оптических эффектов P_{NLI} , включается составляющая мощности шумов переходных влияний P_{XT} для одного оптического канала в полосе частот для его организации [49]:

$$OSNR = \frac{P_{Och}}{P_{ASE} + P_{NLI} + P_{XT}}. \quad (3.3)$$

Для сравнительных оценок волокон MCF с различной геометрической структурой предложен специальный показатель для систем передачи (SSE), учитывающий спектральную эффективность (SE) оптических сердцевин, число сердцевин N , эффективную площадь (A_{eff}) [50]:

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

Пример использования этого показателя приведён на рис. 3.12.

	MCF A	MCF B	MCF C
d_1 (мкм)	8.2	10.3	11.4
d_2 (мкм)	18.3	22.2	23.9
d_3 (мкм)	26.5	32	36.4
Δ_1 (%)	0.38	0.26	0.18
Δ_2 (%)	-0.65	-0.7	-0.7
A_{eff} (мкм ²)	75	110	140

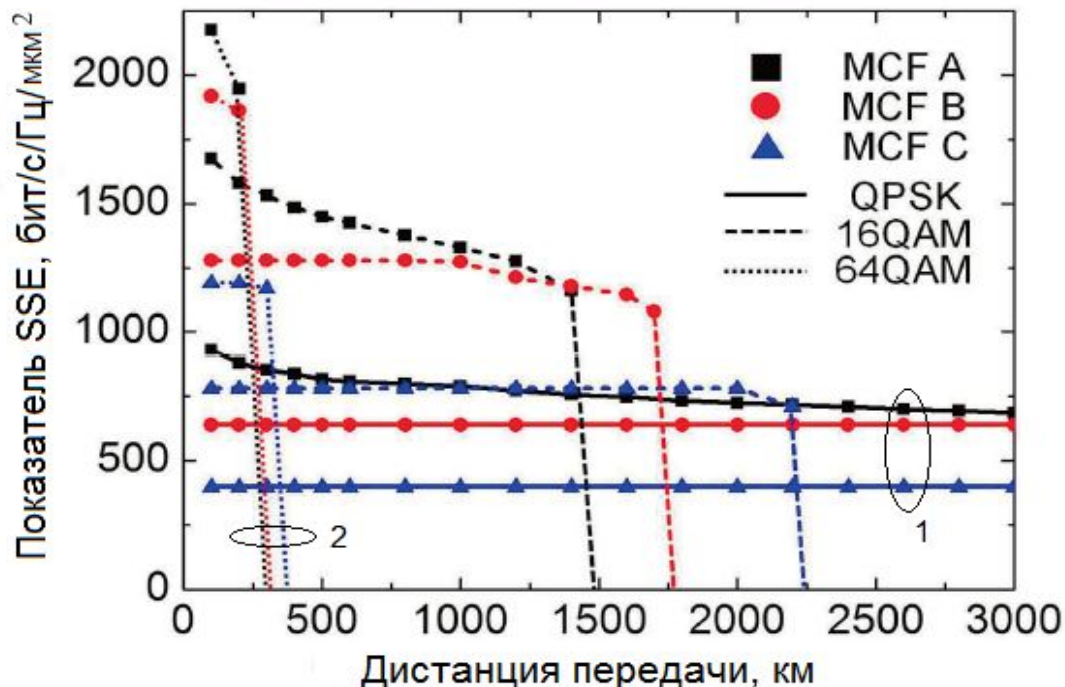


Рис. 3.12. Специальный показатель и дистанция передачи в системе с различными форматами для трёх типов волокон

Т.о. при больших геометрических размерах сердцевин возрастает расстояние, на которое могут проектироваться системы передачи с меньшей спектральной эффективностью (1). Высокая спектральная эффективность не способствует увеличению дистанций передачи (2).

Измеренные характеристики затухания сердцевин (пример на рис.3.13) позволяют выбрать сердцевин с наименьшими потерями оптической мощности для построения протяженных оптических соединений [49]. Наилучшие сердцевин по затуханию имеют потери в пределах 0,16 дБ/км - 0,19 дБ/км для диапазонов С и L.

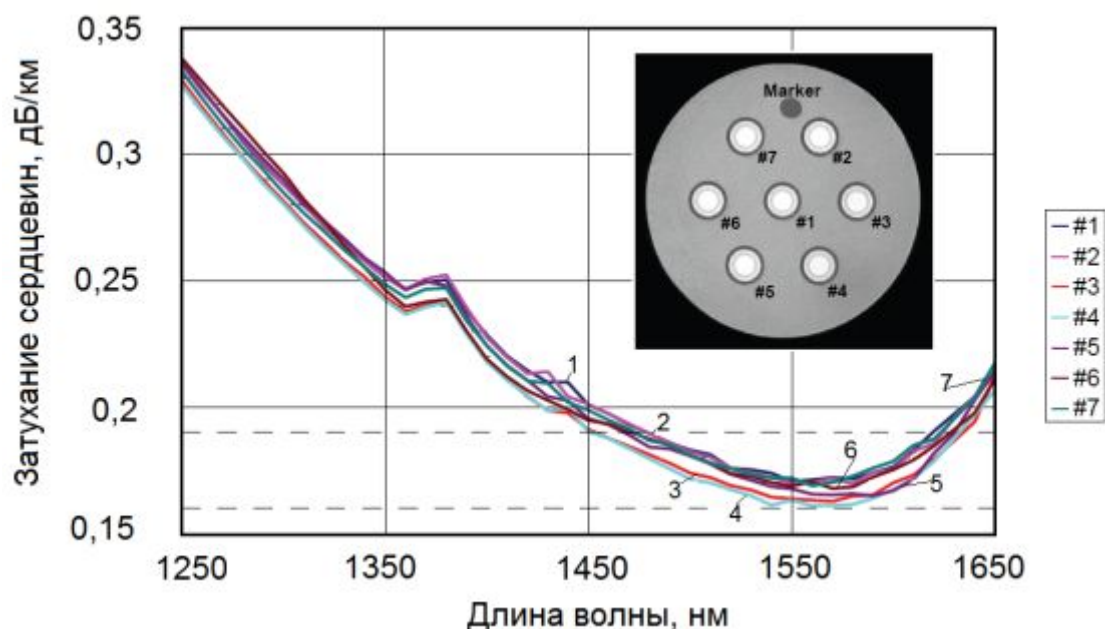


Рис. 3.13. Характеристики затухания 7 сердцевин волокна MCF

3.3. Компоненты для линий с многосерцевинными волоконными световодами

Для практического применения волокон MCF необходимы компоненты стыка волокон между собой с минимальными потерями мощности при прохождении излучения в каждой сердцевине и максимальные потери на отражение. Такими компонентами являются разъёмные и неразъёмные механические соединители (коннекторы, сплайсы).

Надёжное долговременное соединение волокон могут обеспечить только технологии сварки.

Для подключения волокон к аппаратуре систем передачи и контроля (рефлектометрии) должны использоваться разветвители/объединители сердцевин.

Для протяженных волоконных линий актуально использование оптических усилителей, компенсаторов хроматической дисперсии, управляемых мультиплексоров для выделения/ввода и переключения отдельных сердцевин.

Определённые разработки перечисленных компонентов уже выполнены. Информация о этих компонентах представлена не только в статьях конференций OSA, ECOC и научных журналах IEEE, но и на сайтах производителей Furukawa Electric, Fujikura, IBM, NEC Corporation, FIBERCORE, Sumitomo Electric и др.

3.3.1. Соединители MCF

Для подключения MCF к аппаратуре систем передачи, к контрольно-измерительной аппаратуре и т.д. необходимо разделение сердцевин с подходящим окончанием (разъёмным, сварным, сплайсовым, клеевым и т.д.).

Пример структуры соединителя/разветвителя конусной конструкции представлен на рис.3.14. В технической литературе эта конструкция получила название связки волокон FBF (Fiber Bundle Fanout).

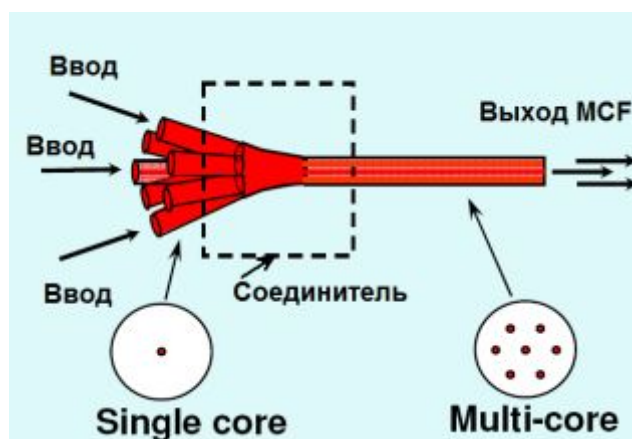


Рис. 3.14. Структура соединителя FBF односердцевинных (SC) и многосердцевинных (MC) волокон

В соединителях (коннекторах разъёмного типа рис.3.15) потери на стыке составляют величины от 0,38 дБ до 1,8 дБ по данным от 2010 года. При сварке волокон MCF потери обычно не превышают 0,1 дБ. Для сварки MCF рекомендован аппарат Fujikura 100, рассчитанный на сварку волокон с диаметром оболочки до 2000 мкм и использованием технологии PAS (Profile Alignment System - выравнивание по сердцевине волокна). Неточности выравнивания стыке волокон сказываются на величине потери мощности (рис.3.16).

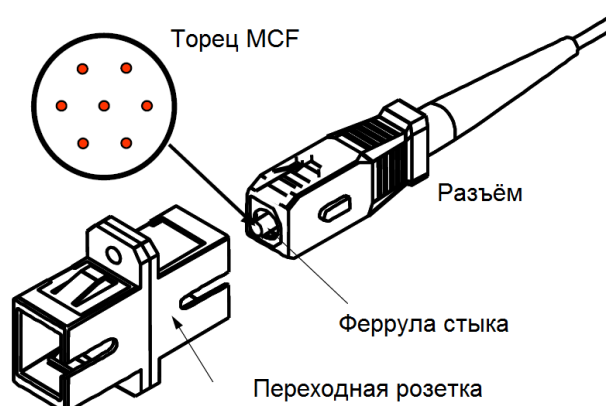


Рис. 3.15. Разъёмный стык MCF

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

(норматив не хуже 45 дБ) возвратных потерь и их температурной зависимости приведён на рис. 3.17.

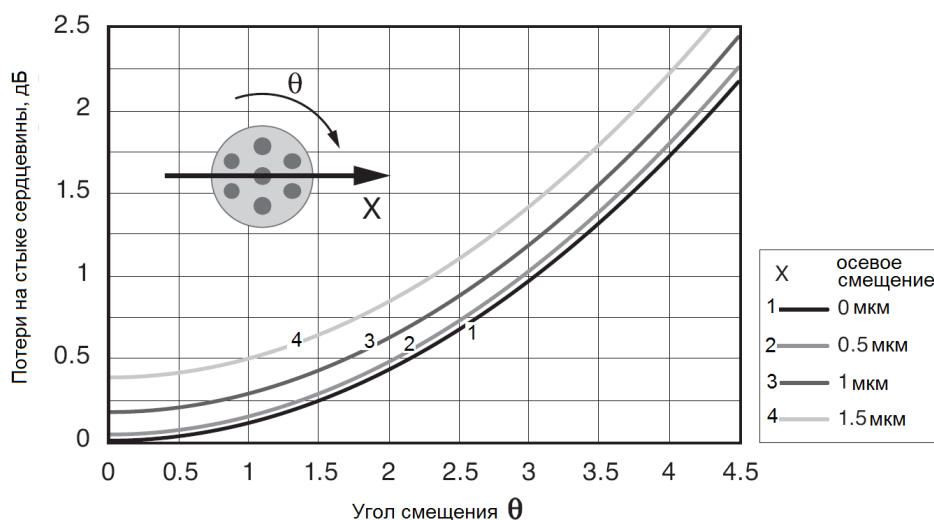


Рис. 3.16. Зависимость потерь оптической мощности на стыке MCF при осевых смещениях [51]

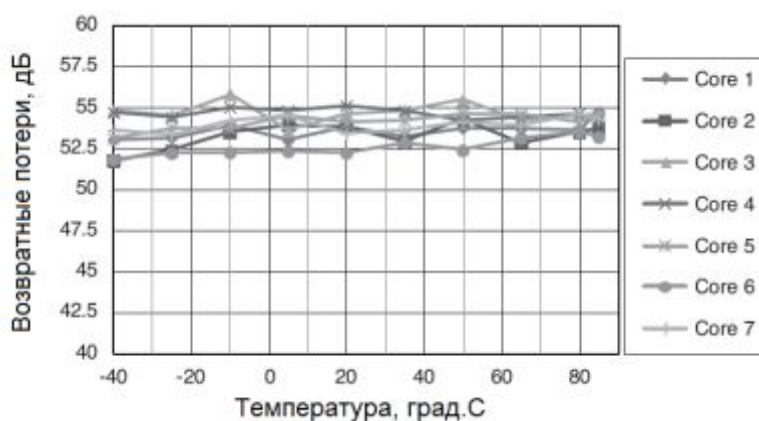


Рис. 3.17. Пример характеристик возвратных потерь в разъёмном соединителе MCF [51]

3.3.2. Оптические усилители MCF

Для поддержки передачи информационных сигналов в протяженных линиях с MCF должны быть предусмотрены оптические усилители для каждой сердцевинки. Известные решения касаются в основном эрбиевых EDFA (erbium doped fiber amplifier) и рамановских DRA, (distributed/ discrete Raman amplifier) усилителей с согласованной и встречной накачкой (рис.3.18).

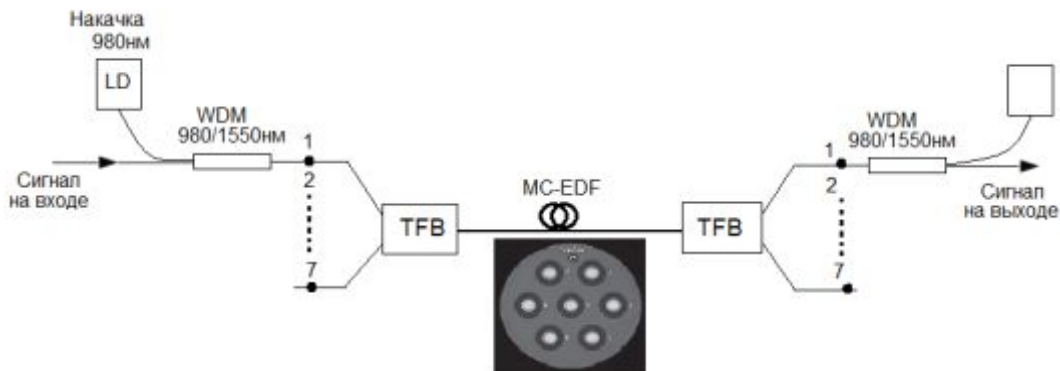


Рис. 3.18. Структура оптического усилителя на основе MC-EDFA

Блоки TFB (tapered fiber bundle, коннектор-разветвитель связки волокон) позволяют подключить к оптическому усилителю отдельные волокна (сердцевины) для ввода сигналов информации и накачки и их разделения после усиления.

В таких усилителях одно волокно с множеством сердцевин, где сконцентрированы добавки эрбия, может использоваться как в составе систем с одной сердцевиной, что даёт экономию в габаритах оборудования, так и в составе систем с MCF (рис. 3.19). В последнем для объединения излучения сигнала и накачки используется пластина в виде тонкоплёночной сборки оксидных плёнок, которая пропускает излучение сигнальных компонент и отражает излучение накачки.

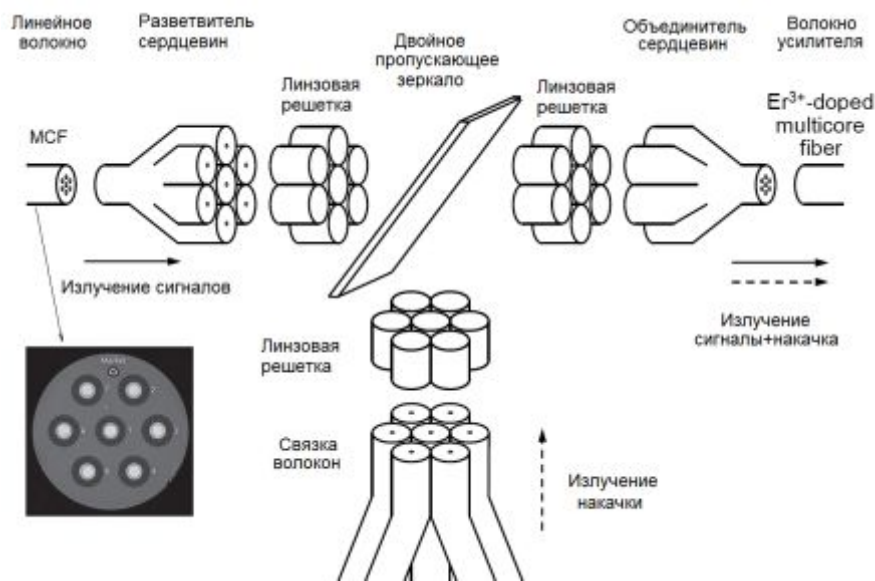


Рис. 3.19. Структура ввода излучения накачки оптического усилителя на основе MCF

Характеристики усиления этих типов оптических устройств аналогичны характеристиками волоконных усилителей с одной сердцевиной. Однако предметом продолжающихся исследований являются взаимные влияния между усиливающими сердцевинами при различных способах накачки, предельные значения по

коэффициентам усиления, величинам шумов спонтанной эмиссии и нелинейным эффектам.

3.3.3. Компоненты MCF для выделения/ ввода сердцевин и их коммутации

Оптические блоки для разделения сердцевин MCF и объединения отдельных волокон для ввода сигналов в сердцевины MCF (рис. 3.20) строятся в виде монолитных конструкций со стабильными температурными и механическими характеристиками [56]. Такие конструкции используются для реализации управляемых мультиплексоров выделения/ввода сердцевин и коммутаторов сердцевин, например, с управляемыми микрозеркалами микроэлектромеханических коммутационных систем MEMS (microelectromechanical systems) (рис.3.21).

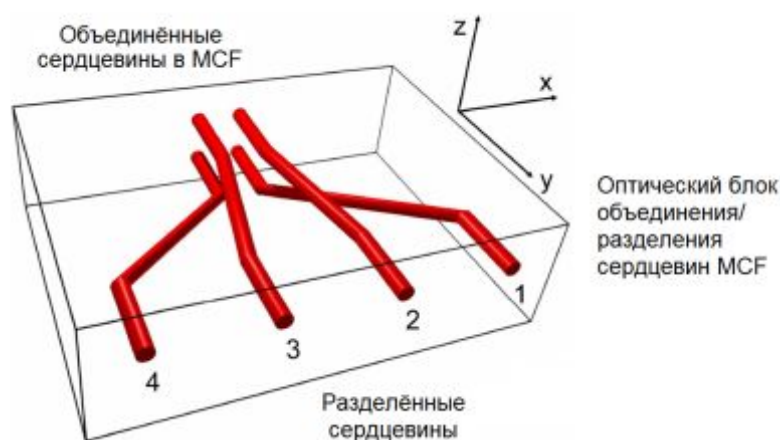


Рис. 3.20. Конструкция оптического прибора разделения/объединения сердцевин MCF

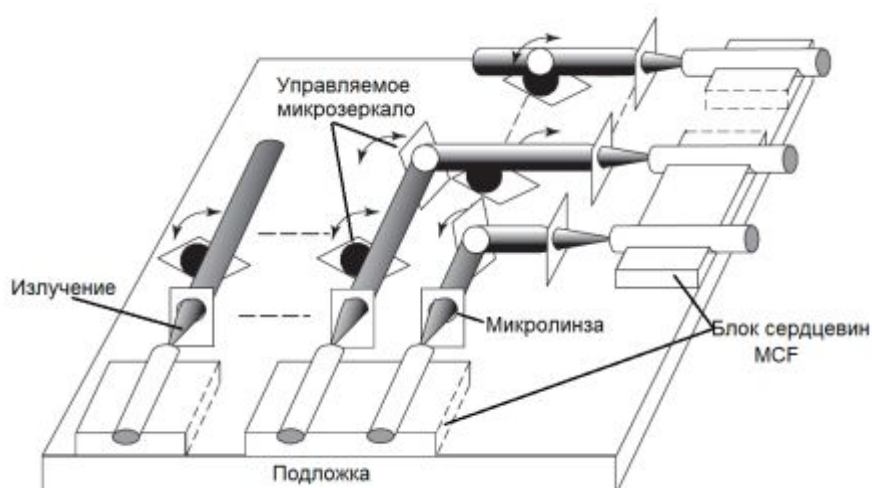


Рис. 3.21. Коммутатор сердцевин MCF

На основе MEMS могут строиться 2-х и 3-х мерные матрицы коммутации с минимальными потерями оптической мощности (не превышающими 1 дБ на ступень при общих вносимых потерях на все элементы коммутатора от 3дБ до 7 дБ) в широком диапазоне оптических частот, перекрывающем волны 1260 -1675 нм и обеспечивающим равномерность коэффициента передачи $\pm 0,5$ дБ.

В структурах сердцевин волоконных световодов MCF могут быть сформированы Брэгговские решетки, что позволяет использовать такие волокна для построения компенсаторов хроматической дисперсии, мультиплексоров выделения/ввода оптических каналов DWDM.

3.4. Выводы

Волокна MCF позволяют увеличить пропускную способность волоконно-оптических линий передачи.

Волокна MCF могут производиться для широкого использования на сетях связи, т.к. имеются вспомогательные средства (компоненты) для разделения сердцевин, соединения волокон, коммутации сердцевин с минимальными вносимыми потерями мощности оптических сигналов, оптического усиления, компенсации дисперсии.

Сердцевины волокон MCF могут использоваться в одномодовом и маломодовом режимах передачи в системах с DWDM. При этом достижимы скорости передачи информационных данных в терабитном и петабитном диапазонах.

К числу проблем реализации систем передачи на основе MCF относятся сложности стыка волокон, дополнительные помехи между сердцевинами, потери оптической мощности при коммутации сердцевин.

Контрольные вопросы

- 1 Какие известны предложения по структурам многосердцевинных волокон?
- 2 Что представляют собой конструкции волокон FWF и MCF-FWF?
- 3 Почему востребованы волокна MCF?
- 4 Какие известны конструкции волокон MCF?
- 5 Какие характеристики имеют волокна MCF (геометрические, оптические, передаточные)?
- 6 Как оценивают взаимные влияния сердцевин в MCF?
- 7 Сколько сердцевин может быть в MCF?
- 8 Какие характеристики используют для описания сердцевин MCF?
- 9 Как соединяют волокна MCF?
- 10 Как устроены оптические усилители с волокнами MCF?
- 11 Какие компоненты необходимы для выделения, ввода, коммутации сердцевин между MCF?

4. СИСТЕМЫ С МОДОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ

Один из основных трендов в повышении эффективности использования волоконно-оптических линий это мультиплексирование множества мод в один волоконный световод, управление множеством мод с множественным вводом и выводом MIMO (multiple input and multiple output) (рис. 4.1). Как правило, число объединяемых и разделяемых оптических мод в волокна типа FM (маломодовые волокна) ограничено в пределах от 2 до k ($k=3,4,\dots,16$). Модовое разделение линейно поляризованных псевдо векторных мод LP_{lm} (linearly polarized pseudo vector modes, $l=0, 1, 2, \dots$ – азимутальное число распределения мод, $m=0, 1, 2, \dots$ – модовое число) может дополняться поляризационным разделением (рис.4.2), что также повышает эффективность использования волокна [52]. Варианты представления оптических мод в волоконных световодах приведены в приложении 4.

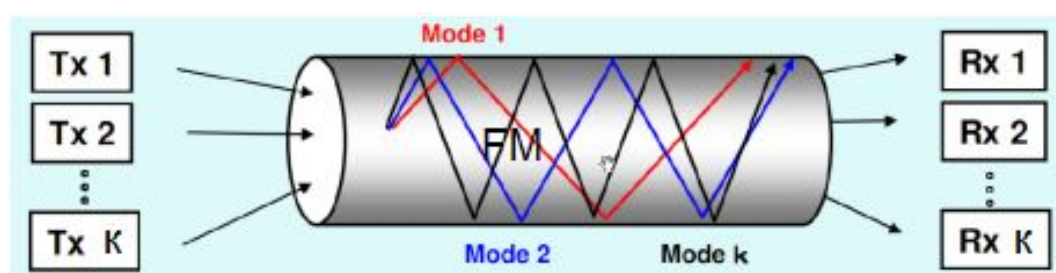


Рис. 4.1. Мультимодовый режим передачи в многомодовом волокне

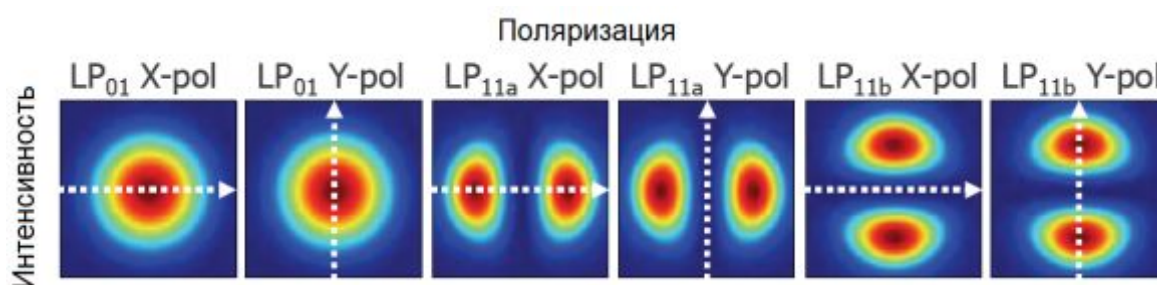


Рис. 4.2. Оптические моды с различной линейной поляризацией (плоскости поперечного сечения X, Y) в структуре волокна FM

Отдельные моды создаются передатчиками и направляются в устройства модового мультиплексирования (рис. 4.3), где объединяются независимо от частоты, но строго по поляризации (X-pol, Y-pol) в волокне FM. Модовый демультиплексор разделяет моды на приёмной стороне и направляет их к соответствующим приёмникам. При построении систем передачи с протяженным линейным трактом возможно применение оптических усилителей, поддерживающих уровни мощности мод в пределах допустимых норм [53, 54].

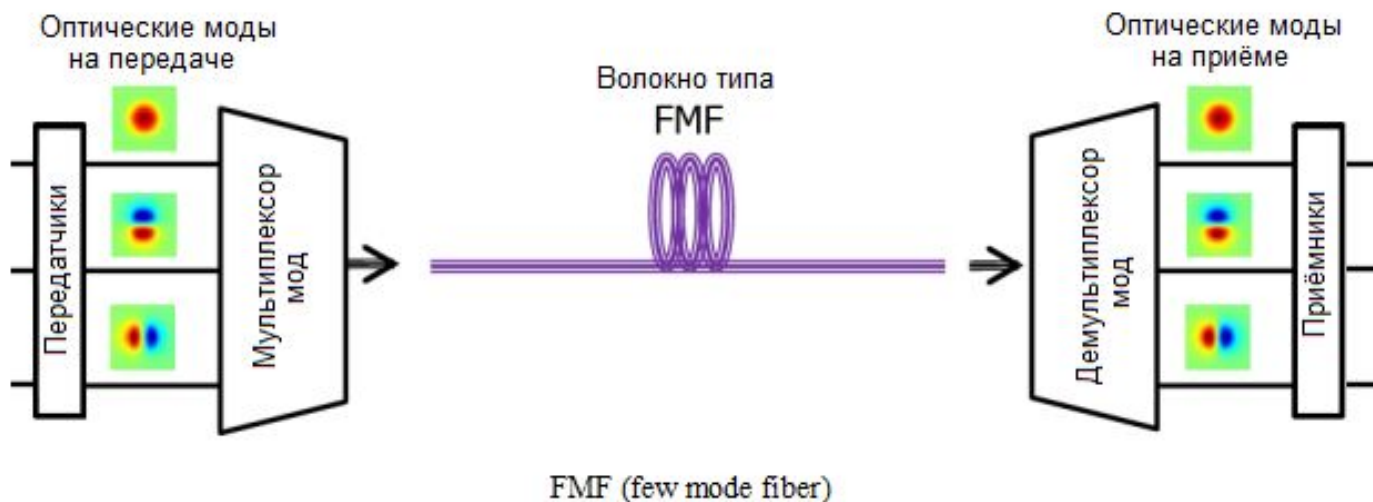


Рис. 4.3. Структура системы передачи MDM

На каждой из мод может располагаться спектр оптических каналов с различными форматами модуляции (рис. 4.4), в том числе с различной поляризацией.

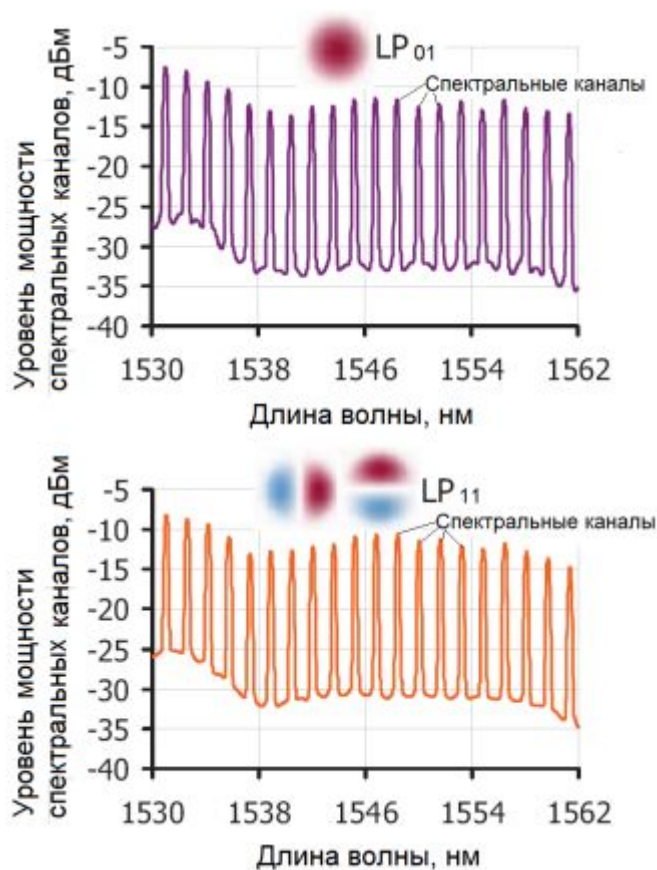


Рис. 4.4. Спектры оптических каналов мультиплексируемых мод в системе передачи MDM-DWDM [54]

4.1. Волоконные световоды для систем с модовым мультиплексированием

Волоконные световоды с несколькими модами освоены в производстве промышленностью и выпускаются под заказы кабельных предприятий. Типовые характеристики волокон FMF (2-х и 4-х модовые) компании Furukawa представлены в табл.4.1. Сердцевины волокон конструируются с градиентным и ступенчатым профилем показателя преломления при использовании атомов Ge, достигаемый перепад показателя преломления $\Delta n = 5,4 \times 10^{-3}$. При этом диаметр сердцевины составляет 11,9 мкм, а оболочка 125 мкм. Типовые потери оптической мощности на волне 1550 нм составляют менее 0,22 - 0,26 дБ/км для каждой моды.

Число мод в FMF может быть увеличено и до десятка, однако это усложнит схему мультиплексора и демультиплексора, т.к. для пространственного деления оптического излучения требуются большие габариты для приборов – формирователей/деформирователей отдельных мод и более точная их настройка (пространственная ориентация, механическая и температурная устойчивость). Кроме того возрастает спектральная плотность мощности в сердцевине волокна, что приводит к известным нелинейным эффектам и порождает в итоге взаимные помехи между оптическими каналами.

Табл. 4.1 Характеристики 2-х и 4-х модовых волокон

Характеристики передачи на волне 1550нм	Типы волоконных световодов FMF			
	2-х модовое градиентное	2-х модовое ступенчатое	4-х модовое градиентное	4-х модовое ступенчатое
Дисперсия, пс/нм×км	LP ₀₁ : 19,9 LP ₁₁ : 20,0	LP ₀₁ : 21,1 LP ₁₁ : 20,7	LP ₀₁ : 18,4 LP ₀₂ : 16,9 LP ₁₁ : 18,7 LP ₂₁ : 18,0	LP ₀₁ : 22,1 LP ₀₂ : 17,5 LP ₁₁ : 22,0 LP ₂₁ : 21,4
Наклон дисперсии, пс/нм ² ×км	LP ₀₁ : 0,067 LP ₁₁ : 0,065	LP ₀₁ : 0,065 LP ₁₁ : 0,060	LP ₀₁ : 0,068 LP ₀₂ : 0,067 LP ₁₁ : 0,067 LP ₂₁ : 0,067	LP ₀₁ : 0,066 LP ₀₂ : 0,043 LP ₁₁ : 0,064 LP ₂₁ : 0,058
Диаметр поля моды, мкм	LP ₀₁ : 11,0 LP ₁₁ : 11,0	LP ₀₁ : 15,6 LP ₁₁ : 13,6	LP ₀₁ : 10,7 LP ₀₂ : 6,3 LP ₁₁ : 10,8 LP ₂₁ : 11,0	LP ₀₁ : 18,2 LP ₀₂ : 8,7 LP ₁₁ : 15,2 LP ₂₁ : 14,3
Эффективная площадь, мкм ²	LP ₀₁ : 96 LP ₁₁ : 96	LP ₀₁ : 215 LP ₁₁ : 158	LP ₀₁ : 90 LP ₀₂ : 184 LP ₁₁ : 122 LP ₂₁ : 166	LP ₀₁ : 312 LP ₀₂ : 295 LP ₁₁ : 210 LP ₂₁ : 236
Дифференциальная групповая задержка, пс/м	LP ₀₁ , LP ₁₁ : от -0,2 до +0,2	LP ₀₁ , LP ₁₁ : 2,1	Между всеми модами от -0,4 до +0,5	LP ₀₁ -LP ₀₂ : 3,0 LP ₁₁ -LP ₀₁ : 2,0 LP ₂₁ -LP ₀₁ : 3,9

Помимо односердцевинных волокон FMF могут производиться волокна типа FMF-MCF (рис.4.5), в которых размещаются несколько изолированных оптически сердцевин, в том числе фотонно-кристаллического типа с воздушными полостями. В таких конструкциях вновь проявляется проблема взаимных влияний сердцевин и их оценки для построения систем передачи.

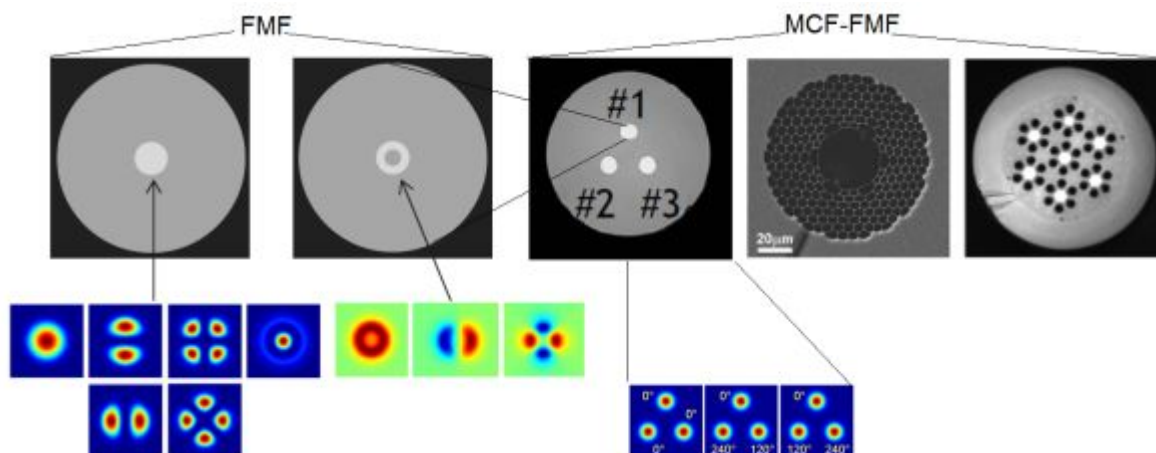


Рис. 4.5. Односердцевинные и многосердцевинные волокна FMF

Исследования возможностей волокон FMF, MCF-FMF для использования в составе оптических систем передачи продолжаются. Предметом исследований и конструкторских разработок являются: предельные пропускные возможности по скорости передачи информационных потоков с когерентным приёмом, различными форматами оптической модуляции и различным числом оптических каналов на модах; взаимные влияния между модами и оптическими каналами на модах (переходные помехи, снижающие OSNR в оптических каналах передачи информации); взаимные влияния между сердцевинами; нелинейные ограничения по мощности оптических сигналов; возможности коррекции (подавления) дисперсии; возможности оптического усиления в волокнах FMF, MCF-FMF; возможности доступа в промежуточных узлах к отдельным модам с целью построения мультиплексоров для выделения и ввода оптических каналов; коммутация мод и каналов и т.д. Некоторые результаты этих исследований публикуются в ведущих научных изданиях и трудах международных конференций. Ниже приводится обзор ряда достижений в создании компонентов и систем с FMF, MCF-FMF.

4.2. Схемы ввода/вывода и усиления мод

Для высокоэффективного применения волокон FMF, MCF-FMF должны существовать приборы формирования, объединения/деления и деформирования отдельных мод из оптических многоканальных сигналов. Такие приборы называют по аналогии с уже используемыми – оптические мультиплексоры/демультиплексоры мод. Эти приборы также поддерживают и

поляризационное мультиплексирование (рис.4.6), расширяющее возможности по организации оптических каналов на ортогональных модах одного типа (в примере LP_{11}). В системе трёхмодовой передачи (рис.4.6) производится мультиплексирование сигналов с трёх входов с волокон SMF одного типа моды LP_{01} . Для получения второго типа моды LP_{11a} используются фазовые преобразователи в виде светопропускающих пластин (Phase plate). Кроме того эти пластины позволяют формировать плоскости поляризации (в приводимом примере ортогональные), что позволяет получить третью моду LP_{11b} . Системы коллимирующих и фокусирующих линз (f_1 , f_2), светопропускающих и светоделящих кубиков представляют собой оптический мультиплексор/демультиплексор мод. В мультиплексоре дополнительно применяется оптический изолятор (Isolator) и двойное зеркало DM (dual mirror), пропускающие волны в одну сторону. В демультиплексоре дополнительно используется диафрагма (Iris) управления оптической интенсивностью. С учётом потерь оптической мощности мод, вносимых мультиплексором/демультиплексором и волоконной линией TMF, в системе передачи для протяженных линий необходимо оптическое усиление. Для построения усилителя трёх мод используется аналогичное волокно FMF с легированием части сердцевины атомами Er - эрбия (рис.4.7). В оптическом усилителе используется стандартная встречная накачки (Pump) под углом (Angled) на волне 980нм через систему зеркал (DM).

Структура промышленного мультиплексора мод приведена на рис.4.8 и его характеристики в табл.4.2.

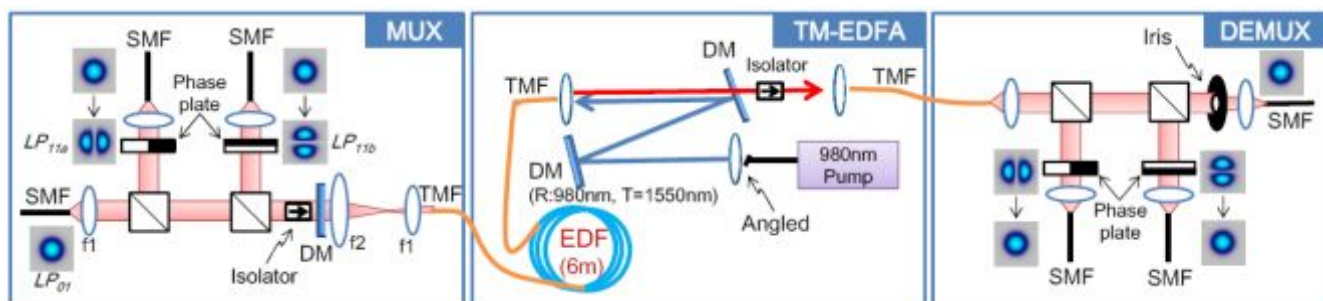


Рис. 4.6. Схема трёхмодовой оптической системы передачи с оптическим усилителем и поляризационным мультиплексированием [53]

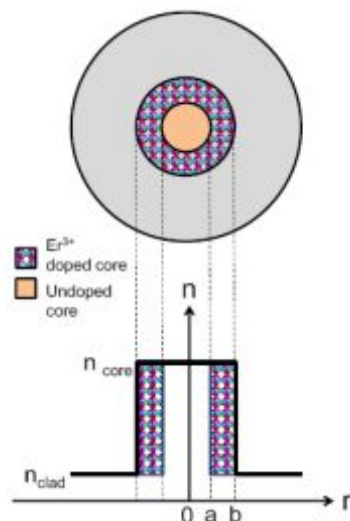


Рис. 4.7. Структура волокна FMF с легированием части сердцевины

Из характеристик модового мультиплексора видно, что изделие не отличается малыми потерями оптической мощности мод и его применение без оптического усиления не имеет смысла на протяженных линиях. По этой причине необходимо обратить внимание на характеристики оптических усилителей нескольких мод, которые уже представлены некоторыми исследователями в отдельных научно-технических изданиях [53, 54, 57, 58].

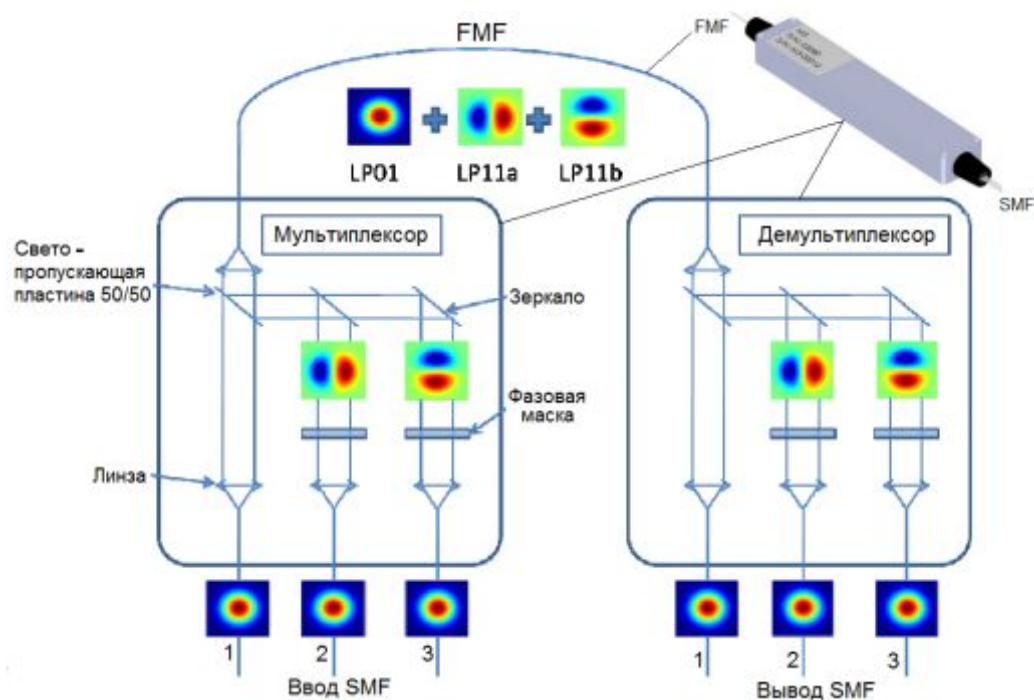


Рис. 4.8. Структура и конструкция типового двухмодового оптического мультиплексора/демультиплексора Kyliа

Табл. 4.2. Характеристики мультиплексора/демультиплексора трёх мод

Параметр	Обозначение	Минимальное	Типовое	Максимальное	Ед. изм.	Прим.
Вносимые потери LP_{01}	IL_{01}		4,0	5,0	дБ	7,5/8,5 с отрезками FMF 1м
Вносимые потери LP_{11a}	IL_{11a}		9,0	11	дБ	19/22 с отрезками FMF 1м
Вносимые потери LP_{11b}	IL_{11b}		9,0	11	дБ	19/22 с отрезками FMF 1м
Перекр. влияния между модами	Xtalk	20	22		дБ	Без коннекторов

Исследования оптических усилителей мод показывают (рис.4.9), что сохраняется неравномерность усиления 3 – 7 дБ в стандартном диапазоне волн С (1530-1560 нм), усиление зависит от уровня мощности мод на входе усилителя, величина усиления различных мод различается по диапазону волн на 2 – 3 дБ. Также по отдельным модам усиление зависит от величины мощности накачки усилителя, а разброс усиления может составить до 3,5 дБ на отдельных волнах. Применение каскадного включения оптических усилителей в протяженных линиях приведёт к увеличению неравномерности уровней оптических сигналов и дифференту по OSNR в оптических каналах.

Т.о. может потребоваться применение оптических эквалайзеров для выравнивания уровней мощности в отдельных оптических каналах на различных модах. В качестве подтверждения этого вывода приводятся результаты исследований передачи цифровых информационных потоков в оптических системах с усилителями на различных модах и волнах стандартного диапазона С (рис.4.10).

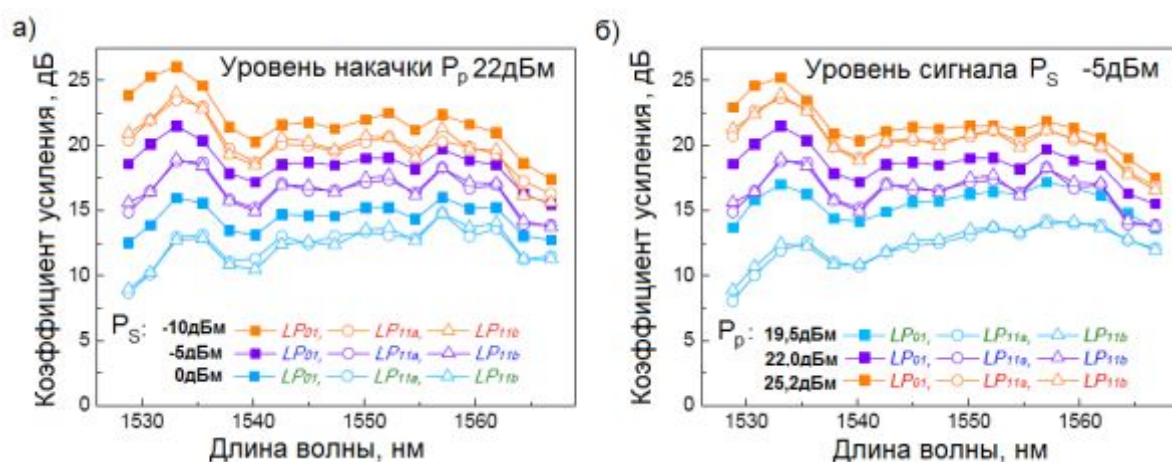


Рис. 4.9. Спектральные характеристики усиления эрбиевого усилителя 3-х мод при различных уровнях мод (а) и уровнях накачки (б)

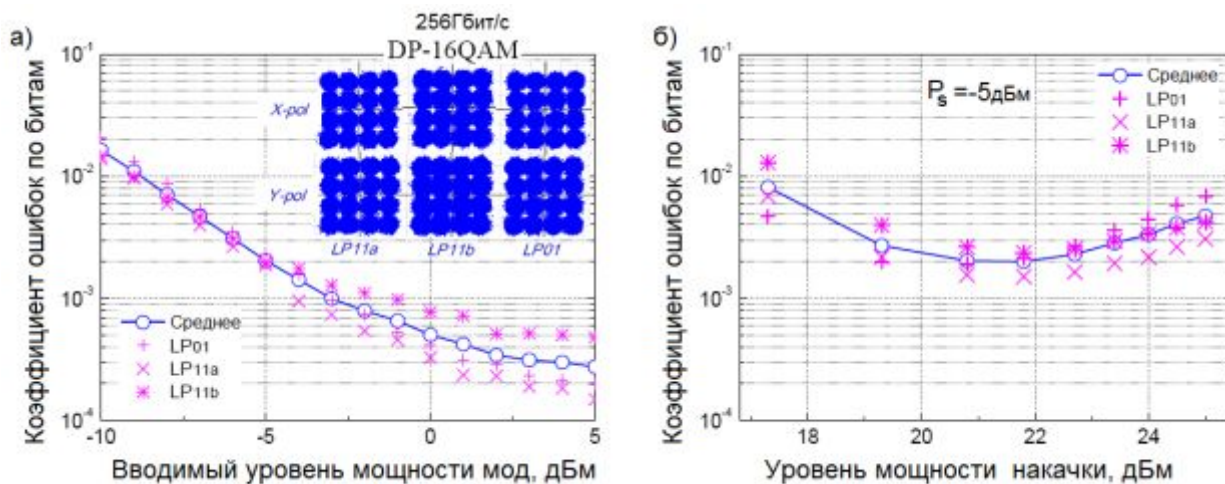


Рис. 4.10. Зависимости коэффициента ошибок в оптических каналах на трёх модах от уровня мощности мод (а) и уровня мощности накачки оптического усилителя (б) в диапазоне волн 1530 – 1560 нм

На каждой из 3-х мод организуется по одному спектральному каналу со скоростью передачи 256 Гбит/с с использованием поляризационного мультиплексирования (X-pol, Y-pol) и 16 позиционного квадратурного кодирования DP-16QAM. Системный параметр – коэффициент ошибок передачи двоичных бит BER заметно снижается при увеличении уровня мощности сигнала (рис.4.10а), что имеет простое физическое объяснение в увеличении отношения сигнал/шум. Увеличение уровня мощности накачки не всегда ведет к улучшению OSNR, т.к. накачка порождает дополнительные помехи.

Другое исследование BER для сигналов, проходящих оптическое усиление, показывает (рис.4.11), что его величина зависит от уровня мощности оптического канала на моде, но не зависит от длины волны. Такого рода зависимость может быть откорректирована в оптическом канале средствами процессора FEC в OTU4.

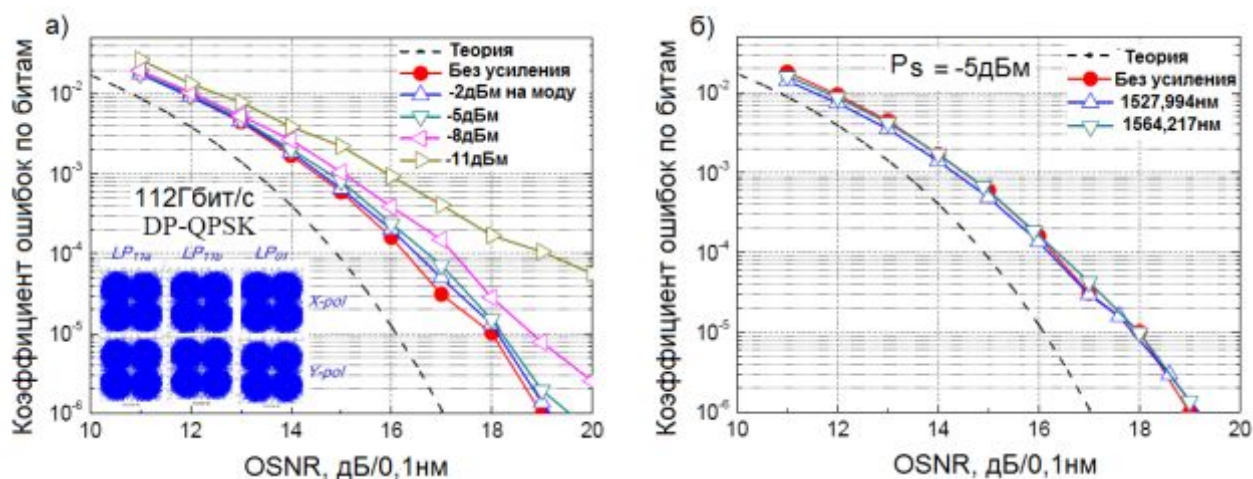


Рис. 4.11. Зависимость BER от уровня мощности оптического сигнала на входе оптического усилителя (а) и длин волн оптических каналов (б)

Интерес представляют исследования шумов оптического усиления нескольких мод. Пример такого практического исследования приводится в [54], где при уровне мощности каждой моды -12,8 дБм и совокупном уровне мощности всех мод -5 дБм получены коэффициенты усиления мод с разбросом 4 – 6 дБ (рис.4.12). Полученные значения шума при этом в среднем составляют около 5 дБ, что соответствует шумам одномодовых усилителей. Разброс коэффициента шума не превышает 2 дБ от среднего для различных мод (LP₁₁, LP₀₂).

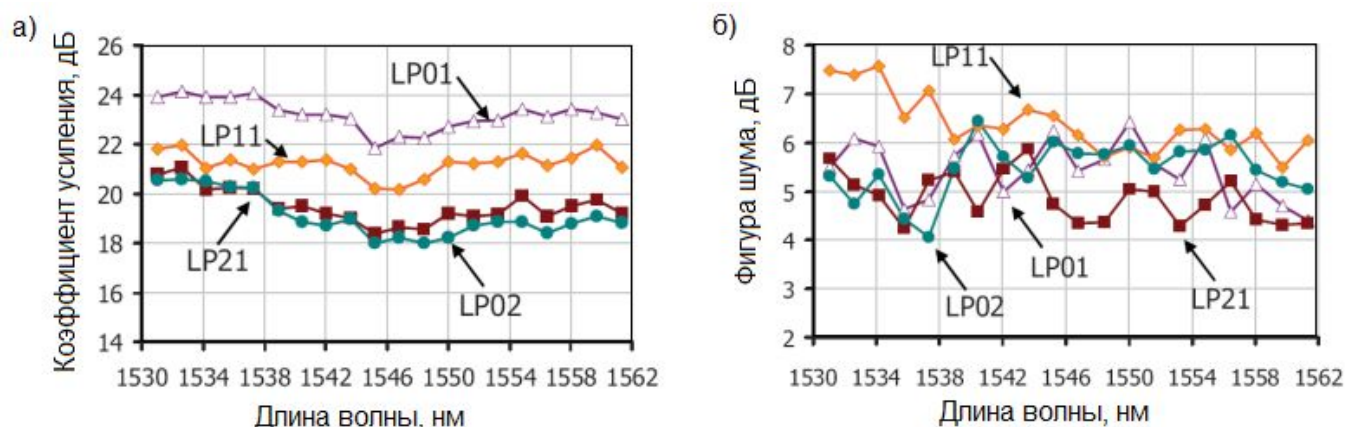


Рис. 4.12. Спектральная зависимость усиления 4-х модового оптического усилителя (а) и его шумы на модах (б)

4.3. Принципы построения систем передачи FMF

Для построения оптических систем передачи SDM-FMF необходимо решение ряда сложных задач стыка волокон типа FMF с волокнами от источников оптического информационного потока и к приёмникам этих потоков. Необходимыми компонентами таких систем также должны быть оптические усилители мультиплексированных мод LP и устройства для выделения/ввода отдельных мод LP. Функции коррекции дисперсионных искажений в волоконных линиях передачи FMF могут быть предусмотрены в электронных корректорах с цифровой обработкой сигналов, как это предусмотрено в стандартных когерентных системах на скоростях 112Гбит/с.

Ряд проведённых исследований и экспериментов, отраженных докладах международных научных конференций: R Ryf et al., OFC 2011 PDPB10 ; A. Li et al., OFC 2011, PDPB8; L. Gruner-Nielsen et al., OFC2012; PPD 5A.1, Y. Jung et al. ECOC 2013; V. Sleiffer et al. ECOC 2012, paper TH3.C.4; V. Sleiffer et al. PDP 6 IPC 2013 и в [57, 58], доказывают возможности реализации систем передачи SDM-FMF со скоростями на 3-х отдельных модах (576Гбит/с) при спектральном мультиплексировании 5 WDM каналов 112Гбит/с (32Гбод в формате 8PSK) каждый, на расстояние до 500км с оптическим усилением. Также показаны возможности наращивания скорости в системе передачи до 73Тбит/с при использовании 96 каналов WDM на 3-х модах SDM и скорости передачи данных 256Гбит/с в

формате PDM-16QAM в каждом канале, оптическим усилением FMF-EDFA и достижимым расстоянием передачи 119км, которое ограничено в основном дисперсионными искажениями.

Принципиальные компоненты системы SDM-FMF представлены на рис.4.13.

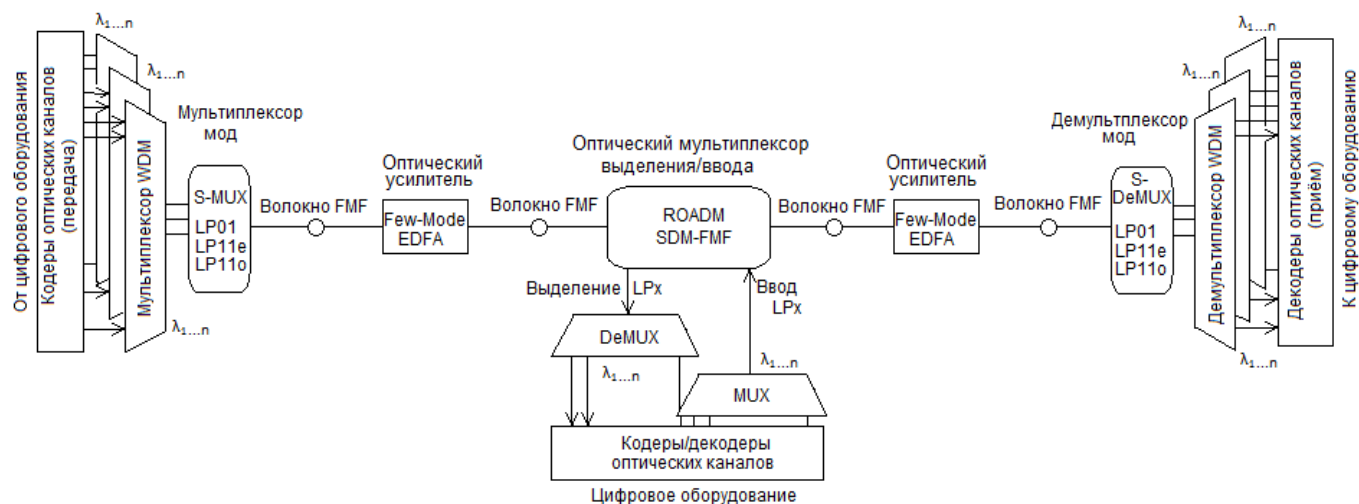


Рис. 4.13. Построение системы передачи WDM-SDM-FMF

4.4. Выводы

Доказано исследованиями принципиальная возможность построения систем оптической передачи SDM-FMF со скоростями передачи от 0,5 Тбит/с до (70 – 100) Тбит/с в ряде известных форматах кодирования (QPSK, 8PSK, 8QAM, 16QAM) для использования на коротких до 100 км и средних до 1000 км линиях с маломодовыми волокнами типа FMF.

Возможен выпуск оптических компонентов для стыка оптических передатчиков и приёмников с волокнами FMF, также компонентов для оптического усиления в волокнах FMF и доступа (выделения/ввода) оптических мод в промежуточных узлах.

Сложности в реализации систем SDM-FMF связаны с межмодовыми влияниями, дисперсионными искажениями и нелинейными эффектами, что может служить предметом отдельных исследований и разработок.

Контрольные вопросы

- 1 На какое число мультиплексируемых мод могут быть рассчитаны волокна FMF?
- 2 Что должно соблюдаться при мультиплексировании мод в FMF?
- 3 Возможно ли разделение оптических спектральных каналов на приёмной стороне для совпадающих длин волн на различных модах в FMF?

- 4 Какие геометрические размеры может иметь сердцевина и оболочка одиночного FMF?
- 5 Какие геометрические размеры могут быть у волокон MCF-FMF?
- 6 Какой может быть дисперсия волокон FMF?
- 7 Какими могут быть потери оптической мощности в FMF?
- 8 Что должно учитываться дополнительно в системах передачи с волокнами MCF-FMF?
- 9 Какими устройствами формируют, вводят и выводят моды в FMF?
- 10 Какие потери оптической мощности вносят оптические мультиплексоры и демультиплексоры мод?
- 11 В чём особенности построения оптических усилителей FMF-EDFA?
- 12 Какие неравномерности наблюдаются в усилении оптических усилителей FMF-EDFA?
- 13 На сколько отличаются шумы оптических усилителей FMF-EDFA на различных модах?
- 14 Какие компоненты входят в состав систем передачи WDM-SDM-FMF?
- 15 Что может быть достигнуто применением оптических систем передачи WDM-SDM-FMF?

5. ФОРМАТЫ МНОГОУРОВНЕВОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ И СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ СУПЕРКАНАЛОВ

Ограниченность полос пропускания одномодовых волокон, сердцевин многосерцевинных волокон и волокон с несколькими мультиплексируемыми модами предполагает использование форматов представления информационных сигналов в оптические каналы (оптические суперканалы) с максимально возможной спектральной эффективностью, оцениваемой в единицах бит/с/Гц.

Как показано выше, спектральная эффективность связана с требованиями по OSNR, уровням мощности передачи, дистанциями организации каналов. При этом сложность исполнения схем кодеров и декодеров с корректорами дисперсионных искажений, восстановления синхронизации и несущей оптической частоты при когерентном приёме, поляризационных мультиплексоров и других устройств оптических передатчиков и приёмников вместе с их стоимостью нарастают с каждой единицей повышения бит/с/Гц пропорционально. Необходимо определить способы формирования оптических каналов с терабитными и петабитными скоростями, соответствующие возможностям применения. Ключевой составляющей этого определения является формат представления информационных данных для модуляции оптической несущей (или поднесущей) частоты.

Ниже представлены основные форматы оптической модуляции, которые могут быть использованы при реализации оптических гигабитных, терабитных и петабитных каналов с прямым и когерентным детектированием.

5.1. Простые форматы модуляции

К простым форматам оптической модуляции относятся, как правило, форматы с модуляцией интенсивности оптической несущей частоты с двумя и более градациями по уровню интенсивности, обозначаемыми OOK, On-Off Key, включено – выключено (вид манипуляции оптическим сигналом): NRZ, RZ, и нескольких амплитудных состояний (ASK, amplitude shift keying) CRZ; CSRZ, DB, AMI (рис.5.1).

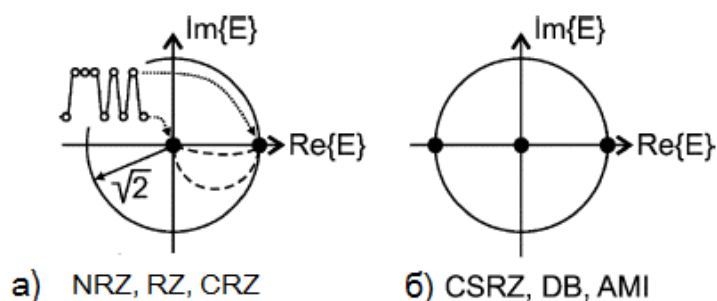


Рис. 5.1. Круговые диаграммы для представления форматов модуляции NRZ, RZ, CRZ; CSRZ, DB, AMI

На рис.5.1 обозначено:

$\text{Re}\{E\}$ – ось, отражающая величину интенсивности (мощности) импульсного оптического излучения;

$\text{Im}\{E\}$ – ось, отражающая фазовое состояние импульса оптической мощности;

NRZ, RZ, CRZ, Non-Return-to-Zero, Return-to-Zero, Chirped RZ, модуляция без возвращения к нулю, модуляция с возвращением к нулю, модуляция с частотным предискажением (для протяженных линий);

CSRZ, Carrier Suppressed Return to Zero, формат с возвращением к нулю и подавление несущей частоты;

DB, Doubinary, доубинарная модуляция;

AMI, Alternate Mark Inversion, кодирование с инверсией.

Эти форматы отличаются простыми схемами реализации, возможностью подавления оптической несущей частоты (формат CSRZ), это важно для снижения нелинейных помех, но очень низкой спектральной эффективностью (в пределах 0,4-0,8 бит/с/Гц), что при скоростях передачи свыше 40 Гбит/с требует использования сетки оптических несущих частот с интервалом более 100 ГГц. Т.о. эти форматы модуляции при использовании сетки 100 ГГц и скорости передачи в одном спектральном канале 40-43 Гбит/с позволяют теоретически реализовать пропускную способность не более 25 Тбит/с в диапазоне волн 1260-1625 нм одномодового волокна с улучшенными характеристиками. В диапазонах с наименьшими потерями оптической мощности (C+L, 1530-1625 нм) достижимая скорость передачи не превысит в этом случае 5 Тбит/с, что недостаточно для достижения петабитных скоростей даже в волокнах SDM-MCF-FMF.

5.2. Фазовые форматы модуляции

Реализация фазовых форматов оптической модуляции возможна только в более сложных схемах оптических модуляторов, т.е. вместо одного каскада модулятора, как правило, это модулятор MZM, применяются 2-х и 3-х каскадные схемы с последовательным или параллельным включением (рис.1.21) Также требуется более сложная электронная схема кодера фазовых состояний.

Фазовые форматы оптической модуляции: BPSK, DPSK, QPSK, DnPSK и их расширение с двумя мультиплексированными ортогональными когерентными лучами PDM (polarization-division multiplexed, поляризационное мультиплексирование) от одного источника одномодового узкополосного лазера: PDM-BPSK, PDM-DPSK, PDM-QPSK и PDM-DnPSK, где $n=2, 4, 8, 16$ и т.д.

Фазовые состояния оптических импульсов кодируемых групп имеют равномерное распределение в пределах тактового интервала при сохранении одинаковой оптической мощности (пример на рис.5.2).

Преимущество таких форматов состоит в увеличении спектральной эффективности до 2 - 4 бит/с/Гц и большего значения, что при сохранении сетки оптических частот 100 ГГц позволяет увеличить скорость передачи информационных потоков в 2-4 и более раз. Требования по OSNR существенно ниже (на 5-8 дБ), чем для простых форматов n -ASK с несколькими уровнями мощности (рис.5.3)

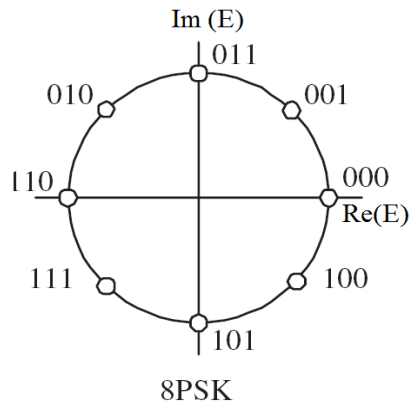


Рис. 5.2. Круговая диаграмма фазовых состояний формата оптической модуляции 8PSK

Основными проблемами фазовых форматов модуляции при реализации фиксированных по полосе частот оптических каналов на 100 Гбит/с передачу и более (до 1 Тбит/с) помимо возрастания сложности электронно-оптических устройств является резкое повышение требования по OSNR (с 12 дБ для PDM-BPSK до 35 дБ для PDM-128PSK) и повышение чувствительности к дисперсионным искажениям [60].

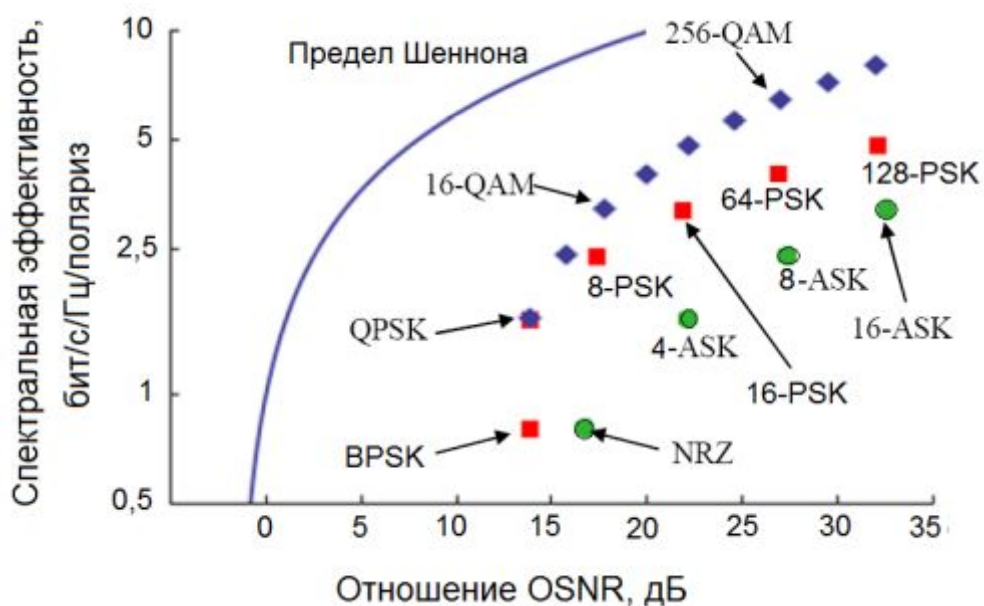


Рис. 5.3. Спектральная эффективность форматов модуляции для суперканалов с вероятностью ошибок 10^{-12} [59]

Лучшие показатели по спектральной эффективности, как показано в исследованиях [59], принадлежат квадратурным форматам модуляции n-QAM (рис.5.3), однако они ограничивают возможности по расстоянию передачи и требуемому OSNR (рис.5.4), т.е. достижение одной скорости передачи можно

реализовать 4-мя спектральными каналами BPSK, 2-мя спектральными каналами QPSK или 1-м спектральным каналом 16QAM, но с указанными ограничениями.

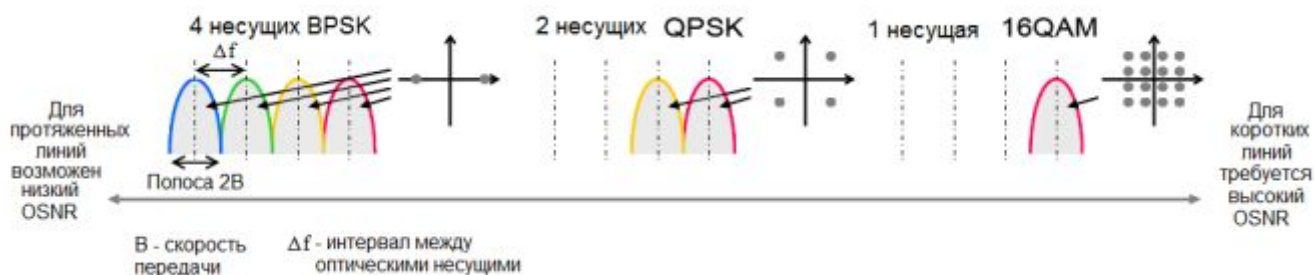


Рис. 5.4. Возможности фазовых и квадратурных форматов

При интервале между несущими $\Delta f = 50$ ГГц и скорости передачи на каждой из поднесущих 25 Гбит/с полоса частот для потока 100 Гбит/с требуется не менее 200 ГГц в варианте формата BPSK. Использование 2-х несущих и формата QPSK делает полосу 100 ГГц. Переход к формату 16QAM даёт возможность по использованию полосы частот 50 ГГц для потока 100 Гбит/с.

5.3. Квадратурно-амплитудные форматы модуляции

Квадратурные форматы модуляции вместе с поляризационным мультиплексированием PDM-n-QAM (quadrature amplitude shift keying or modulation) наиболее сложные для реализации в их электронном и оптическом формированиях, но могут обеспечить наилучшие показатели по спектральной эффективности, помехозащищённости и устойчивости к дисперсионным и нелинейным искажениям для скоростей передачи в суперканалах от 100 Гбит/с до 1 Тбит/с (рис.5.5).

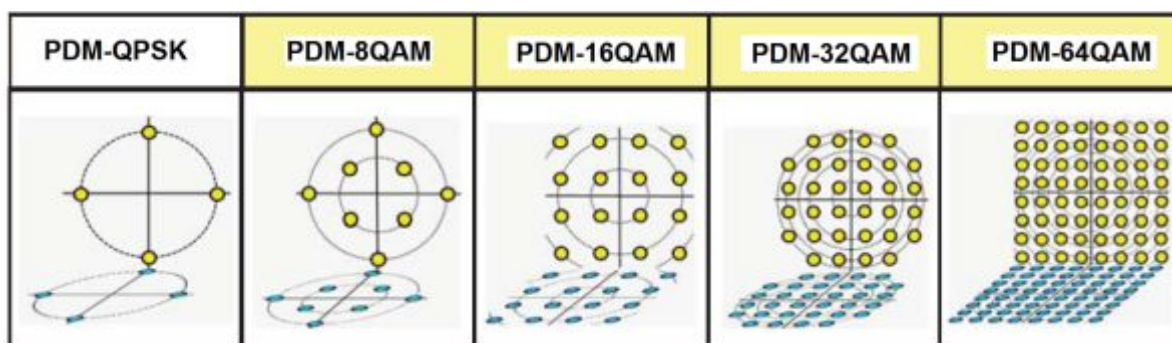


Рис. 5.5. Квадратурно-амплитудные форматы модуляции

Наибольшее распространение в экспериментальных и коммерческих системах получили форматы квадратурного и амплитудно-квадратурного кодирования PDM-QPSK, PDM-8QAM, PDM-16QAM, PDM-32QAM и PDM-64QAM. Больше число позиций QAM резко сокращает дистанции передачи до расстояний менее 100 км из-за

требования высокого OSNR, который фактически сопоставим с энергетическим потенциалом канала (рис.5.6 и табл.2.2), что в реализации не пригодно даже для оптических сетей типа «МЕТРО».

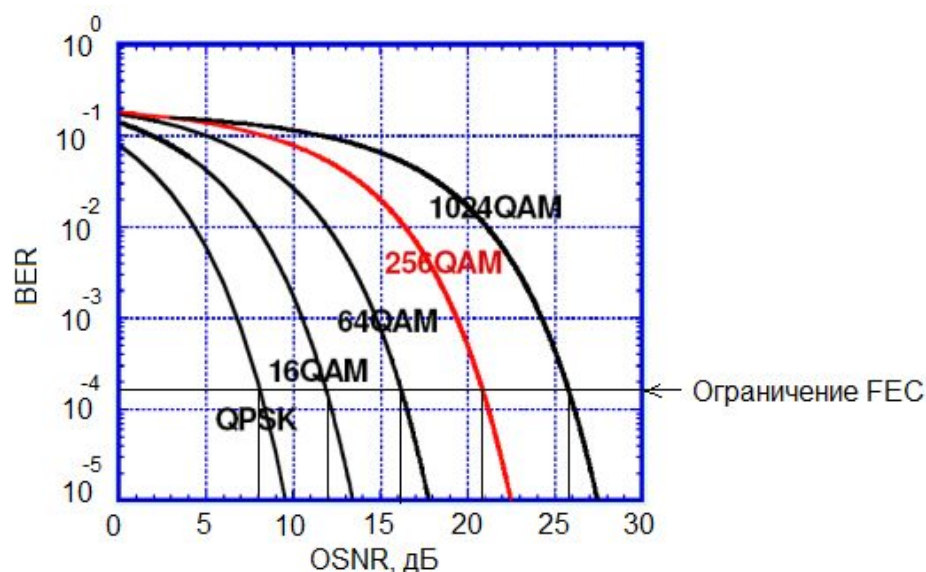


Рис. 5.6. Ограничения квадратурно-амплитудных форматов по OSNR

Другое сочетание квадратурно-амплитудных форматов не выше 16 или 64QAM и форматов оптических суперканалов позволяет конструировать системы с терабитными и петабитными скоростями в стандартных волокнах для протяженных линий [63].

5.4. Форматы оптических суперканалов и способы их реализации

Известные типовые форматы по реализации экспериментальных оптических суперканалов имеют две разновидности: оптический OFDM формат; формат WDM с фильтрами Найквиста (пример построения передатчиков рис.5.7). Первый имеет один источник оптических поднесущих для суперканала [55, 61, 97, 102].

Второй может иметь несколько отдельных источников оптических несущих для суперканала. Второй формат также предусматривает использование фильтрации Найквиста (или близкое к нему решение, квази-Найквист с передаточной характеристикой, близкой по форме к прямоугольной). Такое решение позволяет ослабить требования стабильности частот отдельных источников (рис.5.8) и выполнять символьное решение (символьная скорость B в определенном формате к полосе частот для сигнала на поднесущей в полосе Δf) $B/\Delta f$ отличным от 1, т.е. в пределах 0,8 - 1,1. Однако своеобразной платой за это является большая ширина спектра.

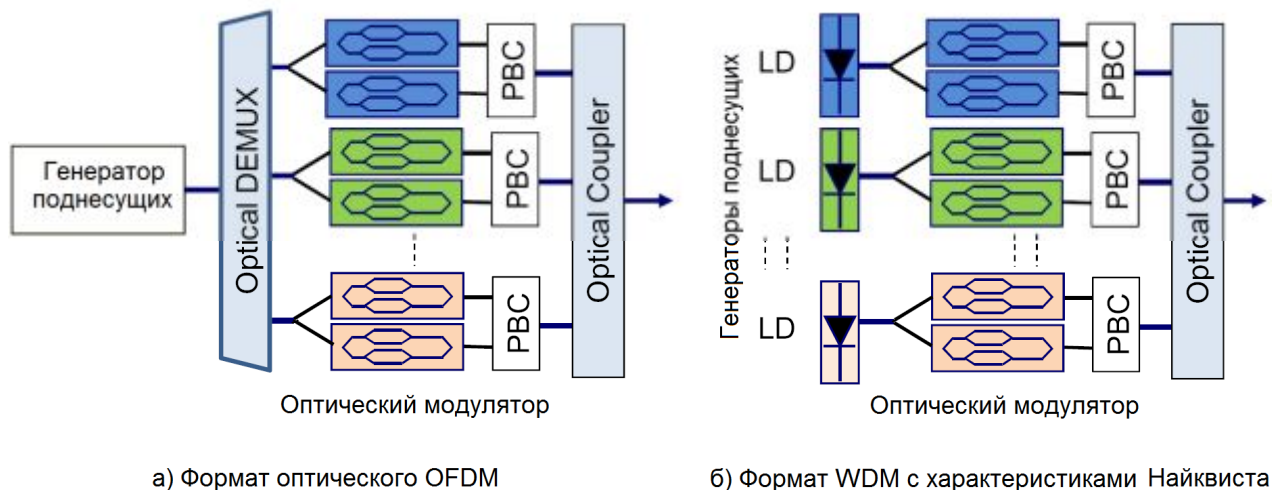


Рис. 5.7. Передатчики оптических суперканалов

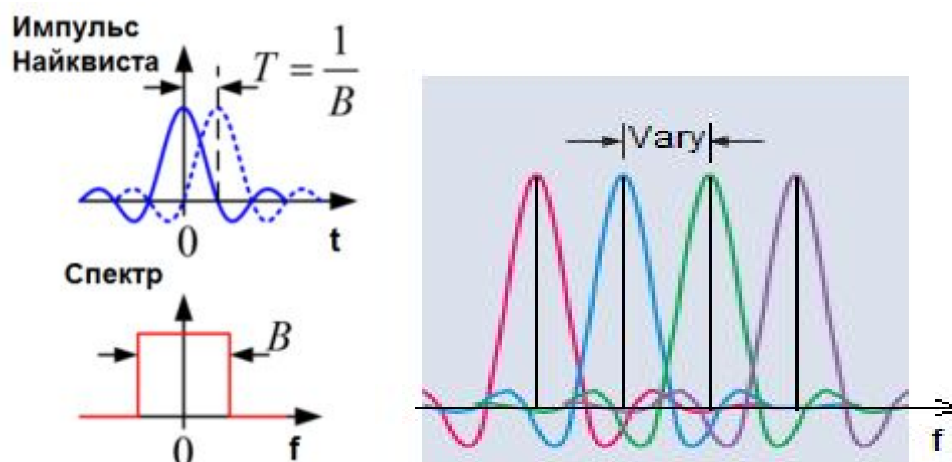


Рис 5.8. Импульс Найквиста и спектр поднесущих оптического суперканала WDM

Применение OFDM предусмотрено с учётом символического отношения $B/\Delta f$ фиксированным и равным 1. Такое решение снижает взаимные влияния между мультиплексируемыми подканалами (рис.5.9), но требует единый источник для поднесущих. При этом формируемый спектр суперканала OFDM уже спектра канала при WDM. Каждое из решений по суперканалам с OFDM может иметь свои спектральные характеристики, увязанные с форматом модуляции.

Кроме того, сочетание OFDM и гибкого формирования суперканалов в диапазоне 200 Гбит/с – 1,5 Тбит/с, как показано в ряде публикаций, предполагает развитие технологии «гибкой сетки» или flex grid (FG) OFDM, или variable bandwidth (VB) OFDM [90, 91, 92, 102]. Благодаря этой технике становится возможным гибкое формирование спектра любого канала, в том числе суперканала в определённом диапазоне оптических частот и масштабирование ёмкости оптической сети (рис.5.10).



Рис. 5.9. Размещение подканалов в оптическом суперканале OFDM

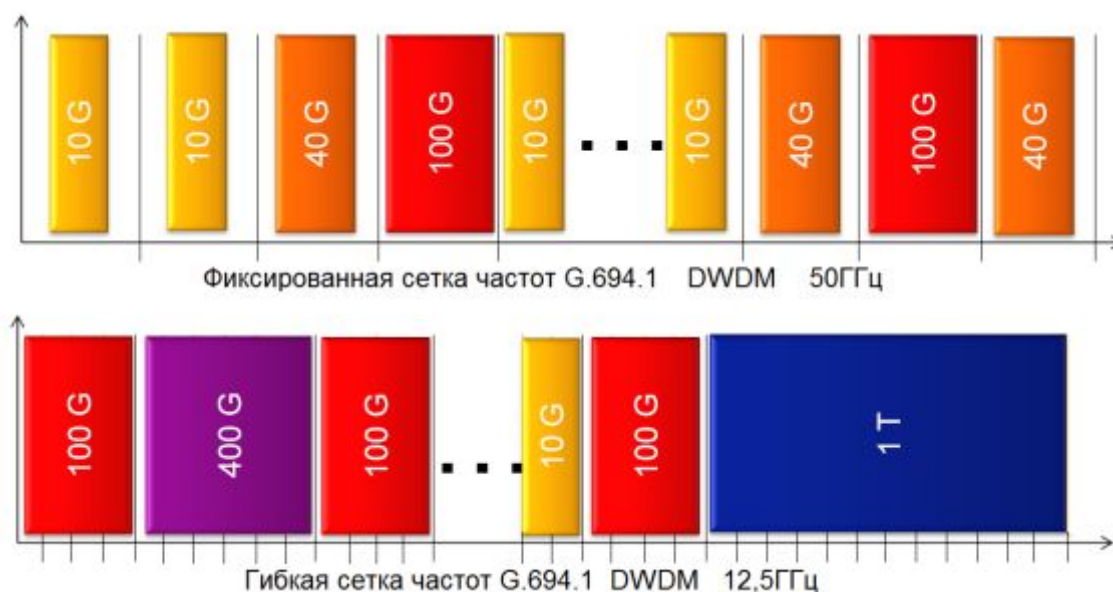


Рис.5.10. Переход к сетке частот DWDM вида «flex grid»

Примеры ряда экспериментальных решений по отдельным суперканалам приведены в табл.5.1.

Приёмная сторона суперканала предполагает разделение оптических поднесущих по отдельным каналам обработки с когерентным гомодинным приёмом и цепью цифровых преобразований (рис.5.11). Поднесущие суперканалов разделяются пространственными фильтрами на основе волноводных решеток или интерливинговых фильтров (см. главу 6) с характеристиками передачи близкими к характеристикам фильтра Найквиста. Пример спектров оптических суперканалов представлен на рис.5.12, где с использованием DWDM объединены 7 поднесущих с интервалом 25 ГГц и общей скоростью передачи информационного потока 1,12 Тбит/с (160 Гбит/с на каждой в формате PDM-16QAM).

Табл. 5.1 .Характеристики экспериментальных систем с суперканалами [62]

Скорость в с/канале, Тбит/с	Формат модуляции	Число каналов WDM	Дистанция передачи, км	Спектральная эффективность, бит/с/Гц	Символьная эффективность, В/Δf, Бод/Гц	Число лазеров для каждого с/канала
1,3 (13×100Гбит)	PDM-QPSK	24	2400	2,9	1.0	1
1,28 (10×128Гбит)	PDM-64QAM	7	320	7,7	0,9	1
1,28 (4×320Гбит)	PDM-16QAM	22	2400	5,0	0,8	4
1,12 (7×160Гбит)	PDM-16QAM	7	400	5,0	0,8	1
1,2/1,05 (16/14×75Гбит)	PDM-8QAM	18	1500	5,0	1,0	1

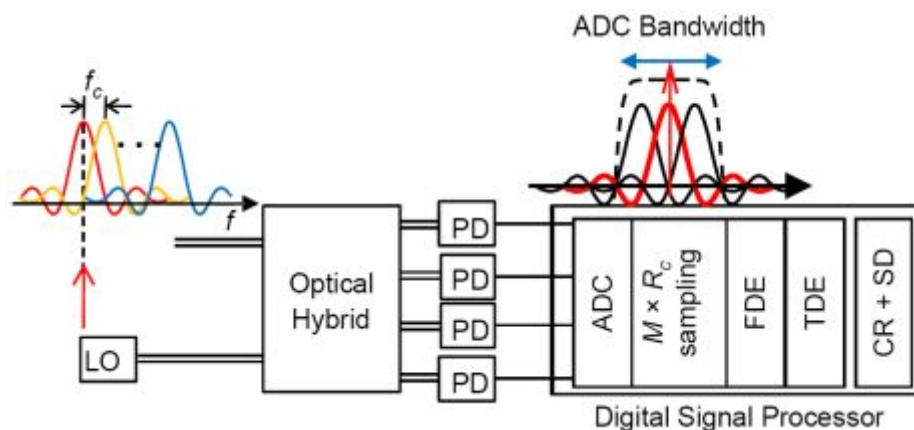


Рис. 5.11. Цифровой когерентный приёмник для обработки сигнала на одной из поднесущих оптического суперканала OFDM [64]

На рис.5.11 обозначено: LO, local oscillator – локальный оптический генератор; PD, photodetector - фотодетектор; ADC, analog to digital converter – аналого-цифровой преобразователь; FDE, frequency domain equalizer – узел выравнивания частот; TDE, time domain equalizer – узел выравнивания временных соотношений; CR, carrier recovery – восстановление несущей; SD, symbol detection – обнаружение символа; f_c – интервал между поднесущими OFDM.

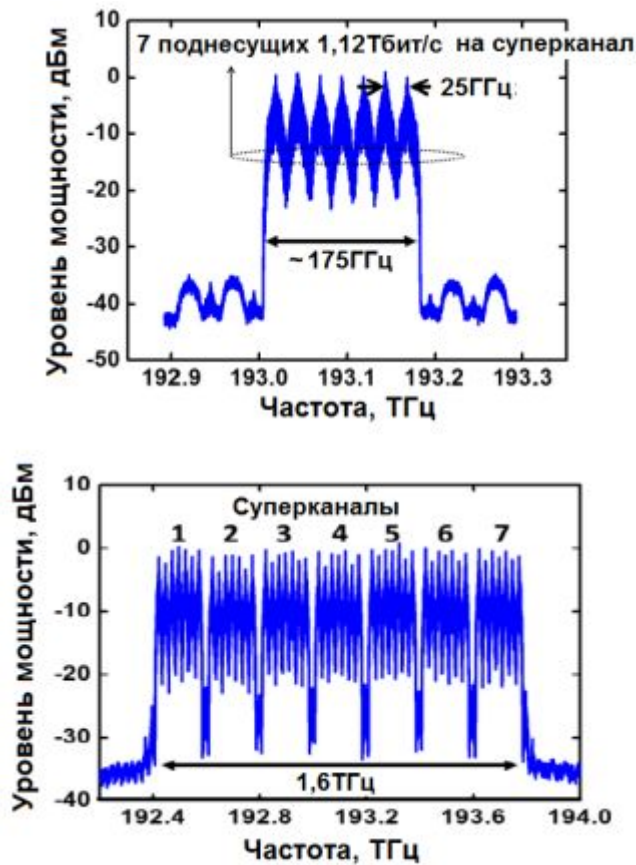


Рис. 5.12. Спектр суперканала 7×1,12 Тбит/с и суперканалов WDM 7×1,12 Тбит/с [62]

Использование формата спектра 7×1,12Тбит/с только в диапазонах С, L стандартных волокон SMF (G.652) позволяет достигнуть скорости около 80Тбит/с, а привлечение диапазонов S и E улучшенных волокон G.652 позволят увеличить пропускную способность до 200Тбит/с при соответствующем преодолении дисперсионных и нелинейных ограничений.

Масштабируемость оптической сети на основе суперканалов позволяет в дальнейшем построить так называемые эластичные или гибкие оптические транспортные сети или системы передачи EOTS, EOTN, FlexOTS, FlexOTN (elastic or flexible optical transport system (network)).

5.5. Методика расчета энергетических параметров суперканалов

В случае расчета энергетических параметров суперканала нельзя производить расчет OSNR по методике ITU-T G.680, а виду того, что накопление шумов за счет нелинейных помех будет находиться в узком диапазоне частот. По этой причине экспериментально получена формула расчета суперканалов с N-секциями [65, 78, 88].

$$OSNR = \frac{P_{ch}}{P_{ASE} + P_{NLI}}, \quad (5.1)$$

где P_{ch} – уровень мощности в канале;

P_{ASE} – шум усилителя;

P_{NLI} – мощность продуктов нелинейности, определяемая по формуле.

$$P_{NLI} \approx \left(\frac{2}{3}\right)^3 \cdot N_s \cdot \gamma^2 \cdot L_{eff} \cdot P_{ch}^3 \cdot \frac{\log(\pi^2 |\beta_2| L_{eff} N_{ch}^2 R_s^2)}{\pi |\beta_2| R_s^2} Bn, \quad (5.2)$$

где N_s – количество WDM секций;

L_{eff} – эффективная длина волокна (для участка в 100 км составляет 23 км), км;

β_2 – коэффициент дисперсии волокна (-20 пс²/км для SMF), пс²/км;

N_{ch} – количество каналов в DWDM системе;

Bn – полоса частот, на которую воздействует шум (порядка 0,1 нм), нм;

R_s – данный параметр соответствует битовой скорости, бит/с.

При расчете суперканалов следует также учитывать параметры оптического фильтра Найквиста, необходимого для формирования полосы частот канала Δf . Выбор полосы зависит от соответствующего формата модуляции, используемого в системе (чаще всего используется DP-QPSK, DP-16 QAM). При использовании квадратурной модуляции $\Delta f \cong R_s$, а в случае использования квадратурно-амплитудной модуляции $\Delta f \cong 1.1 \cdot R_s$ [79, 80].

Данный фильтр имеет следующую прямоугольную передаточную характеристику:

$$H(f) = \begin{cases} \alpha, & (f_c - B/2 < f < f_c + B/2) \\ d & \end{cases} \quad (5.3)$$

где α – параметр, оценивающий затухание, дБ;

d – глубина затухания, дБ;

f_c – центральная частота оптического сигнала, ГГц;

B – оптическая полоса, ГГц.

В оптических суперканалах, также существенное значение имеет выбор оптимального значения оптической мощности. На рис. 5.13 приведены оценки дальности девятиканальной системы передач для SMF и NZDSF – волокон при $L_{eff} = 23$ км, $R_s = 32$ Гбод/с. Аналитический расчет и симуляция производилась при условии $BER = 10^{-3}$ [81].

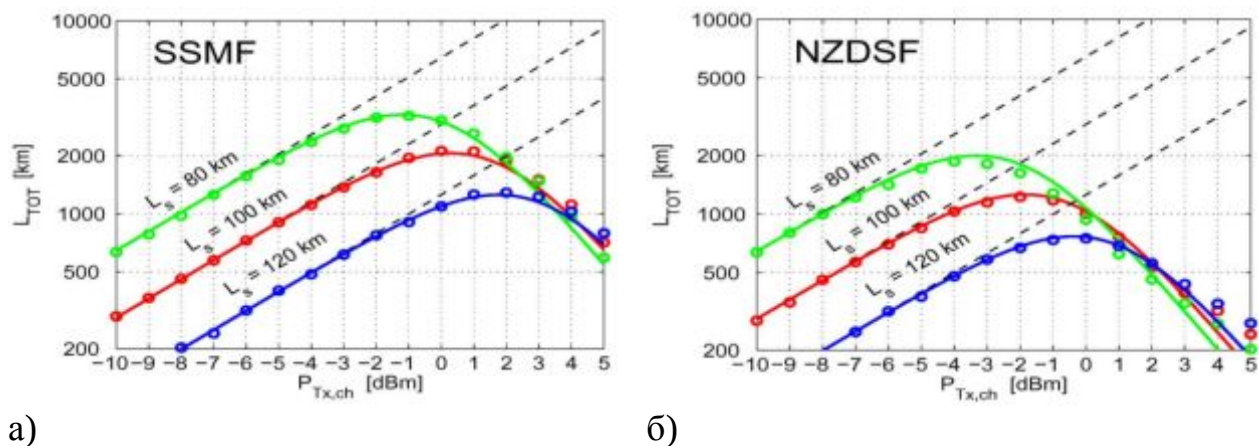


Рис. 5.13. Дальность передачи суперканала для оптической секции с а) SMF – волокном; б) NZDSF – волокном
(маркеры – симуляция, сплошная линия – аналитическая модель)

Предложенная методика только частично позволяет произвести оценочные расчёты оптических суперканалов без привязки к каналам типа flex grid SuperChannel, т.е. к каналам с управляемой ёмкостью передачи.

В заключение необходимо отметить разработки оптических суперканалов специалистами российской компании Т8, реализуемые в платформе ВОЛГА [66].

5.6. Выводы

Достижение терабитных скоростей передачи возможно в стандартных одномодовых волокнах при комплексном применении многоуровневых форматов модуляции PDM-m-QAM и форматов суперканалов вида OFDM и WDM с поднесущими.

Для достижения петабитных скоростей подходящим решением может быть MCF и FMF, где в каждой сердцевине и/или на моде можно организовать скорость до 200 Тбит/с. Т.о. при числе сердцевин/мод более 5 может достигаться скорость 1Пбит/с и выше.

Необходимо детальное исследование взаимосвязи между форматом модуляции, форматом суперканала, скоростью передачи и характеристиками среды передачи с когерентным и некогерентным приёмом.

Необходима оценка сложности и стоимости реализаций оптических суперканалов с различными форматами для построения масштабируемых эластичных, т.е. гибко подстраиваемых под пользовательский трафик, оптических систем и сетей.

Необходимы методики планирования и проектирования оптических суперканалов с изменяемой пропускной способностью.

Контрольные вопросы

- 1 Почему нужны форматы модуляции?
- 2 Что такое спектральная эффективность модуляционного формата?
- 3 Какие форматы оптической модуляции называют простыми? и почему?
- 4 Сколько уровней ASK у простых форматов модуляции?
- 5 Что обозначает CSRZ?
- 6 В чём недостатки простых форматов модуляции с точки зрения конструкций терабитных систем передачи?
- 7 Почему схемы для реализации фазовых форматов оптической модуляции сложнее схем для простых форматов?
- 8 В чём преимущества фазовых форматов модуляции n -PSK?
- 9 Как двоичное состояние информационного сигнала преобразуется в фазу оптического импульса?
- 10 Какие недостатки имеют фазовые форматы модуляции?
- 11 Какое назначение имеет поляризационное мультиплексирование PDM?
- 12 Что обозначает QPSK и QAM?
- 13 В чём преимущество квадратурных форматов оптической модуляции?
- 14 Какие ограничения известны для квадратурных форматов модуляции?
- 15 Что представляет собой оптический суперканал?
- 16 Какие варианты реализации могут иметь оптические суперканалы?
- 17 Чем отличаются форматы суперканалов?
- 18 Что представляет собой оптический спектр Найквиста?
- 19 Из каких компонентов конструируются оптические передатчики и приёмники суперканалов?
- 20 Какие скорости передачи достижимы в одном суперканале?
- 21 Сколько суперканалов можно организовать в диапазонах C, L стандартного оптического волокна?
- 22 Чем определяется отношение OSNR в оптическом суперканале?
- 23 От чего зависит мощность продуктов нелинейности?
- 24 Каким может быть оптимальное значение уровня мощности в оптическом суперканале в волокнах ?

6. СОВРЕМЕННАЯ И ПЕРСПЕКТИВНАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Компонентная база оптических систем с сверхвысокими скоростями передачи (терабит/петабит/с) подразделяется на интегральную электронную и интегральную оптическую. Основными требованиями к этим компонентам являются: высокое быстродействие, т.е. включение и выключение не должно сказываться существенно на форме импульсных сигналов; широкая полоса пропускания (оцениваемая десятками ТГц) оптических трактов; высокая степень интеграции/плотности элементов (электронных и оптических) в схемах; возможности изменений (программирования) функций элементов (контроллеров); минимальное потребление энергии; малые габариты и масса; химическая и радиационная безопасность элементов; длительный срок службы (типовое: не менее 10^5 часов) [16].

С учётом уже существующих достижений в разработке стандартных технологий передачи информационных данных и перспективы развития оптической транспортной иерархии OTN/OTH и Ethernet на скоростные режимы до 1 Тбит/с в главе предлагается краткий обзор компонентной базы с представлением возможностей и характеристик, удовлетворяющей выше приведённым требованиям.

Базой для реализации оптических и электрооптических схем является кремниевая и индий-фосфорная подложка, которую часто называю основой фотонных интегральных схем PIC (photonic integration circuit) [16, 96].

6.1. Электронные компоненты передатчиков, приёмников, коммутаторов, кодеров и декодеров для оптических каналов

Интегральные электронные компоненты передатчиков, приёмников, коммутаторов, кодеров и декодеров, выполнялись до недавнего времени (2010год) преимущественно в виде цифровых и аналоговых схем общего назначения. Для реализации отдельных специфических функций систем передачи такие решения не удовлетворяли требованиям по нарастающей скорости обработки, интеграции, расходу энергии и т.д. Переход к технологиям транспортных сетей для высоких скоростей (в начале к SDH 10/40Гбит/с, а затем к OTH, Ethernet, TP-MPLS 10/40/100Гбит/с) потребовал новых решений по электронным компонентам с реализацией операций обработки блоков цифровых данных в реальном времени при нарастающих скоростях передачи, коммутации, исправления ошибок, управления, декодирования на приёме, восстановления фазовых соотношений при когерентном детектировании и т.д.

Такими решениями стали [16]:

ASIC, Application-Specific Integrated Circuit, интегральная схема для специфического применения, т.е. схема, специализированная для решения конкретной задачи;

ASSP, Application Specific Standard Product, стандартный продукт специального применения;

mP, microprocessor, микропроцессор – программируемое устройство для выполнения логических и арифметических операций;

DSP, Digital signal processing, цифровой сигнальный процессор – устройство для цифровой обработки сигналов реального времени.

Они реализуются перепрограммируемой универсальной процессорной логикой FPGA (field-programmable gate array, программируемая пользователем вентильная матрица — полупроводниковое устройство, конфигурируемое производителем или разработчиком после изготовления), которая удобна для реализации любых по сложности устройств формирования цифровых блоков, включая коммутацию и мультиплексирование. Они стали неотъемлемой частью транспондера (transponder); мукспондера (muxponder); регенератора (regenerator). Плотность логических компонентов и регистров на подложке превышает 10^3 , а блоков памяти более 2000.

Примером таких компонент может служить разработка компании Altera Stratix 10FPGA and SoCs (аналогично у компании Atmel), которая поддерживает скорости обработки данных более 10Тфлоп, четыре типовых приемопередатчика на скорости 28/58Гбит/с. Выполнена по технологии 14нм от Intel.

На рис.6.1 представлена структура мультиплексирующего транспондера, согласуемого с нагрузками и оптическим каналом средствами оптических модулей (Opt Mod), выполняемого на основе схемы Stratix IV FPGAs (28нм) [www.altera.com].

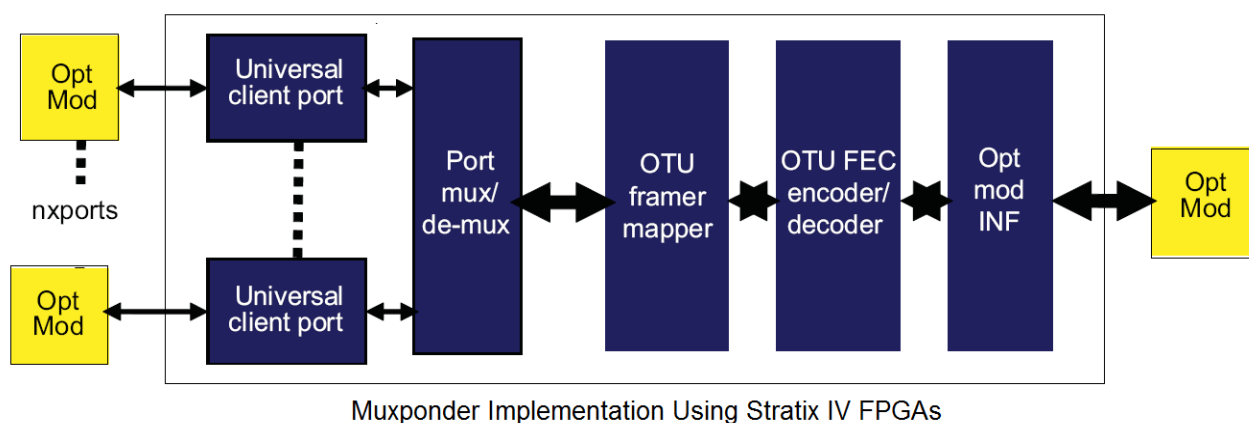


Рис. 6.1. Пример использования схемы Stratix IV FPGAs для построения мукспондера ОTH

Компания «Альтера» пошла по пути развития архитектур FPGA в семействе FLEX10K, так называемой двухуровневой архитектурой матрицы соединений, в которой логические элементы объединяются в группы – логические блоки. Внутри логических блоков логические элементы соединяются посредством локальной программируемой матрицы соединений.

Логические блоки связаны между собой и с элементами ввода-вывода посредством глобальной программируемой матрицы соединений (ГПМС).

Локальная и глобальная матрицы соединений имеют непрерывную структуру, где для каждого соединения выделяется непрерывный канал.

Дальнейшее развитие электронных компонентов идет по пути создания комбинированных архитектур, сочетающих в себе удобство реализации алгоритмов цифровой обработки сигналов на базе таблиц перекодировок и реконфигурируемых модулей памяти, характерных для структур FPGA и многоуровневых программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), с удобством реализации цифровых устройств на архитектурах CPLD (complex programmable logic device). Для сравнения: CPLD изготавливается по технологии энергонезависимой памяти с возможностью многократного электрического программирования; FPGA представляет собой простую технологию КМОП с возможностью однократного программирования, известную как классическую технологию «прожига» подзатворного окисла.

Реализация оптических суперканалов с точки зрения спектральной эффективности, стоимости, востребованности, по мнению компании Infinera, определяется электронными и оптическими компонентами одновременно (рис.6.2). Применение кремниевой наноэлектроники позволяет увеличить производительность цифровых устройств и сократить число оптических компонент.

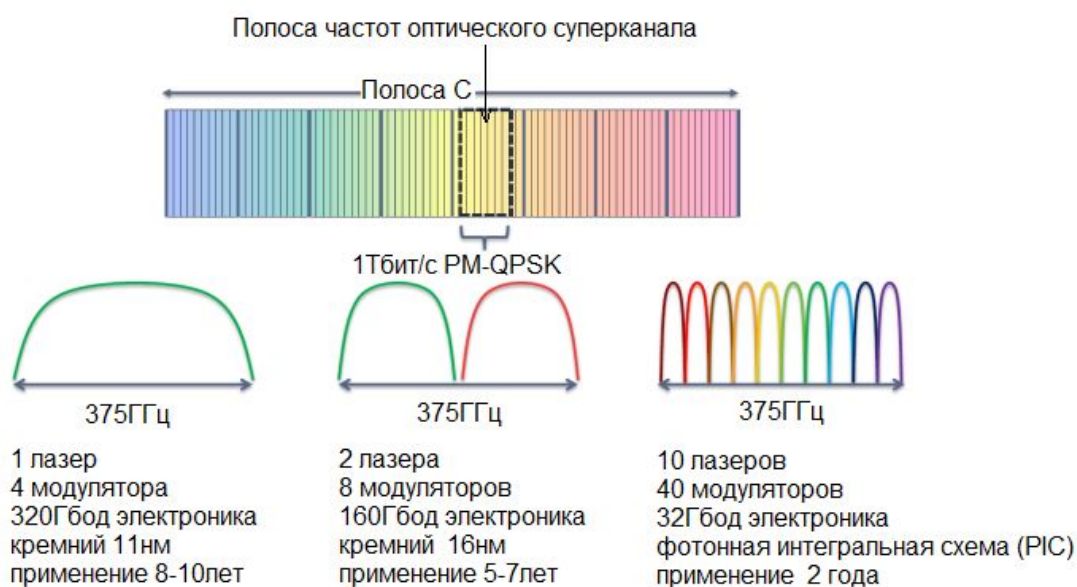


Рис. 6.2. Компоненты оптического суперканала на 1 Тбит/с в фиксированной полосе частот 375 ГГц для формата модуляции PM-QPSK от компании Infinera

6.2. Оптические компоненты передатчиков, приёмников, усилителей, коммутаторов, мультиплексоров выделения/ввода

Оптические компоненты для построения систем со сверхвысокими скоростями передачи, в отличие от электронных, представлены в большей номенклатуре и в меньшей степени интеграции, обусловленной габаритами, увязанными с длинами волн оптического диапазона (1260 нм – 1675 нм) [16].

Компоненты занимают следующий перечень: источники оптического излучения – узкополосные, перестраиваемые одномодовые лазеры; модуляторы Маха-Зендера с каскадным и параллельным включением, выполняемые на единой подложке;

оптические поляризаторы; интерливинговые фильтры для перемежения полос частот оптических каналов; оптические разветвители для объединения и разделения сигналов от различных источников и гибридные схемы на их основе для когерентных и некогерентных приёмников сигналов различных форматов; широкополосные фотодетекторы, совмещаемые с электронными маломощными усилителями; волноводные решетки для мультиплексирования и демультиплексирования оптических каналов; оптические фильтры на тонких оксидных плёнках, на Брэгговских волоконных решетках и т.д.; оптические коммутаторы различных технологий исполнения (PLC, MEMS, LCD, WSS и др.); оптические усилители (полупроводниковые, волоконные с примесями редкоземельных материалов, рамановские).

Современные достижения в оптических компонентах представлены в виде сводных рисунков и таблиц.

6.2.1. Источники оптического излучения

Наболее широкое применение для высокоскоростных систем оптической передачи нашли одномодовые лазеры конструкций (рис.6.3): с распределённой обратной связью DFB (distributed feedback); с распределёнными отражателями Брэгга DBR (distributed bragg reflector), с внешней селективной системой (отражательной дифракционной решеткой) ECL (external cavity laser), с вертикальным излучением VCSEL (vertical-cavity surface-emitting laser).

Для применения источников излучения для многоканальной оптической передачи DWDM требуется от 4 - 8 до 160 отдельных приборов с индивидуальным исполнением на заданные волны излучения.

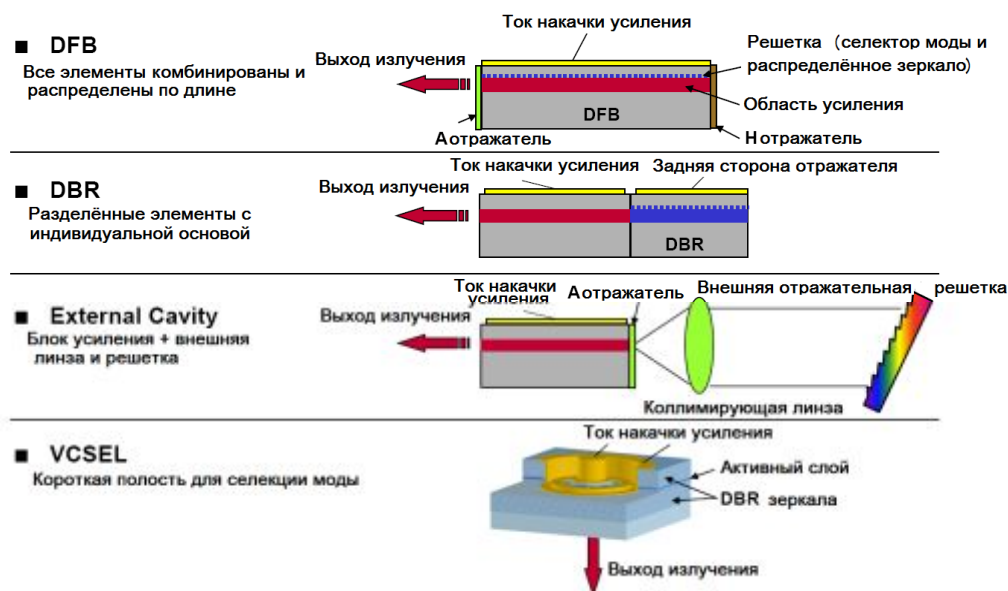


Рис. 6.3. Типы оптических источников для терабитных систем с фиксированными характеристиками излучения

Изготовление таких излучателей не является технологичным, пригодным для коммутируемых оптических сетей, экономически обоснованным. По этой причине излучатели, т.е. узкополосные, одномодовые, высокостабильные лазеры выполняют пригодными для динамической перестройки в коротком временном промежутке (от мс до пс) для диапазонов волн 1530 – 1565 нм, 1565 – 1625 нм. Перестройка излучения может быть плавной и дискретной (с определённым волновым или частотным шагом, например, 0,8 нм или 100 ГГц) и достигаться одним из трёх известных вариантов исполнения (рис.6.4 и 6.5).

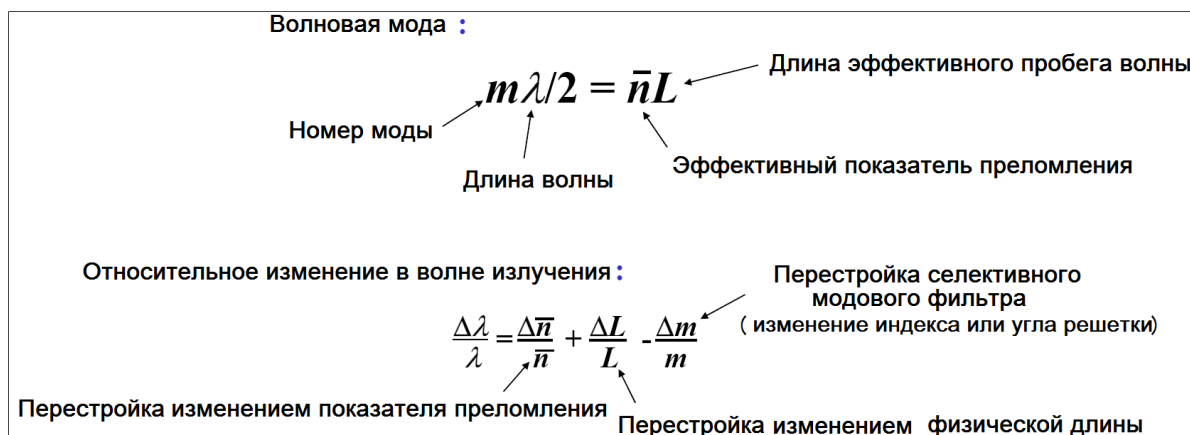


Рис. 6.4. Варианты перестройки излучения лазера

Перестройка лазера DFB в широком диапазоне волн, например, 1530 – 1560 нм невозможна из-за ограниченных возможностей изменения $0,002 < (\Delta n/n) < 0,01$. Перестройка по другим вариантам (физической длиной резонатора, индекса решетки) затруднительна из-за конструктивных особенностей (решетка по всей длине активного слоя). По этой причине для перестройки излучения выбраны лазеры конструкций DBR (вариант применения SSG-DBR представлен в разделе 1 рис. 1.15), VCSEL – MEMS, ECL и DFB с наборами решеток (array) на малое число волн с температурной подстройкой (рис.6.6).

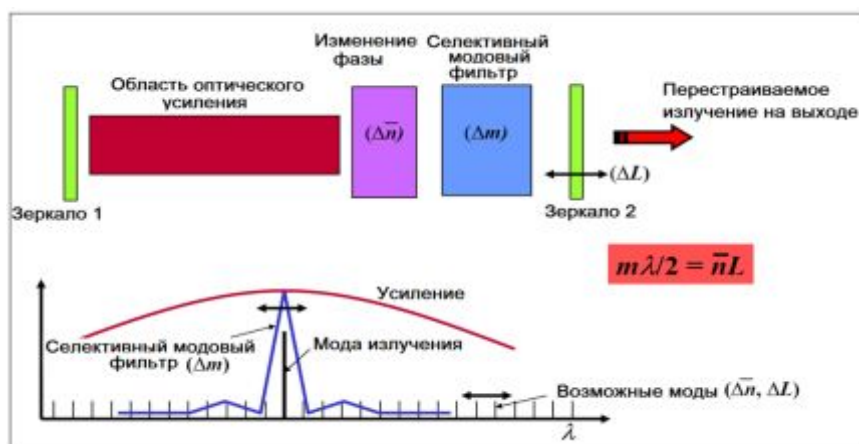


Рис. 6.5. Схема перестройки излучения лазера: отражателем; селекцией мод; показателем преломления

■ DBR Lasers

Обычный лазер DBR ($< 8 \text{ нм}$)

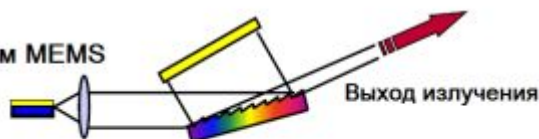
Распределённая перестройка DBR's ($\geq 32 \text{ нм}$)



■ External Cavity Lasers ($\geq 32 \text{ нм}$)

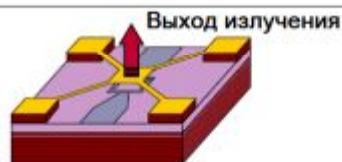
Малая механическая настройка микрозеркалом MEMS

Температурно перестраиваемый эталон



■ MEMS Tunable VCSEL ($< 32 \text{ нм}$)

Оптическая или электрическая накачка



■ DFB Array (3-4 нм $\times$ #DFBs) $\chi=1, 2, 3, \dots, 8, \dots$

Один комбинированный чип + усилитель SOA

или комбинация с микрозеркалами MEMS

Температурная перестройка

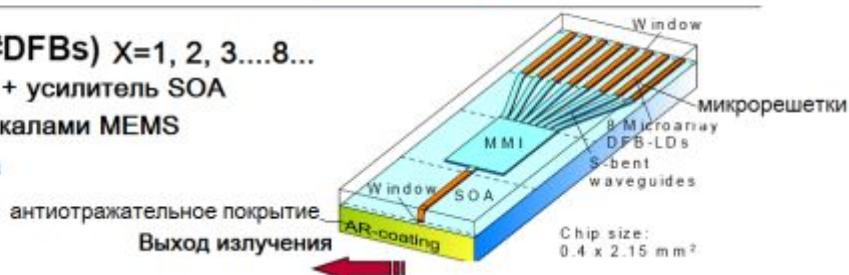


Рис. 6.6. Источники излучения для терабитных систем и способы перестройки

Помимо излучаемой волны и мощности в лазерах терабитных систем требуется ширина спектральной линии менее 10 МГц (обычно в пределах от 10 кГц до 10 МГц, например, для 400 Гбит/с канала с форматом модуляции PM-16QAM полоса излучения лазера должна быть не более 3,9 МГц, а при использовании формата PM-256QAM полоса излучения должна быть не менее 110 кГц), что снижает шумы при когерентном детектировании и повышает точность восстановления амплитудно-фазовых состояний для декодирования цифрового сигнала.

Для реализации оптических суперканалов, в том числе на основе flex grid OFDM, разрабатываются несколько вариантов генераторов поднесущих частот с сетками от 6,25 ГГц до 100 ГГц. Генерация поднесущих от одного высокостабильного когерентного источника с узкой полосой спектральной линии (как правило около 10 МГц) происходит в схемах фазовых модуляторов с интерферометром Маха-Зендера, оптических волокнах с большим коэффициентом нелинейности, монолитных микрорезонаторах кольцевого типа, комбинациями лазеров и др. Схемы этих генераторов имеют общее название: оптические комбинированные частотные генераторы (OFCG, optical frequency comb generator), которые различаются также как активные и пассивные. В большинстве известных схем существуют ограничения на число генерируемых поднесущих, ширину их спектра и интервал между поднесущими (обычно до 10 поднесущих со спектром не менее 10 МГц и интервалом 10 ГГц). Для получения управляемого количества поднесущих, например от 2-х до 20-30 в диапазоне S, C или L, с высокой стабильностью (частоты, мощности,

спектров) наибольшее применение получили схемы с амплитудными и фазовыми модуляторами MZM (рис. 6.7) [94]. В схему входят: перестраиваемый по длине волны излучения одномодовый лазер (обычно диапазон перестройки 50нм) и равноплечий интерферометр MZ, выполненные на одной подложке полупроводникового материала InP; электрический синусоидальный генератор, настроенный на одну частоту требуемого шага поднесущих; управляемый фазовращатель и управляемые электрические усилители или аттенюаторы. Общие вносимые потери оптической мощности составляют 6дБ.

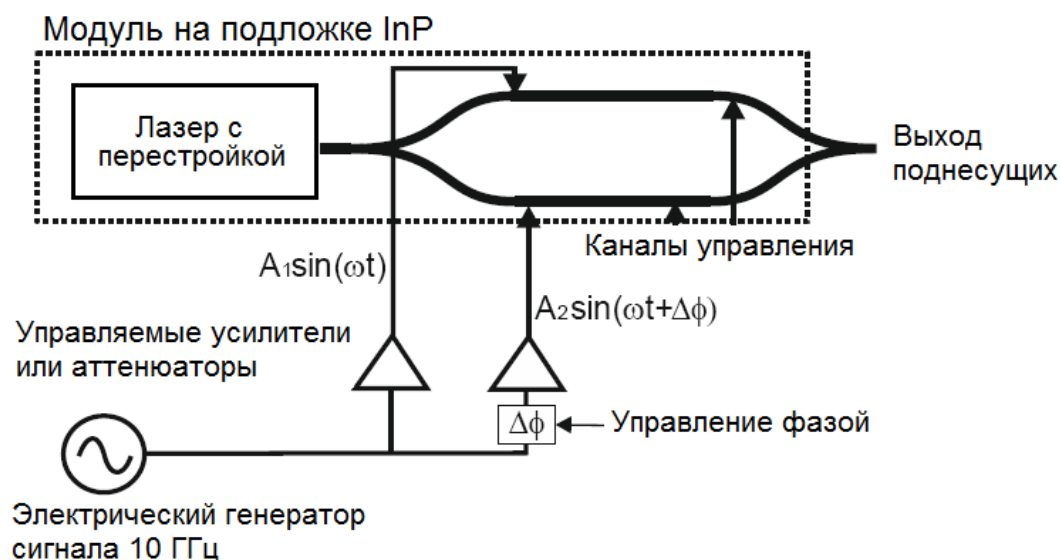


Рис.6.7. Структура генератора оптических поднесущих с MZM

Формирование оптических поднесущих происходит под воздействием управляемых величин напряжений (A_1 , A_2) в двух каналах и фазовых задержек $\Delta\phi$ в канале 2. Число получаемых поднесущих оценивается величиной

$$N \sim \frac{\pi^2}{2V_\pi} V_{p-p},$$

где V_π полуволновое напряжение (2,7В), V_{p-p} размах напряжения (от пика до пика 9,4В). Пример экспериментально полученных значений оптических поднесущих представлен на рис.6.8. Увеличение числа поднесущих сопровождается снижением их мощности почти на порядок при исходных 22 и расширении до 29.

Для повышения точности, перестраиваемости и стабильности генерации поднесущих с применением MZM разработаны более сложные схемы OFCG, применяемые в суперканалах переменной пропускной способности (например, от 450Гбит/с до 1,4Тбит/с). При этом используются три каскадированные MZM, из которых в одном поддерживается модуляция интенсивности оптического излучения электрическим синусоидальным сигналом, а в двух последующих модуляция

фазовых составляющих этими синусоидальными сигналами. Пример построения оптического генератора с тремя ступенями представлен в [95].

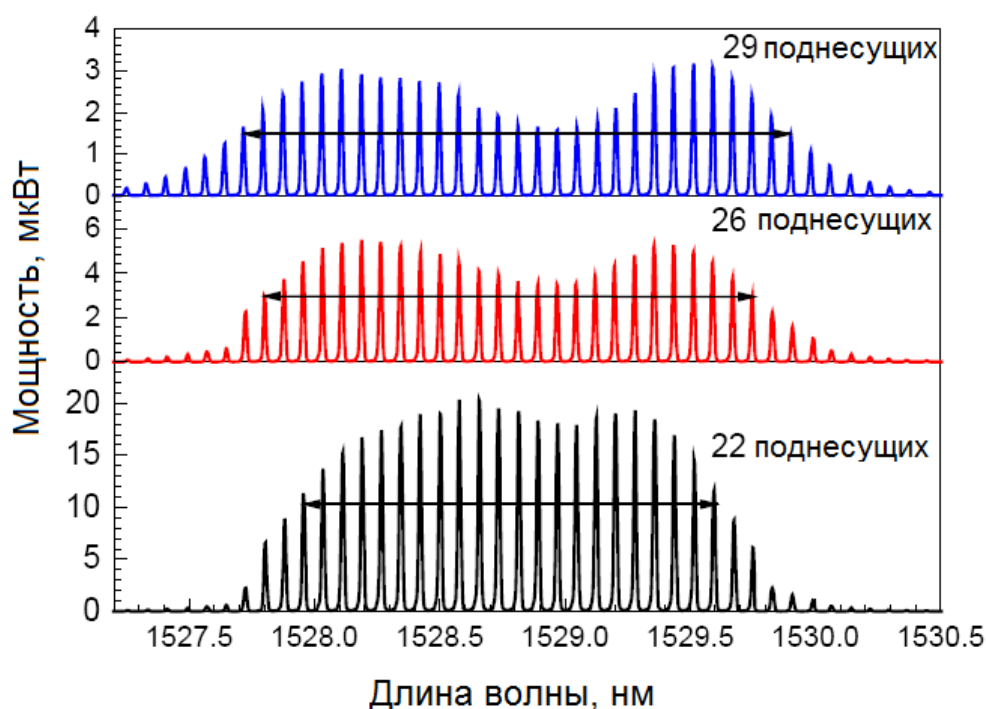


Рис. 6.8. Пример формирования спектров поднесущих оптических волн в генераторе с MZM

6.2.2. Модуляторы оптического излучения

Модуляторы оптического излучения для высокоскоростных систем передачи преимущественно строятся по схемам с MZM, т.к. позволяют перенести информационный сигнал на оптическую несущую частоту с минимальными искажениями при различных форматах. Модуляторы прошли определённый эволюционный путь [67] с изменением материала подложки, конфигураций управляющих электродов, величин управляющих напряжений, габаритов и степени интеграции. В результате, по данным Cisco, для модуляторов DP-QPSK на скорости передачи 100 Гбит/с получены габаритные показатели:

LiNbO₃ 102×13,5×7 мм;

GaAs 60×20×17 мм, что почти в 2 раза меньше;

InP 35×15×7 мм, что почти в 4 раза меньше;

SiP модулятор+драйвер (электрическая схема управления) 14,4×11,5×6,6 мм, что почти в 10 раз меньше.

Также интеграцией достигнуты решения по модуляторам для технологии OFDM-QPSK (рис.6.7) для скорости передачи 112 Гбит/с в сетке частот 50 ГГц DWDM. Основу решения для схемы модулятора составляет гибридно-интегральная технология с кремниевыми планарными световодами PLC (hybrid-integration

technology for silica planar lightwave circuits) and LiNbO₃ Достигнутая с помощью этой схемы скорость передачи составляет 13,5 Тбит/с в 135 каналах по 112 Гбит/с.

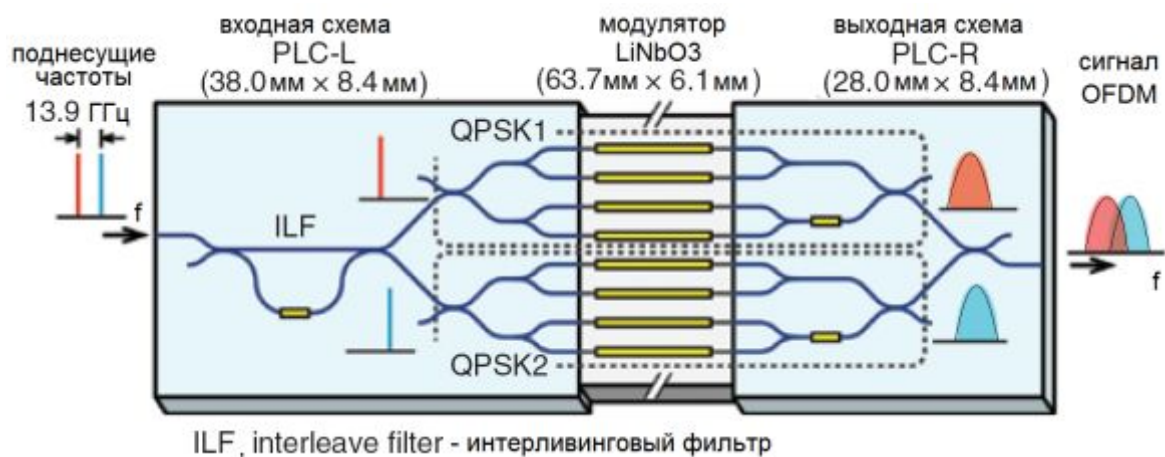


Рис. 6.7. Интегрированный гибридный модулятор OFDM-QPSK [68]

Технология PLC также позволила создать модуляторы на более высокие скорости передачи (до 240 Гбит/с) на основе формата PDM - 64QAM (рис.6.8).

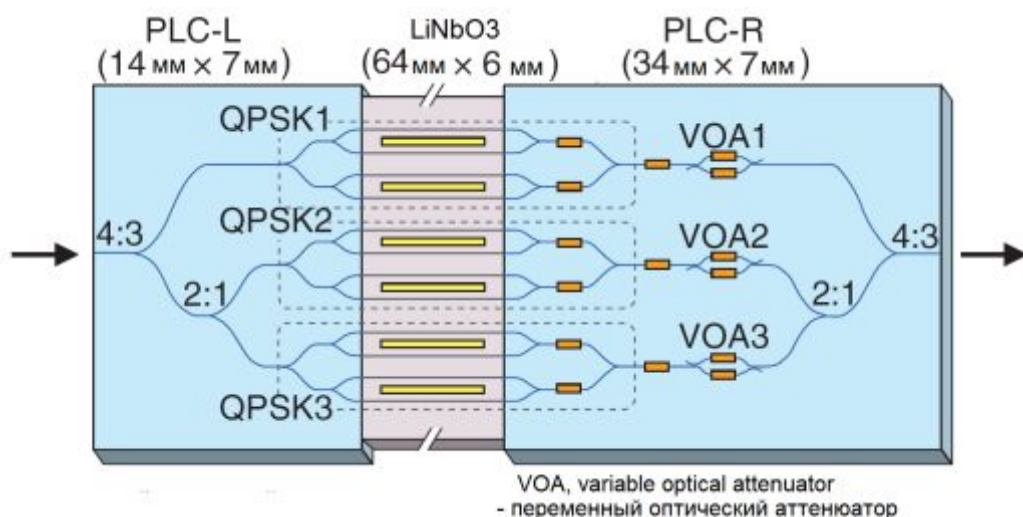


Рис. 6.8. Интегрированный гибридный модулятор PDM - 64 QAM

В этой конструкции применены оптические аттенюаторы (VOA) для управления уровнями оптической мощности квадратурных составляющих.

6.2.3. Интерливинговые фильтры и мультиплексоры/демультиплексоры

Интерливинговые фильтры ILF (от англ. interleaving filter, фильтр чередования) на основе технологии PLC с интерферометрами Маха-Зендера (MZM) и с кольцевыми резонаторами позволяют объединять/разделять каналы с 100 ГГц разнесом по спектру в каналы с 50 ГГц, 25 ГГц и другими вариантами 100 ГГц в 200 ГГц и т.д. (рис. 6.7, 6.8). Совместно с волноводными решетками AWG (array-waveguide-grating) фильтры ILF позволяют конструировать простые и надёжные оптические мультиплексоры/демультиплексоры отдельных каналов и групп оптических каналов. Вне полосы пропускания фильтры ILF подавляют помехи от соседних оптических каналов на величину не менее 20 дБ, что при подавлении помех соседних каналов в AWG позволяет снизить уровень перекрёстных помех на выходе демультиплексора до 40 дБ [69].

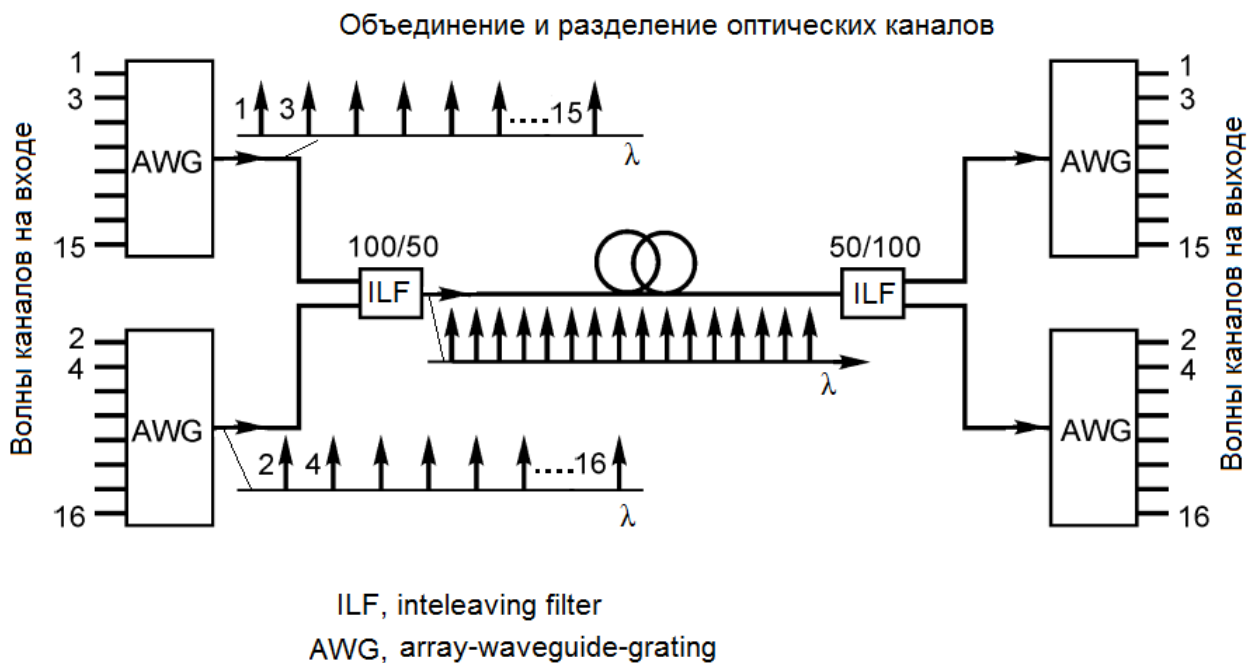


Рис. 6.8. Структура с интерливинговым мультиплексированием

Благодаря возможностям PLC - схем фильтры ILF совмещаются с модуляторами оптических передатчиков OFDM в гибридных схемах (рис.6.9), где обеспечен частотный разнос спектральных каналов (PLC-I chip, Tunable passive circuits + parallel MZMs) с индивидуальной модуляцией в структурах MZM, Маха-Зендера (LN chip) и ортогональным объединением с чередованием поляризации сигналов на поднесущих частотах (PLC-O chip).

6.2.4. Фотоприёмники и фотоприёмные устройства

Отличительной особенностью фотоприёмников и фотоприёмных устройств для скоростей передачи 100 Гбит/с и выше является их только интегральное исполнение с оптическими компонентами разделения поляризационных и фазовых состояний принимаемого сигнала PDM-n-QAM (рис. 6.11, 6.12). Детекторы выполняются по спаренным балансным схемам для повышения чувствительности и выполняют роль смесителей частот сигнала и оптического гетеродина при когерентном приёме.

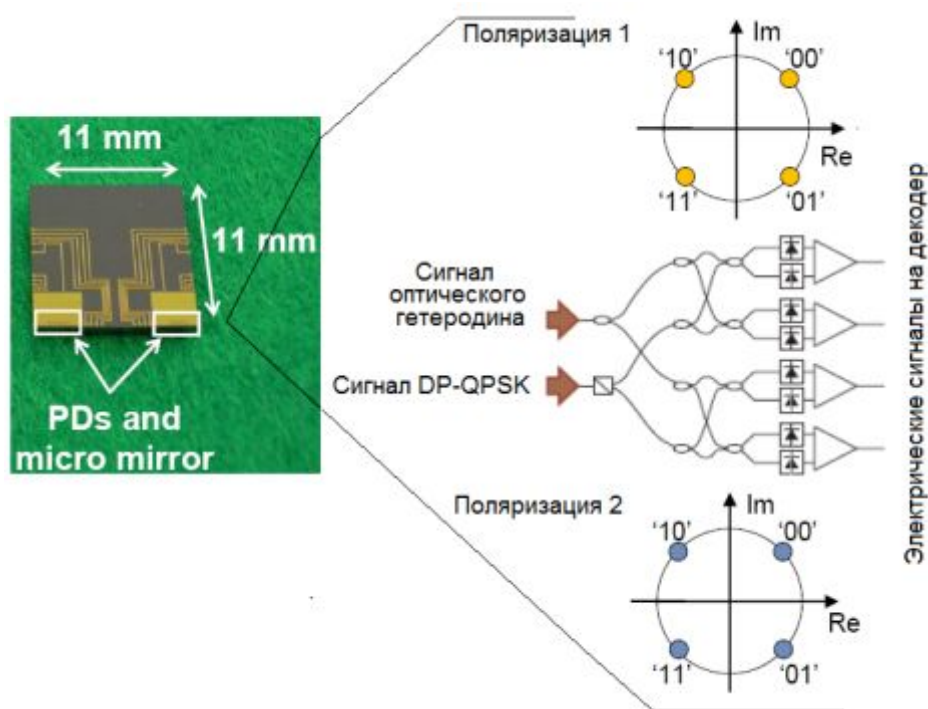


Рис. 6.11. Пример интегрированной схемы когерентного оптического приёмника DP-QPSK 120 Гбит/с (32 ГБод) [70, 73]

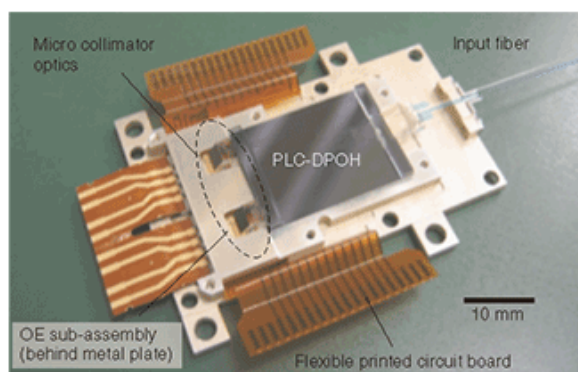


Рис. 6.12. Интегрированный оптический приёмник $27 \times 50 \times 6 \text{ мм}^3$ (по данным компании NTT)

В качестве фотодетекторов используются приборы на основе InP/InGaAs, отличающиеся низкими шумами и достаточной квантовой эффективностью в полосе частот от 20 ГГц до 80 ГГц. Для увеличения детектированного сигнала используются широкополосные трансимпедансные усилители TIA (transimpedance amplifiers). Пример характеристик ФПУ приведён на рис.6.13.

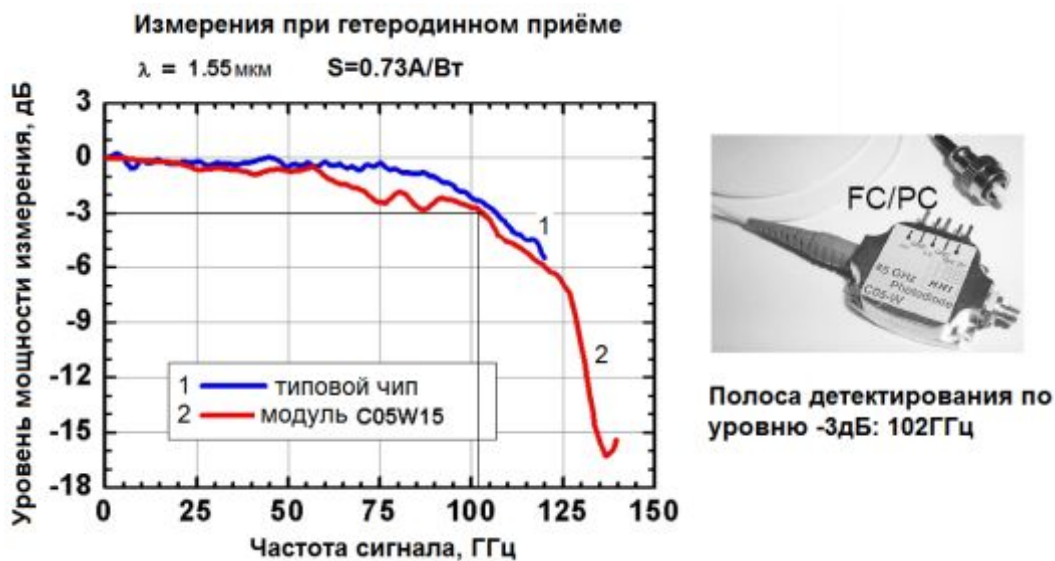


Рис. 6.13. Полоса детектирования ФПУ для когерентного приёмника (по данным компании NTT)

Фотоприёмные устройства для сигналов с числом позиций более 4, т.е., 8, 16, 32, 64 и т.д. конструируются по аналогичной схеме когерентного приёма с цифровой обработкой компонент в каждом квадранте круговой диаграммы состояний (рис.6.14).

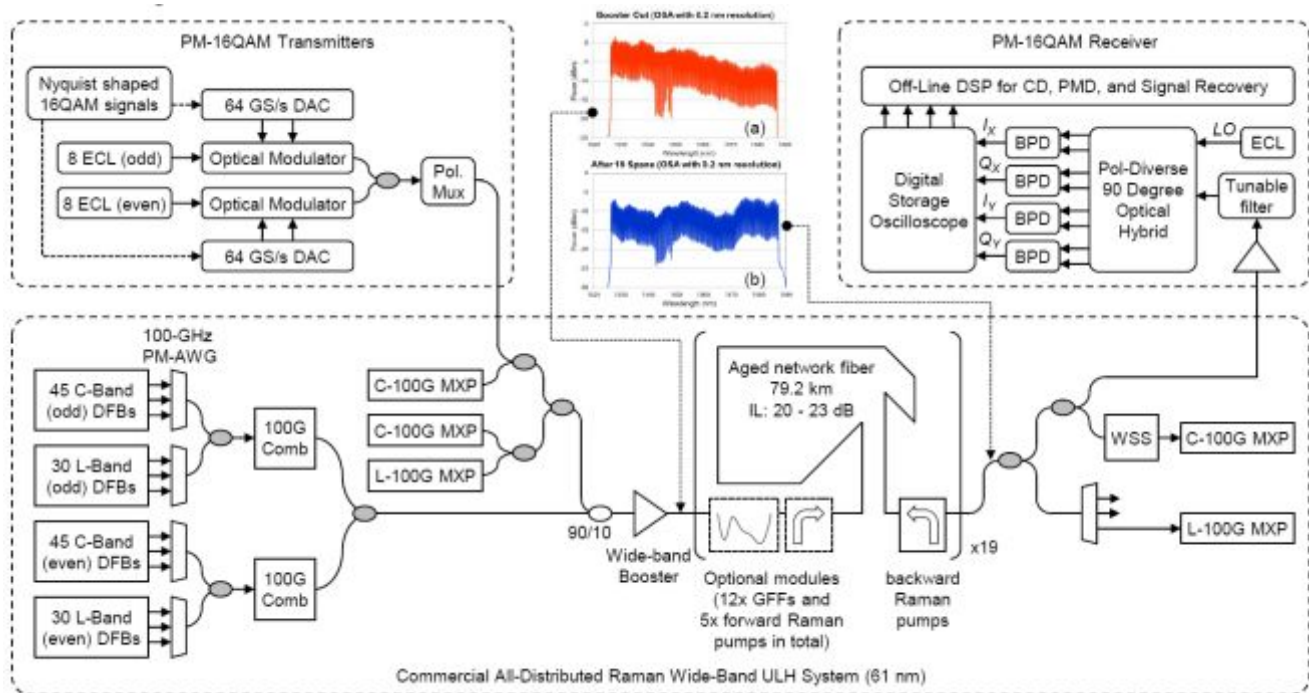


Рис. 6.14. Пример экспериментальной системы передачи PDM-16QAM [74]

6.2.5. Оптические коммутаторы

Ркализация ряда функций сетевых элементов оптических сетей невозможна без оптической коммутации, например, для поддержки выделения и ввода оптических каналов в ROADM, защитных переключений волоконных световодов и оптических каналов, кроссовой коммутации в оптических узлах. Пример коммутатора PLC на основе элементов коммутации 1×2 представлен на рис. 6.15, 6.16. Исполнение коммутатора гибридное, т.е. на подложке выполнены устройства для разделения и объединения оптических каналов (решетки AWG), управляемые attenuаторы для выравнивания уровней мощности оптических сигналов и т.д. [75, 76].

В составе коммутаторов для оптических каналов наибольшее распространение получила архитектура волновой селективной коммутации WSS (Wavelength Selective Switching), которая позволяет строить гибкие управляемые структуры различной ёмкости и быстродействия, зависящего от типа коммутационного элемента (микро-электромеханические системы - Micro-electro-mechanical systems, MEMS; жидко-кристаллические коммутаторы - Liquid crystal switching, LCS; LCS on Silicon, LCoS; планарные с волновыми каналами - Planar lightwave circuit, PLC) (рис. 6.17).

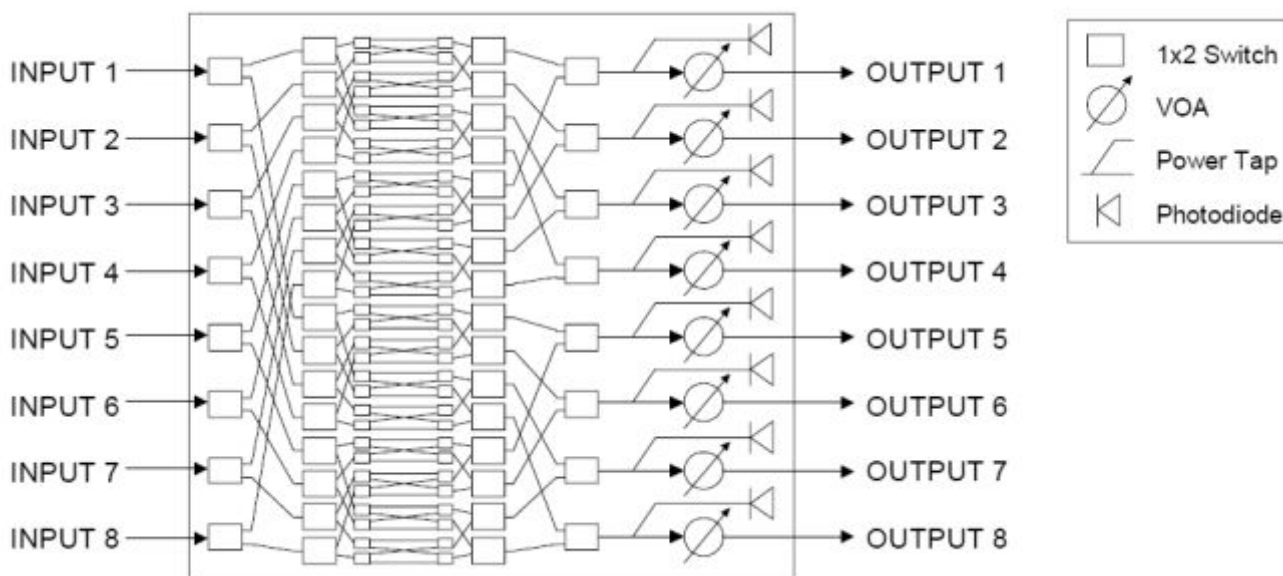


Рис. 6.15. Интегральный коммутатор PLC 8×8



Рис. 6.16. Исполнение коммутатора PLC 8×8

Эффективные коммутационные оптические среды также могут создаваться на основе решеток AWG-PLC, если они выполняются на электрооптической основе (например, на кристаллах LiNbO_3) и имеют средства электрического управления высокого быстродействия (нс, пс).

Переход к структурам оптических коммутаторов WSS, управляемых оптических фильтров и суперканалам позволяет повысить эффективность оптических сетевых узлов по сокращению отдельных компонент (рис.6.18). При этом актуальным остаётся сохранение полосы часто суперканалов при частом доступе в FlexROADM в промежуточных узлах и коррекции этой полосы при необходимости [99, 100, 101].

Управление полосой оптических каналов и коммутацией разнополосных сигналов в перспективе призваны коммутаторы WXC (рис.6.19). Принцип изменения полосы частот или скорости передачи коммутируемого канала представлен на рис. 6.20.

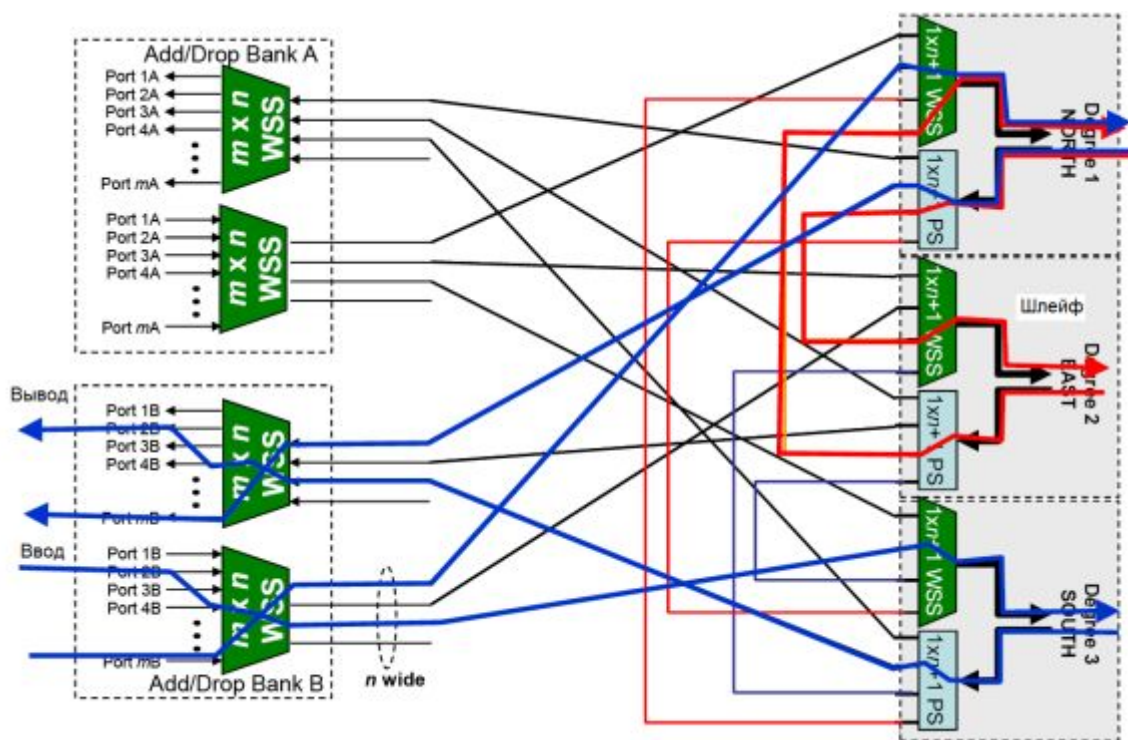


Рис. 6.17. Структура ROADM - WSS с вводом, выделением и «шлейфованием» оптических каналов (по данным компании JDSU)

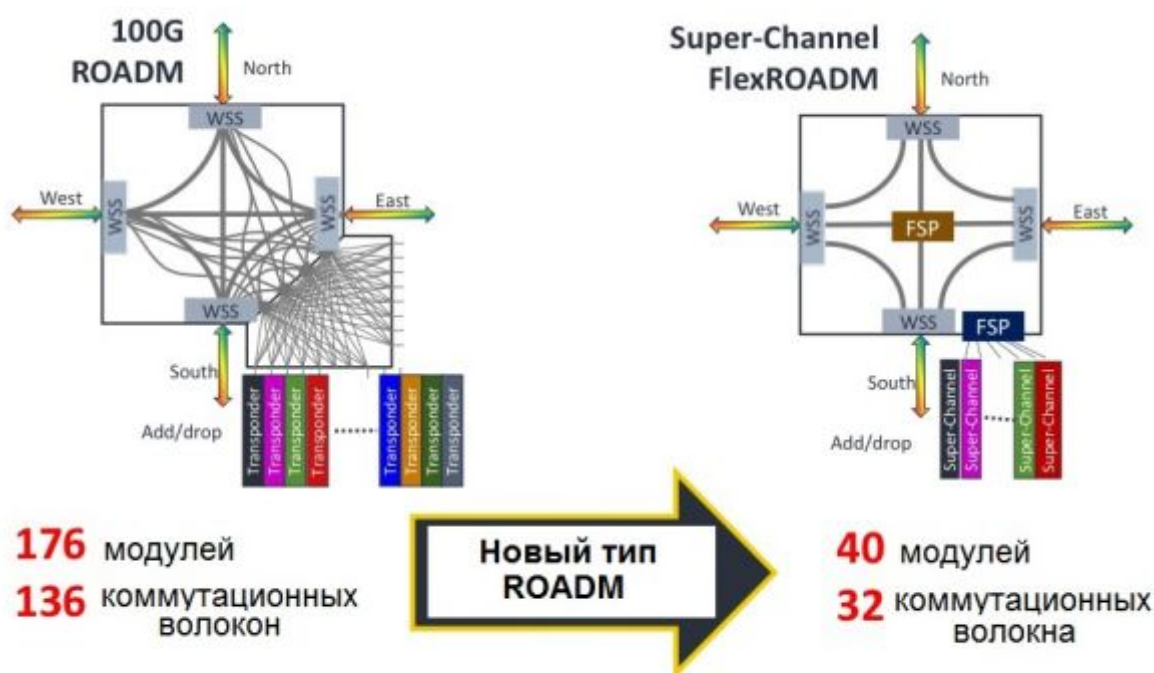


Рис. 6.18. Пример изменения функциональности и комплектации узла оптической коммутации с ROADM

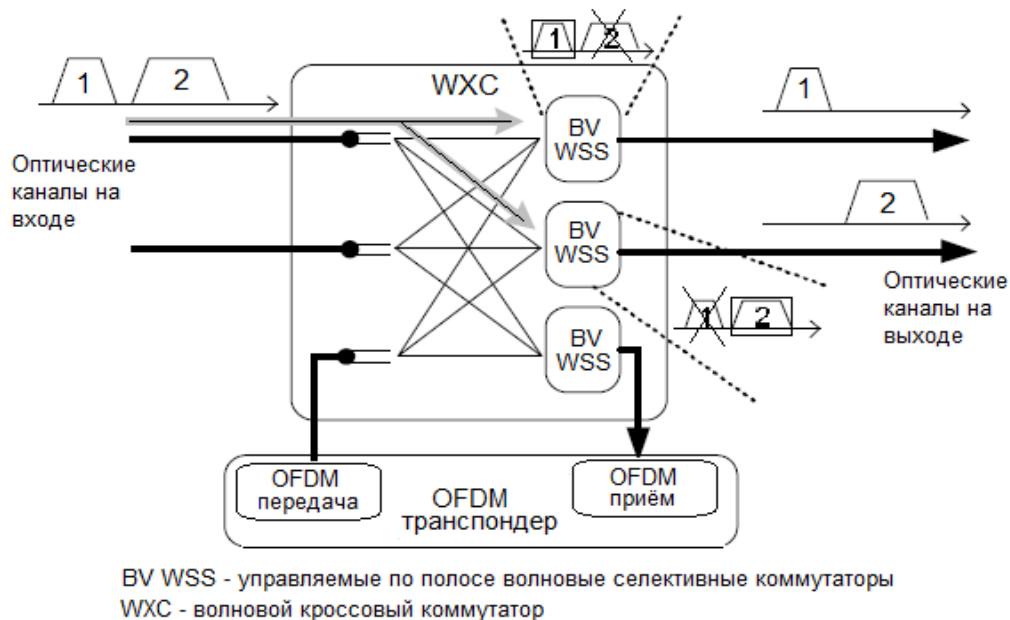


Рис.6.19. Управляемый оптический коммутатор

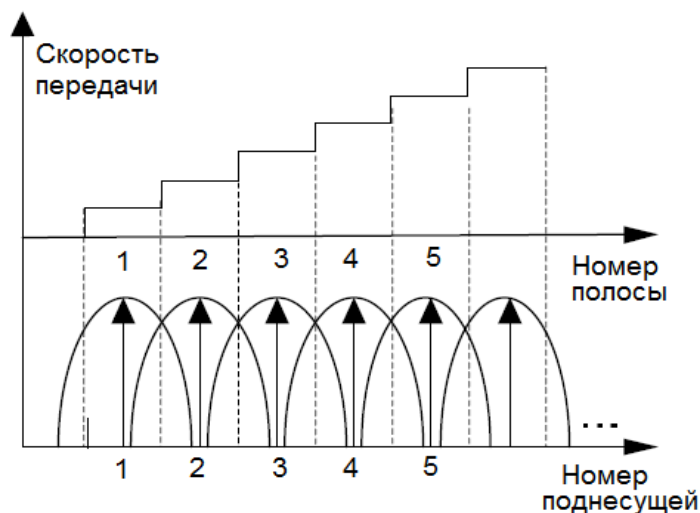


Рис.6.20. Принцип управления скоростью в оптическом канале

6.2.6. Гибридные компоненты

К гибридным компонентам современного оборудования относят готовые сборки для оптических модулей, например, модулей CFP (рис.6.19), различаемых функциональным наполнением, габаритами, годом выпуска и принадлежностью к стандартам.

Модули для передачи данных со скоростью 100 Гбит/с - транспортное решение для операторов связи и крупных предприятий, которое поддерживает различные разновидности WDM и обеспечивает передачу до 96 длин волн по паре волокон. Оптический модуль CFP позволяет подключать оборудование к линиям с интерфейсами 100 Gigabit Ethernet (100 GbE). Такая конструкция также позволяет

сэкономить место благодаря компактности CFP- модуля, который является основным форм- фактором для интерфейсов 100 GbE, при этом модули еще меньших размеров — CFP2 и CFP4 позволяют экономить пространство.

Вместо традиционной схемы 10×10 Гбит/с в модулях используются четыре канала по 28 Гбит/с. Передаваемые в них сигналы модулируются оптическим дуобинарным кодом — одной из разновидностей биполярного. Это позволяет вдвое сузить спектр сигнала и применять более дешевую оптику, рассчитанную на меньшие скорости — 10 Гбит/с, как в схеме 4×10 Гбит/с. Кроме того, дуобинарный код более устойчив к дисперсии по сравнению со стандартной амплитудной манипуляцией.

В соответствии со стандартом IEEE 100GBASE-SR4 в каждом модуле может использоваться массив 4x25G с лазерами вертикального излучения VCSEL. Модули также поддерживают приложения OTU4 (4x28G по мультимодовому волокну).



Рис. 6.19. Примеры модульных конструкций для трансиверов оптических каналов на скорости 40/100 Гбит/с (по данным компании Finisar)

Модули CFP рассчитаны на применение внутри телекоммуникационных предприятий и для ЦОД.

Гибридными изделиями также являются оптические усилители, интегральные конвертеры волн, коммутаторы с оптическими интерфейсами, оптические модуляторы, выполняемые на единой подложке с источниками излучения и схемами формирования сеток оптических частот и т.д.

6.3. Выводы

Развитие компонентной базы оптических систем высоких скоростей передачи информации, в том числе оптических суперканалов, происходит непрерывно с

уменьшением габаритов, потребления энергии, интеграции как электронных так и оптических элементов на единых подложках.

Электронные компоненты (кодеры оптических сигналов, декодеры оптических сигналов, корректоры дисперсии, корректоры Витебри, цифровые фильтры и др.) реализуются в программируемых логических матрицах FPGA с нанометровыми исполнениями от 10нм до 65 нм.

Оптические компоненты реализуются с возможностями гибкой перестройки (волны и мощности излучения в лазерах, полосы пропускания и чувствительности в фотодиодах, коэффициента усиления в усилителях, маршрутов соединений в оптических коммутаторах и т.д.), снижением массо-габаритных показателей и расхода электроэнергии, интегрируемости активных и пассивных устройств на единой основе.

Контрольные вопросы

- 1 Какие требования предъявляются к компонентной базе терабитных и петабитных систем?
- 2 Что относят к электрическим компонентам оптических систем передачи?
- 3 Что представляет собой FPGA?
- 4 Какие функции возлагаются на FPGA при программировании микросхем ОЭН?
- 5 Как наиболее эффективно реализовать оптический суперканал?
- 6 Что особенного в современных оптических передатчиках?
- 7 Как можно перестроить длину волны излучения лазера?
- 8 Какие типы лазеров обеспечивают максимальный диапазон перестройки излучения?
- 9 Какие конструкции интерферометров являются основой современных оптических модуляторов?
- 10 Что входит в состав современного оптического модулятора?
- 11 Какие функции выполняют интерливинговые фильтры?
- 12 Какое значение в реализации современных оптических компонентов имеет технология PLC?
- 13 Какое назначение имеют решетки AWG?
- 14 Что особенного в устройстве когерентного оптического приёмника?
- 15 Что интегрируется в составе когерентного оптического приёмника?
- 16 С какой целью используются оптические коммутаторы в современных системах связи?
- 17 Что коммутируется в WSS – ROADM?
- 18 Что изменится в сетевом узле оптической сети при переходе к FlexROADM?
- 19 Какие гибридные компоненты могут входить в состав систем с терабитными и петабитными скоростями передачи?
- 20 Чем отличаются модули CFP/CFP2/CFP4 ?

7. ДОСТИГНУТЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В ПОСТРОЕНИИ ТЕРАБИТНЫХ И ПЕТАБИТНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ

С 2010г по 2015г опубликовано в зарубежной и отечественной большое число научных и технических статей, монографий, диссертационных исследований в области разработки терабитных и петабитных систем передачи. Все публикации можно условно разбить на три блока (рис.7.1): стандартные решения для систем передачи и оптических сетей, получившие одобрение в рекомендациях ITU-T, IEEE и реализованные в виде интерфейсов (например, 100GBASE-LR4 и 100GBASE-ER4) и универсальных транспортных платформ (например, Alcatel-Lucent 1850TSS, Cisco MSTP 15454-M-12); экспериментальные системы передачи с перспективой ближайшего по времени внедрения (например, на скорости в оптическом канале 224 Гбит/с, 448 Гбит/с, 1 Тбит/с); планируемые, находящиеся в стадии теоретических и экспериментальных разработок (например, системы с волокнами MCF, FMF).

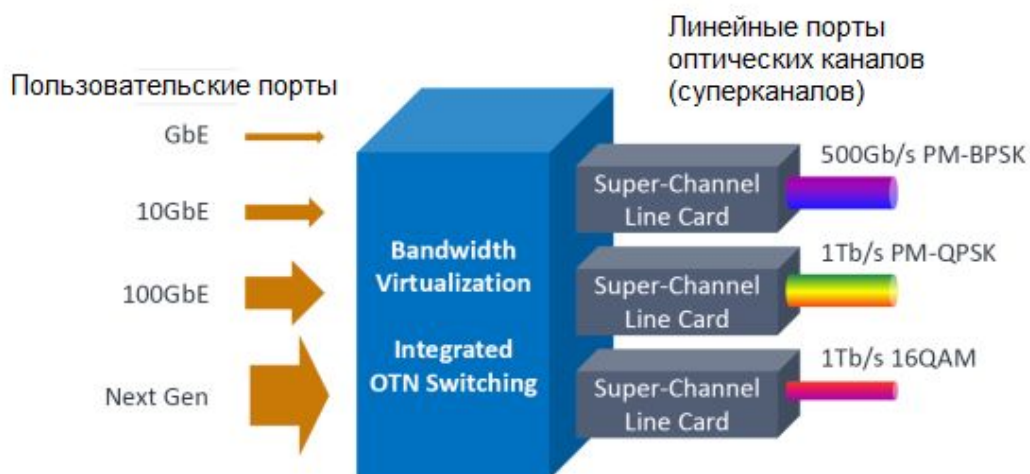


Рис. 7.1. Исследуемые и разрабатываемые решения для оптических каналов систем передачи

7.1. Стандартные решения для коммерческих сетей связи

Стандартные решения для оптических каналов имеют проверенную рынком востребованность и предназначены для массовой реализации в сетях общего пользования. Практические решения различаются исполнением (рис.7.2) и возможностями по дальности передачи, скорости передачи, числом спектральных каналов. Основные тренды по применимости терабитных систем представлены на рис. 7.3., из которых становится явным, что при использовании стандартных волокон SMF и NZDSF можно получить: для протяженных оптических каналов (свыше 2 тыс. км) предельной скоростью в стандартных волокнах будет 6 Тбит/с при простом формате кодирования DPSK; для линий средней протяженности (от 1000 км до 4000 км) ограничение по скорости составит 12 Тбит/с при форматах кодирования QPSK, 8QAM; для коротких (местных) оптических линий (до 500 км) достигаемый

скоростной режим приближается к 24 Тбит/с при этом требуются многоуровневые и многопозиционные форматы 16QAM и в перспективе 64QAM.

	200G TXP (Июнь 2014)	200G TXP (конец 2014)	200G TXP/MXP (середина 2015)
1x 100G Client	1x 100G (DQPSK) @ 33GHz	2x 50G (BPSK) SC @ 33GHz	2x 50G (BPSK) SC @ 33GHz
2x 100G Clients	2x 100G (DQPSK) SC @ 33GHz	1x 200G (16QAM) @ 33GHz	1x 200G (16QAM) @ 33GHz
5x 100G Clients	5x 100G (DQPSK) SC @ 33GHz	2x 200G (16QAM) + 1x 100G (DQPSK) @ 33GHz	2x 250G (16QAM) @ 35GHz
10x 10G Clients	1x 100G (DQPSK) @ 33GHz	1x 100G (DQPSK) @ 33GHz	1x 100G (DQPSK) @ 33GHz
20x 10G Clients	2x 100G (DQPSK) SC @ 33GHz	1x 200G (16QAM) @ 33GHz	1x 200G (16QAM) @ 33GHz

Рис. 7.2. Пример стандартных решений Cisco для оптических каналов на скорости от 100 Гбит/с до 250 Гбит/с

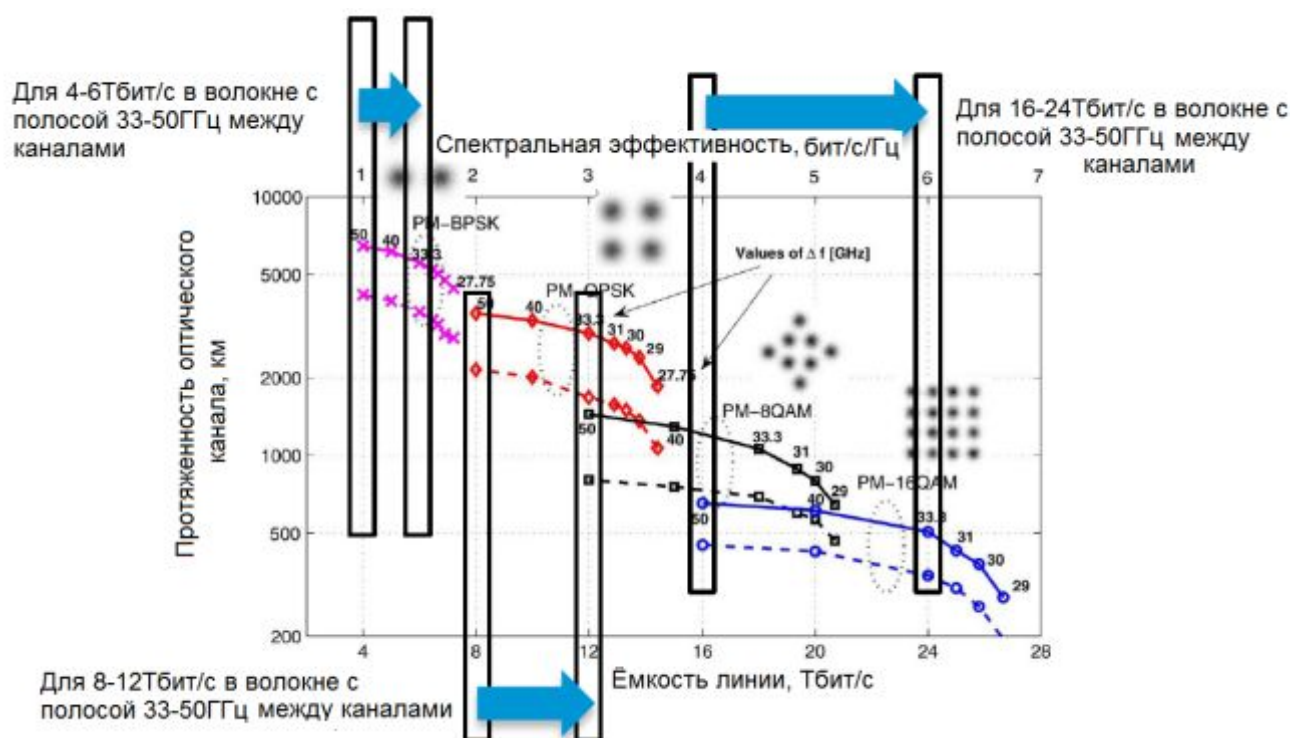


Рис. 7.3. Тренды развития коммерческих систем с терабитными скоростями

Расширить возможности по наращиванию скорости передачи и дальности передачи информационных потоков можно с использованием более сложных

форматов модуляции, волокон MCF, FMF и модового мультиплексирования, что уже отрабатывается в экспериментальных системах. Результаты этих обработок представлены в ряде научных публикаций международных конференций и в периодических изданиях IEEE, ZTE, Alcatel-Lucent, Ciena, Cisco, Huawei, NEC, Infinera, ECI и т.д.

Примеры ряда экспериментальных систем рассмотрены ниже.

7.2. Экспериментальные и планируемые системы

В разделе представлены ряд экспериментальных решений по увеличению пропускной способности оптических каналов в стандартных волокнах SMF (NZDSF), в волокнах со множеством сердцевин MCF и в волокнах с несколькими модами (FMF).

Первое комплексное экспериментальное и модельное решение по наращиванию скорости передачи в оптическом канале с ограниченной полосой частот (не более 100 ГГц) представлено на рис.7.1. Наращивание скорости передачи информационных данных происходит через увеличение числа фазовых и амплитудно-фазовых состояний в передаваемом сигнале (QPSK, 8PSK, 16QAM) и использования поляризационного мультиплексирования двух каналов (PM-QPSK, PM-8PSK, PM-16QAM). Для увеличения дистанции передачи используется оптическое усиление (EDFA), повышение чувствительности приёмника за счёт когерентного приёма (LO) и аналоговой фильтрацией (оптической в полосе канала ВР и электрической с ограничением по частоте сверху LP), цифровой обработки принятого сигнала (ADC, DSP).

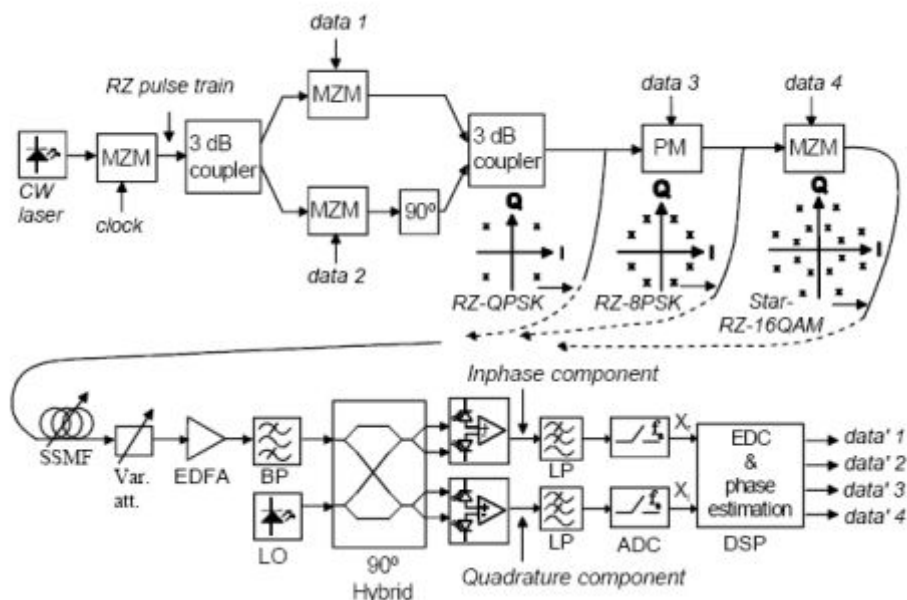


Рис. 7.1. Эксперименты и модели по расширению возможностей оптического канала (уровни в форматах модуляции, оптическое усиление, когерентный приём, цифровая обработка)

Эксперименты по наращиванию скорости передачи в каналах для волокон SMF показали возможности достижения 60 - 70 Тбит/с (рис.7.2 и 7.3) за счёт многоуровневого квадратурного кодирования (16QAM, 36QAM), интерливингового объединения/разделения (IL) и поляризационного мультиплексирования (PM, Pol. Mux) в полосах C+L с канальной сеткой 0,1 нм (12,5 ГГц) и 0,2 нм (25 ГГц). Достигнутая дальность передачи с оптическими промежуточными эрбиевыми и рамановскими усилителями (пролёты до 80км) составила 240 км – 320 км, что может быть применено на сетях масштаба мегаполиса, внутризоновых сетях развитых регионов. В системах применяется когерентный приём с локальными настраиваемыми, узкополосными (до 200 кГц) оптическим генераторами (LO, ECL/TLA) и цифровая обработка детектированного оптического сигнала. Спектральная эффективность решения составляет 6,4 бит/с/Гц.

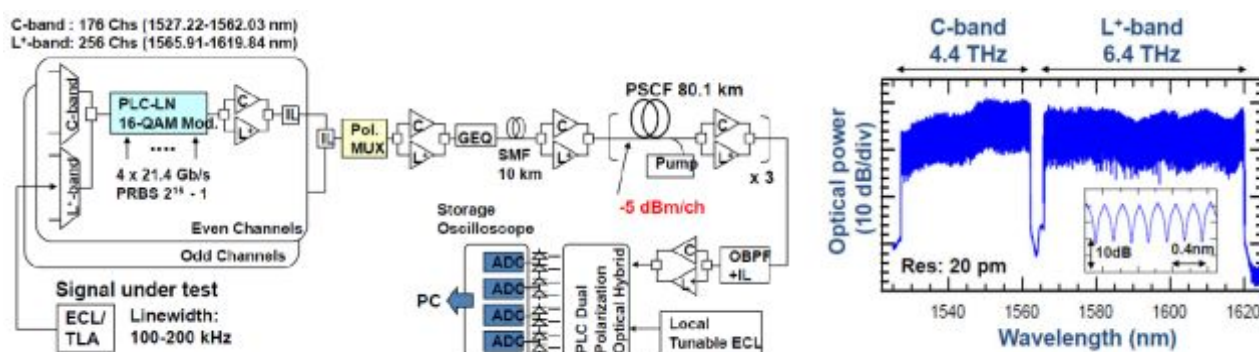


Рис. 7.2. Экспериментальная система на скорость 69 Тбит/с, 432×171 Гбит/с, PDM-16QAM, 240 км (A.Sano et al., OFC2010, PDPB7)

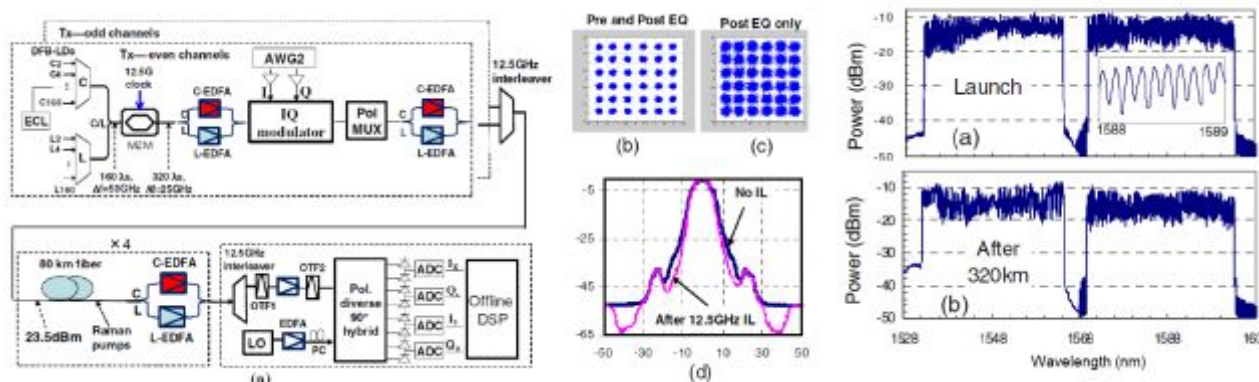


Рис. 7.3. Экспериментальная система на скорость 64 Тбит/с, 640×107 Гбит/с, PDM-36QAM, 320 км (X. Zhou et al., OFC2010, PDPB9)

Достижение скорости 1Пбит/с стало возможным при использовании волокон MCF (12 сердцевин в волокне на примере рис.7.4) при спектральной эффективности в системе 91,4 бит/с/Гц, что соответствует спектральной эффективности одной сердцевинны 7,6 бит/с/Гц и общей скорости 84,4 Тбит/с. Необходимо отметить

расстояние передачи в 52 км, что можно использовать для локальных сетей и сетей мегаполисов.

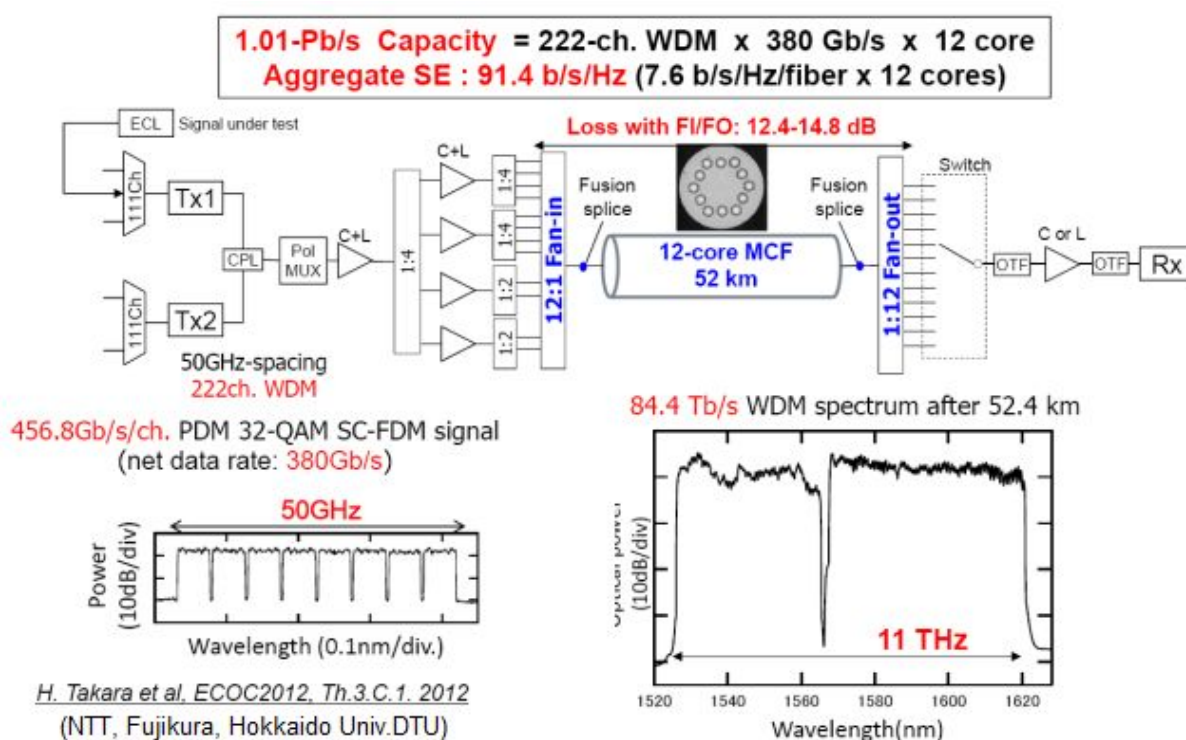
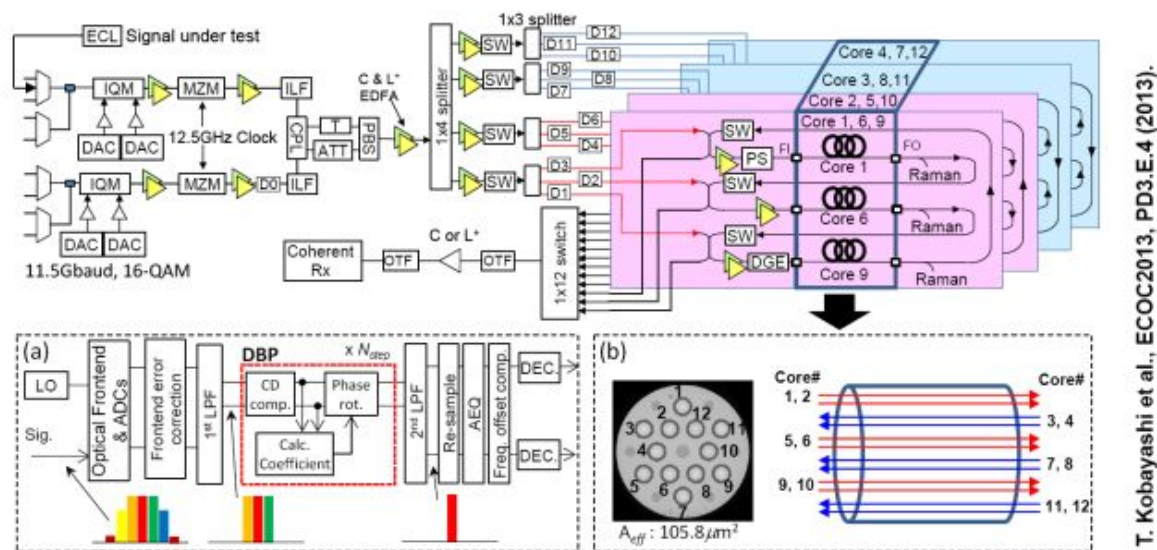


Рис. 7.4. Экспериментальная система на скорость 1 Пбит/с

Для повышения дальности передачи в петабитных системах проведены экспериментальные исследования с использованием рамановских усилителей с встречной накачкой и эрбиевых усилителей для полос L+C, что при спектральной эффективности около 6 бит/с/Гц позволило в волокнах MCF (12 сердцевин) достигнуть дальности передачи 1500 км при совокупной скорости 688 Тбит/с (рис.7.5). Последнее показывает потенциальную возможность использования петабитных систем передачи на протяженных магистральных транспортных сетях.

Помимо наращивания скорости передачи за счёт множества сердцевин принято считать перспективным увеличение числа активных мод в специальных маломодовых волокнах FMF, где проводятся эксперименты по организации оптических каналов на отдельных пространственных модах (рис.7.6). Количество мод в экспериментах от 2-х до 16. В приведённом примере показаны 6 модовых каналов в 3-х модовом волокне. Удвоение числа модовых каналов достигнуто использованием двух поляризаций. В каждом модовом канале может применяться мультиплексирование волн (WDM) с различным числом волновых каналов (на рис.7.7 пример на 96 каналов в каждой из мод), что позволяет достигать скоростей передачи в 10-ки и до сотни Тбит/с и дальности с использованием оптического усиления 100 и более км (рис.7.7). Т.о. модовое мультиплексирование в сочетании с мультиплексированием волн представляет альтернативу системам с MCF. Однако, если применить в составе MCF сердцевин FMF, то можно проводить эксперименты

с двойным пространственным мультиплексированием и мультиплексированием DWDM для достижения петабитных и эксабитных скоростей. Исследование систем такого типа может стать предметом ближайшего будущего.



Experimental setup: (a) Rx and offline DSP (b) Dual-ring structure 12-core fiber and assignment of propagation direction to each core

- Transmitter
 - ✓ 11.5 Gbaud Nyquist-pulse-shaped PDM-16QAM signal with roll-off factor of 0.01
 - ✓ 748 WDM channels with 12.5-GHz spacing utilizing C- and L*-band
 - ✓ Spectral efficiency of 6.13 b/s/Hz/core assuming 20% FEC overhead
 - ✓ Total capacity of 2 x 344 Tb/s
- Re-circulating loop
 - ✓ PDI and core-to-core signal rotation scheme
 - ✓ Improved worst noise figure of C-band multi-core-EDFA by 0.5 dB
 - ✓ Reduced connection losses of fan-In/fan-out (FI/FO) devices by 0.3 dB
- Receiver
 - ✓ Multicarrier Full Electric-field Digital Back Propagation (DBP)

Рис. 7.5. Экспериментальная система повышенной дальности (до 1500 км) на скорость 688 Тбит/с

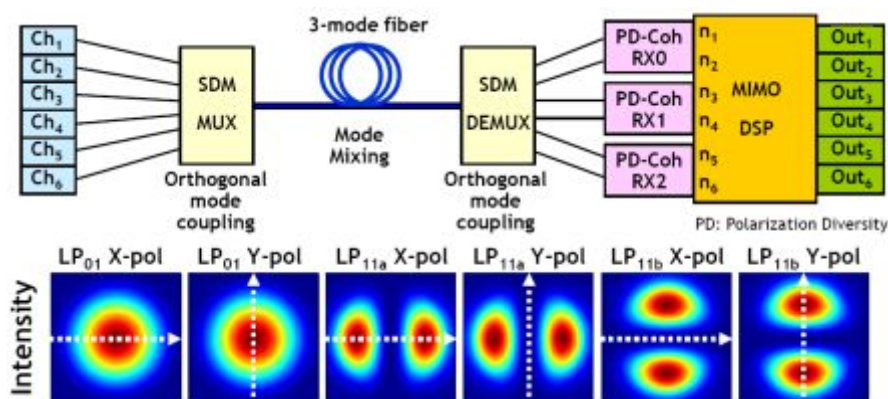


Рис. 7.6. Пример 6-канальной экспериментальной БОСП SDM-PDM-FMF (R. Ryf et al., OFC 2011; S. Randel et al., Optics Express 2011)

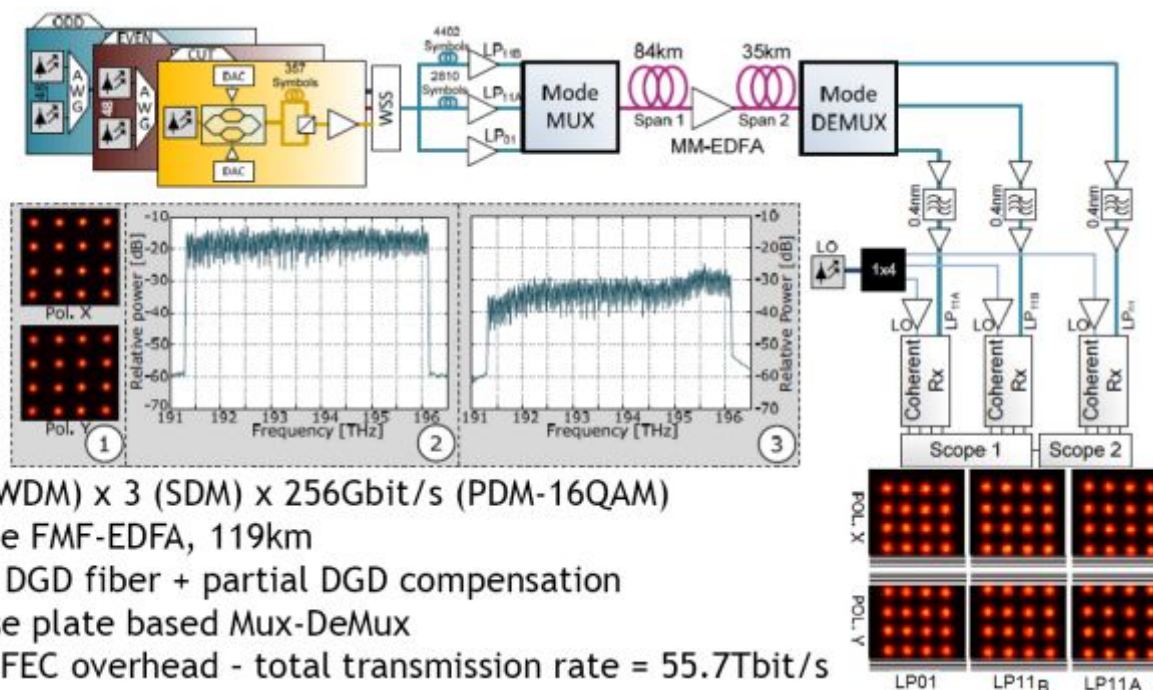


Рис. 7.7. Экспериментальная система с волновым и модовым мультиплексированием на скорость 73,7 Тбит/с (V.Sleifer et al. ECOC 2012, paper TH3.C.4)

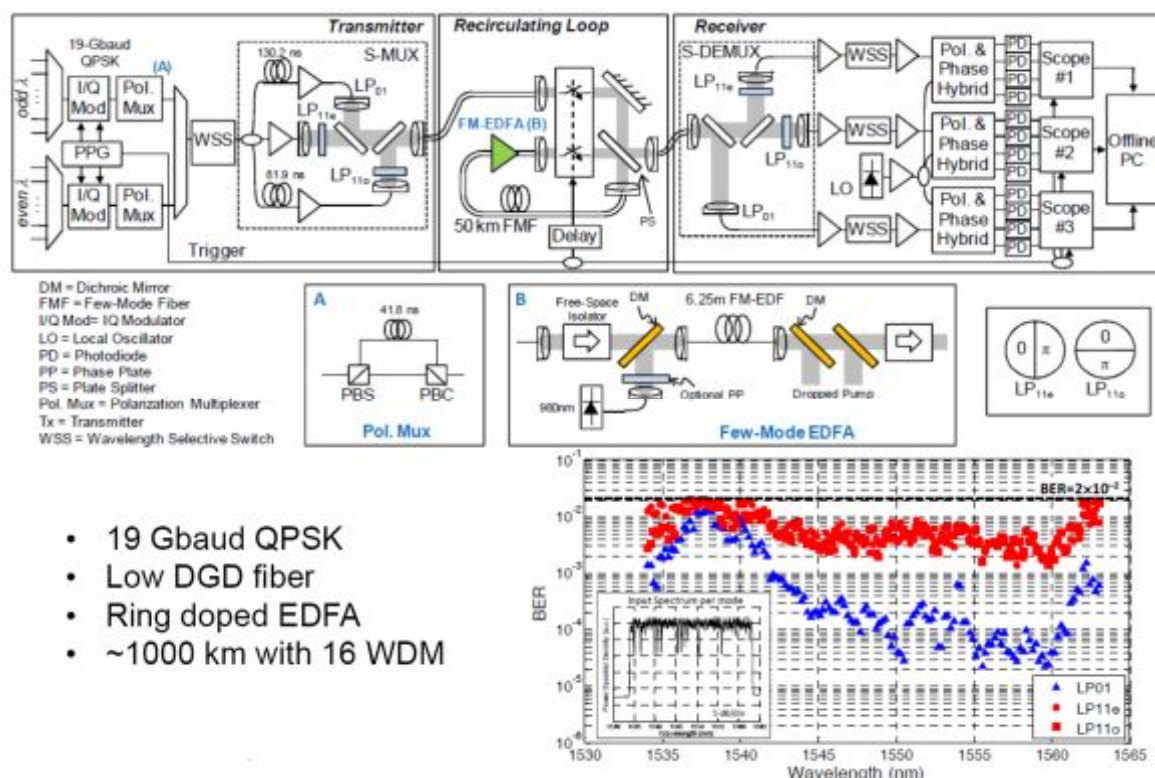


Рис. 7.8. Экспериментальная система с волновым и модовым мультиплексированием 146WDM, 3MDM на участках 10×50 км (E.lp et al. PDP5A.2 (2013))

7.3. Планирование и проектирование гибко управляемых оптических транспортных систем и сетей с DWDM

Для планирования и проектирования оптических сетей с терабитными и петабитными скоростями должна быть создана новая методология с учётом открывающихся новых возможностей по построению сетевых многоуровневых архитектур и их гибкого управления по всем уровням. Что представляют собой уровни нового поколения телекоммуникаций? Для ответа на этот вопрос нужно рассмотреть схему (рис. 7.9), где представлено формализованное деление функций поддержки как изветных, так и новых качеств систем и сетей транспортного назначения.

Управление уровнями (RSA, RWA, grooming, ...)	4	Клиент: DXC/Ethernet/TP-MPLS/IP OTH: OPUk, OPUflex, OPUk-Xv, ODUk, ODUflex, ODUk-Xv, OTUk, FEC	Коммутация клиентской нагрузки под ёмкость оптического канала, согласование скорости, тактовый синхронизм. Мультиплексирование цифровых блоков, сцепка блоков и комутация, защита от ошибок в оптическом канале, цикловая синхронизация, служебные каналы
	3	Уровень оптической управляемой полосы, оптические несущие и поднесущие для flex-channel и sub-channel	Управляемый формат модуляции в оптическом канале и в субканале OFDM (m-QAM, m-PSK, PDM). Скорости от нескольких Гбит/с до 100Гбит/с (480Гбит/с) Когерентный гомодинный приём на одной несущей или на нескольких поднесущих и цифровая обработка
	2	Уровень оптических каналов и суперканалов: fixed-grid/ flex-grid/ grid-less	Оптические каналы (2,5/10/40/100/200/400Гбит/с) и суперканалы (от 100Гбит/с до 1Тбит/с). Оптическая кросскоммутиация (отдельных волн и пакетов волн - поднесущих), размещение в стандартной полосе (S, C, L), в стандартной сетке G.694.1 или без неё
	1	Уровень волоконных соединений: SMF, NZDSF, MCF, FMF и оптических мультиплексных секций и секций передачи	Коммутация волокон, коммутация сердцевин и мод в волокнах, объединённые оптические каналы и суперканалы для доступа средствами ROADM, flexRoadm, OXC, flexOXC. Оптические секции усиления. Оптическая секция мультиплексирования Защита секций оптического мультиплексирования

Рис. 7.9. Уровневая логическая структура оптических систем и сетей с максимально гибкими функциями обслуживания транспорта

К новым качествам относятся: гибкое формирование цифровых потоков оптических каналов; применение управляемых по полосе оптических каналов и диапазонов волн; использование возможностей коммутации фиксированных по

полосе и управляемых по скорости каналов и выделяемых полос частот; коммутация сердцевин волокон MCF и модовых составляющих в волокна FMF; автоматизация управления с применением протоколов ASON (Automatic Switched Optical Network, автоматически коммутируемая оптическая сеть) на базе GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching, общий протокол многопротокольной коммутации по меткам), RWA (Routing and Wavelength Assignment, маршрутизация и назначение длины волны), RSA (Routing and Spectrum Allocation, маршрутизация и распределение спектра) и др.

Методология планирования качественно новых оптических транспортных сетей должна основываться на ряде обязательных позиций [93, 98]:

1 Поиск наиболее обоснованных возможностей в транспортных сетях (технологий, маршрутов, поставщиков, обслуживания) по использованию имеющихся ресурсов относительно планируемого трафика развивающихся сетей услуг (мультисервиса);

2 Определение диапазона использования национальных сетей и взаимодействия с международными сетями на основе единых стандартов (рекомендаций МСЭ-Т) с включением профилей трафика (статического и динамического);

3 Обоснование технико-экономических показателей на основе сравнительных оценки моделирования капитальных затрат CAPEX (capital expenditures) и обслуживания OPEX (operational expenditures) для нескольких вариантов, как фиксированных решений так и решений с возможностями flexgrid и EON (Elastic Optical Networking).

4 Привлечения широкого диапазона инструментов моделирования транспортных сетей, для планирования сетей автономно и с учётом ресурсов в режиме реальном времени, которые обычно предлагают поставщики сетевого оборудования;

5 Повторение позиций 1- 4 вместе до получения оптимального или приемлемого результата.

Проектирование оптических сетей с фиксированными по полосе оптическими каналами, включая многоуровневые форматы DPSK, QPSK и даже каналы с OFDM, достаточно хорошо разработано в методиках и закреплено в международных стандартах в виде рекомендаций:

- серия G, добавление 39 (09/2012) Optical system design and engineering considerations;
- серия G.680 (07/2007) Physical transfer functions of optical network elements;
- серия G.692 (10/98) Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers.

При этом проектирование связано с вычислением длин секций оптического усиления, вычисления диаграммы уровней передачи в оптическом канале и оптического отношения сигнал/шум (OSNR), учёта возможностей FEC конкретных транспондеров, вычисления остаточной дисперсии с учётом штрафа за хроматическую и поляризационную дисперсию и т.д. При этом предусматриваемые скорости передачи в оптическом канале ограничены 10 и 40 Гбит/с.

Для оптических каналов со скоростными режимами от 100 Гбит/с и выше, с

форматами flexgrid, EON подобных документов по проектированию пока нет. Однако имеются ряд исследований с практическими выводами [93] для проектирования оптических каналов с форматами QPSK, 16QAM, 32QAM, 64QAM, которые позволяют произвести числовые оценки по возможной дистанции организации оптических каналов на скорости от 10 до 400 Гбит/с в формате PM-OFDM с учётом битовой скорости (BR, Bit Rate) на каждой поднесущей. Знание дистанции оптического канала позволяет определить возможный маршрут для организации требуемого по пропускной способности соединения в интересах клиента оптической транспортной сети.

Для оценки дистанции предложены аналитические соотношения, учитывающие допустимый коэффициент ошибок, битовую скорость, формат кодирования и спектральную эффективность для PM-OFDM транспондеров:

QPSK:

$$L = -630.68 \ln(BR) + 49117 \text{ км}$$

32 QAM:

$$L = -193.63 \ln(BR) + 17365 \text{ км}$$

16 QAM:

$$L = -366.02 \ln(BR) + 30282 \text{ км}$$

64 QAM:

$$L = -152.19 \ln(BR) + 12486 \text{ км.}$$

Эти соотношения аппроксимируют кривые для указанных форматов модуляции и отражают результаты теоретических и экспериментальных исследований, представленные на рис.7.10, 7.11.

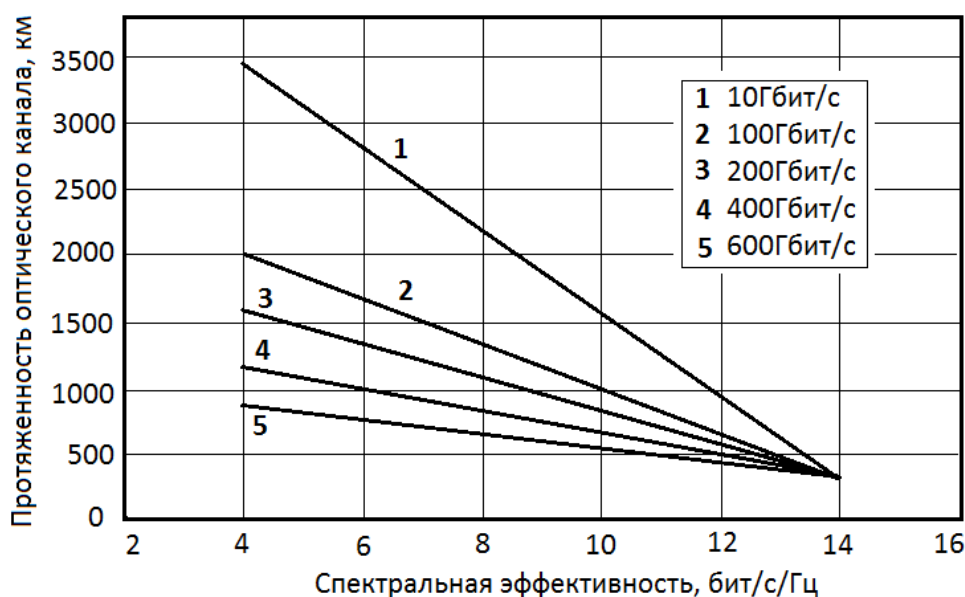


Рис.7.10. Расстояния организации оптических каналов с учётом спектральной эффективности и битовой скорости

Также при разработке проектных решений по оптическим сетям с когерентными каналами возможно применение результатов, обобщённо представленных на рисунках: 2.10, 2.11, 5.13, 7.3 и др.

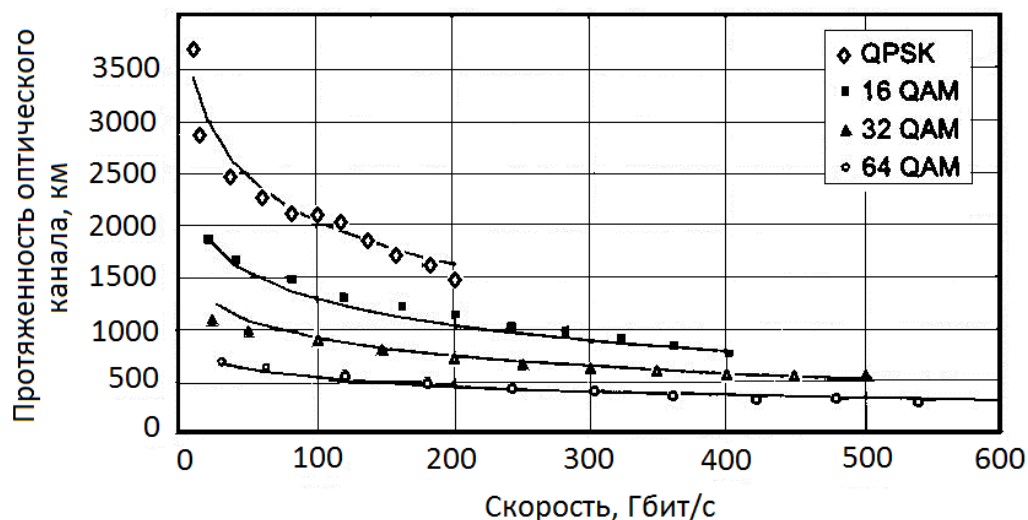


Рис.7.11. Расстояния организации оптических каналов с учётом формата модуляции и битовой скорости

Применение решений flexgrid позволят создать новые функции оптических транспортных сетей, в которых новым решением будет гибкое распределение ресурсов оптических секций мультиплексирования и полос пропускания отдельных каналов с широким изменением скоростей передачи (от 10 Гбит/с до 1 Тбит/с) рис.7.12.

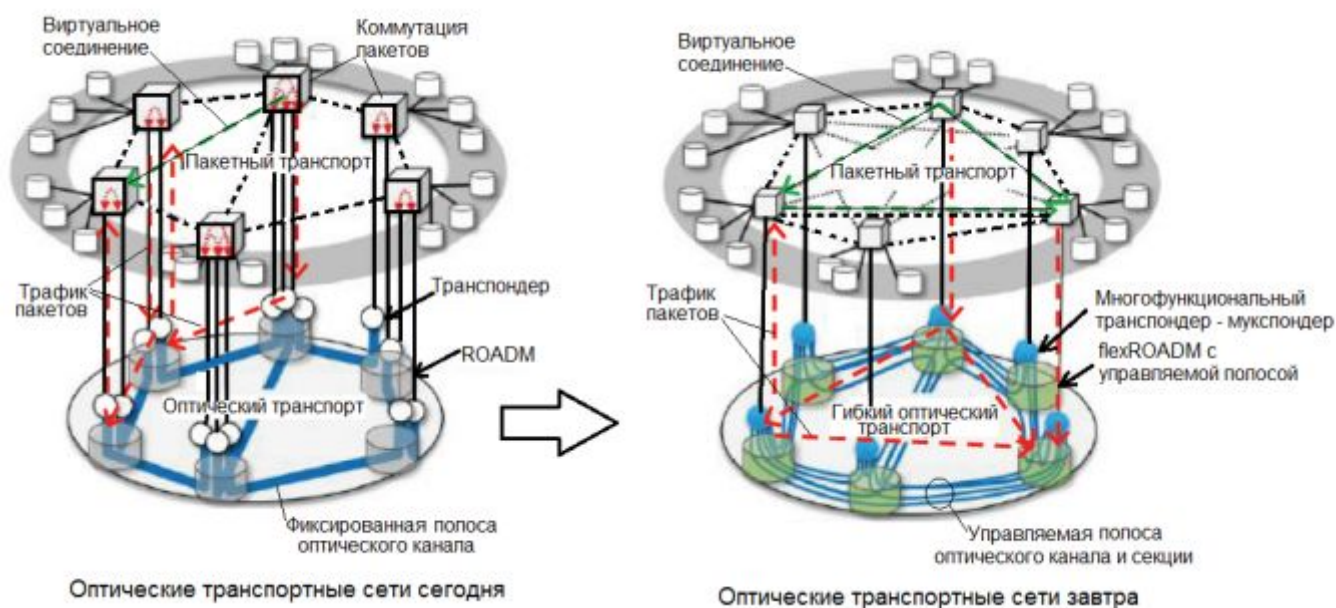


Рис. 7.12. Изменение функций оптических транспортных сетей при использовании технологии flexgrid

7.4. Выводы

Развитие стандартных систем передачи с терабитными скоростями основано на стандартных, широко применяемых волокнах типа SMF, NZDSF.

Проводимые эксперименты по наращиванию скорости передачи в волоконном световоде типа SMF показывают реальный предел скорости около 60Тбит/с и дистанции передачи не более 500 км.

Эксперименты по передаче информационных сигналов в волокнах типа MCF и FMF показывают реальные возможности по достижению скоростей свыше 1Пбит/с на дистанции от 50 км до 1500 км.

Разработки систем передачи на основе волокон MCF и FMF требуют проведения ряда исследований по совместимости сердцевин волокон, модового спектра сердцевин, взаимных влияний между сердцевинами одного волокна и между модами одной сердцевины в линейном и нелинейном режимах и т.д.

Проектирование оптических систем и сетей с терабитовыми/петабитовыми скоростями является сложной и во многом недостаточно определённой задачей, в условиях которой должны прописываться возможности по гибкому распределению трафика в управляемые каналы и секции.

Контрольные вопросы

1 Какие решения по построению оптических когерентных систем передачи с терабитными скоростями можно выделить по итогам обзорных исследований?

2 Что характерно для стандартных решений высокоскоростных систем оптической связи?

3 Как связаны между собой в стандартных системах передачи ёмкости линии, протяженности оптических каналов и спектральная эффективность?

4 Чем отличаются экспериментальные и планируемые системы передачи от стандартных?

5 Какие скорости достигнуты в экспериментах с системами на основе MCF и FMF?

6 Какие типы волокон используются в стандартных и экспериментальных системах передачи?

7 Чем отличаются волокна стандартные от волокон MCF и FMF?

8 Как организуются соединения в оптических каналах с волокнами MCF?

9 Как организуются соединения в оптических каналах с волокнами FMF?

10 Сколько спектральных каналов реально организовать в волокнах MCF-7?

11 Сколько спектральных каналов реально организовать в волокнах FMF-4?

12 Какие нелинейные эффекты волоконных световодов могут ограничить число спектральных каналов?

8. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В связи с внедрением в существующую архитектуру оптических сетей систем передачи с терабитными скоростями необходимо с максимальной точностью иметь представление обо всех параметрах проектируемой сети. Для упрощения расчетов устойчивости сети к влиянию нелинейных оптических эффектов, а также учета динамики глаз-диаграммы и коэффициента ошибок за счет внедрения дополнительных оптических элементов используется моделирование посредством использования специального программного обеспечения [78].

В сводной табл. 8.1 представлены крупные программные продукты для системы автоматического проектирования как сложных волоконно-оптических систем, так и компонентной базы этих систем.

Табл. 8.1 Программы сводного и имитационного анализа в системах связи

Название программы	Область применения
LIGHTSIM	Одномодовые и многомодовые лазеры и систем связи. Системы со спектральным уплотнением
ModeSYS	Моделирование многомодовых оптических систем связи
OptiSYSTEM	Моделирование одномодовых и многомодовых систем связи. Системы со спектральным уплотнением
OptiSYSTEM Amplifier Edition	Оптические усилители. Линейные и нелинейные кольцевые волоконные лазеры
OptiSYSTEM Multimode Edition	Многомодовые волоконно-оптические системы связи
OptSim	Волоконно-оптические системы связи и их компоненты
Lastip, Apsys, Pics3d	Полупроводниковые лазеры. Полупроводниковые источники излучения. Лазеры на квантовых ямах
PHOTOSS	Волоконно-оптические системы связи и их компоненты
SIMFOCS	Волоконно-оптические системы связи
VPITransmissionMakerWDM	Фотонные устройства, включая системы связи
VPITransmissionMaker Cable Access	Волоконно-оптические системы связи и их компоненты
VPIComponentMaker Active Photonics	Активные фотонные устройства. Полупроводниковые лазеры
VPIComponentMaker Optical Amplifiers	Волоконные и волноводные усилители: многополосные, многоступенчатые, гибридные и Рамановские

На сегодняшний день всем требованиям при проектировании оптических сетей связи удовлетворяют такие продукты как OptSim (LightTech) и OptiSystem (Optiwave).

8.1. Среда моделирования OptiSystem

Модуль проектирования OptiSystem является комплексным программным инструментом моделирования, направленного на реализацию пользователем задач по планированию и тестированию оптических линий современных сетей передачи (рис. 8.1). Система имеет мощную среду имитации и чёткую иерархическую структуру компонентов и подсистем. Программное обеспечение позволяет интегрировать оболочку с внешними модулями, такими как Matlab, OptiFiber, OptiGrating, Scilab. Библиотеки активных и пассивных компонентов имеют реальные параметры. Изменение этих параметров позволяет изучать характеристики исследуемых устройств.

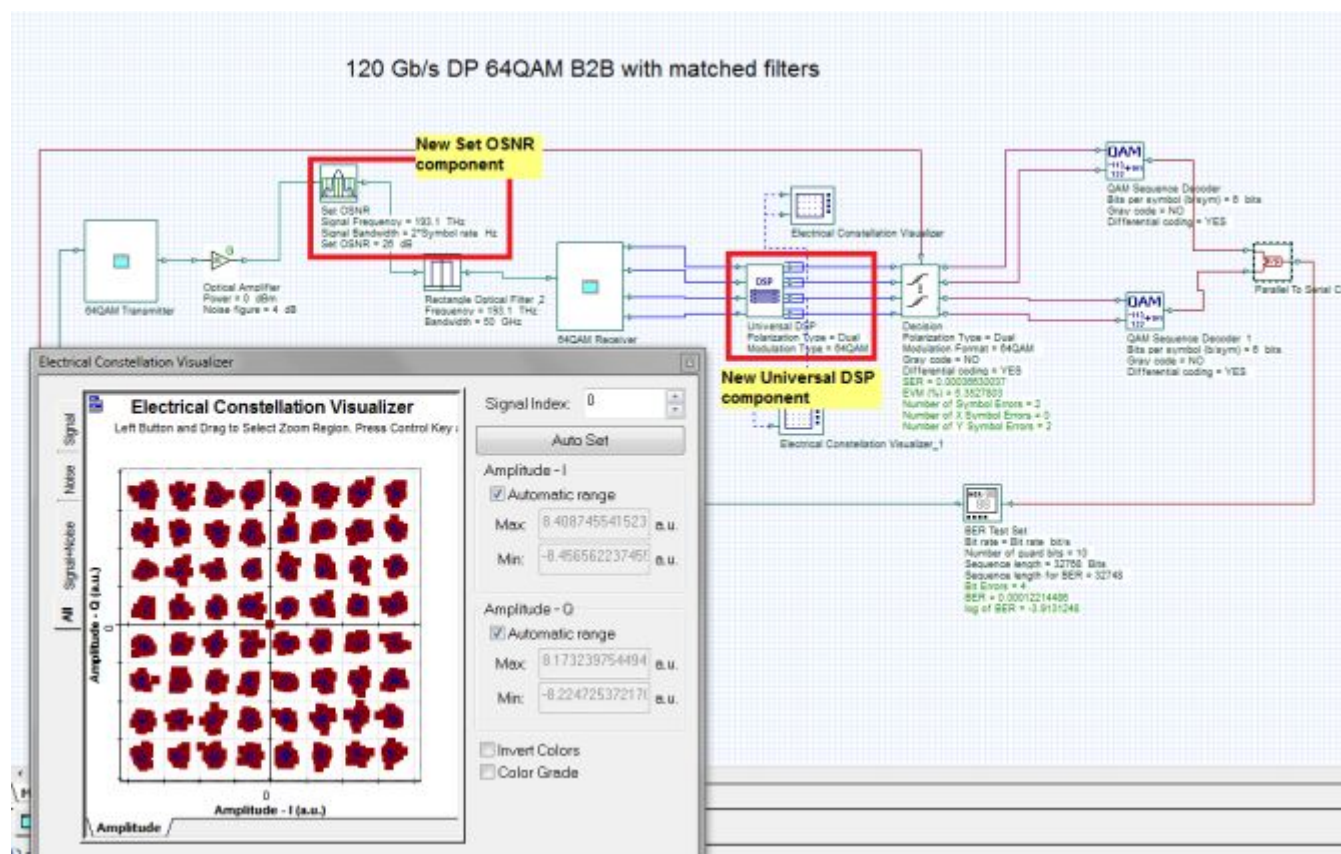


Рис. 8.1. Интерфейс OptiSystem 13.0

Данный продукт позволяет моделировать системы, при этом позволяя оперативно менять как параметры внутри сети, так и внешние параметры среды моделирования. Варьируя количеством пакетов, а также их длиной возможно управлять точностью производимых расчетов. OptiSystem позволяет моделировать

одноканальные и многоканальные (DWDM, CWDM) оптические системы. Использование расширенных настроек для оптических волокон позволяет точно привязывать параметры реальной оптической магистрали к проектируемой системе. Модуль OptiSystem позволяет варьировать скоростью потока от 10 Гбит/с до 300 Гбит/с. Дополнительная опция в виде защитного интервала в моделируемых системах позволяет при проектировании игнорировать заданное количество бит в начале и конце пакетов.

Наличие готовой библиотеки с предустановленными параметрами позволяет мгновенно составлять оптические секции с разными типами волокон. Кроме этого, доступны библиотеки с предустановками для оптических усилителей (усилители Рамана, эрбиевые усилители), излучателей, эквалайзеров и т.д. (рис.8.2).

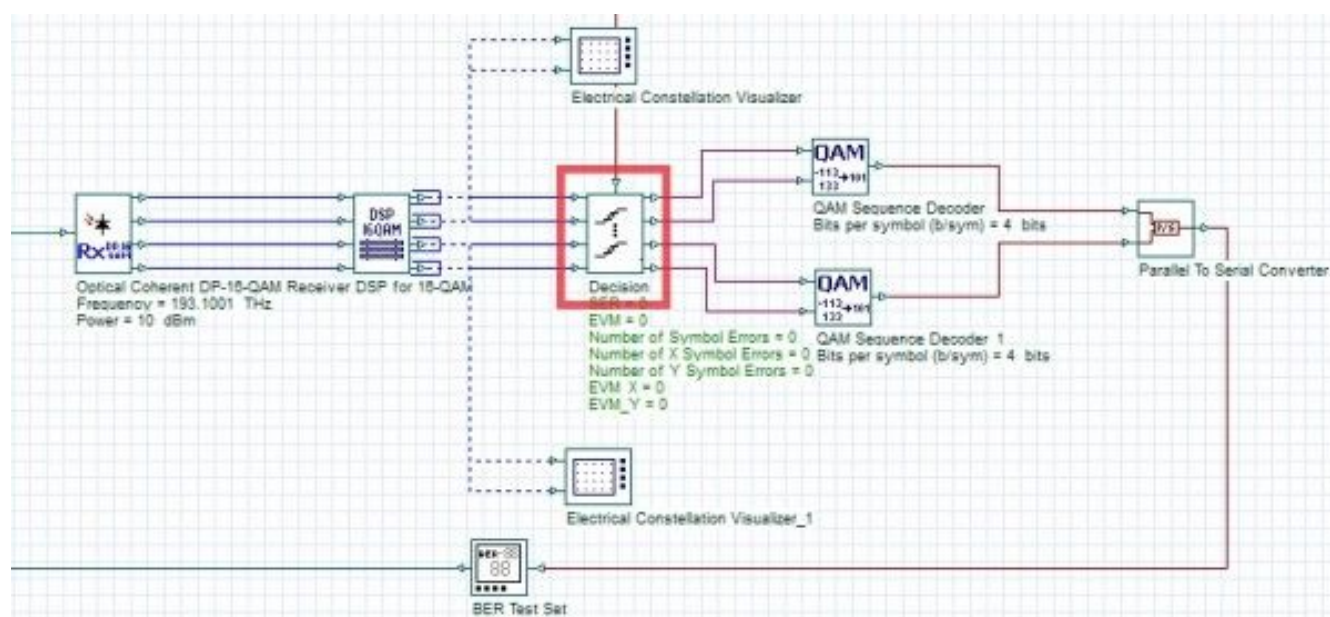


Рис. 8.2. Типовая схема приемной части для DP-16QAM

В OptiSystem 13.0 в полной мере реализован алгоритм использования мультиплексирования по поляризации. Внедрение современных блоков исправления ошибок и элементов компенсации хроматической дисперсии позволяет рассчитать работоспособность современной оптической системы (рис. 8.3). Различные блоки мониторинга дают возможность наблюдать за характеристиками системы (Q-фактор, конселляционная диаграмма, спектр) в широком оптическом диапазоне (от 0,05 нм до 0,7 нм).

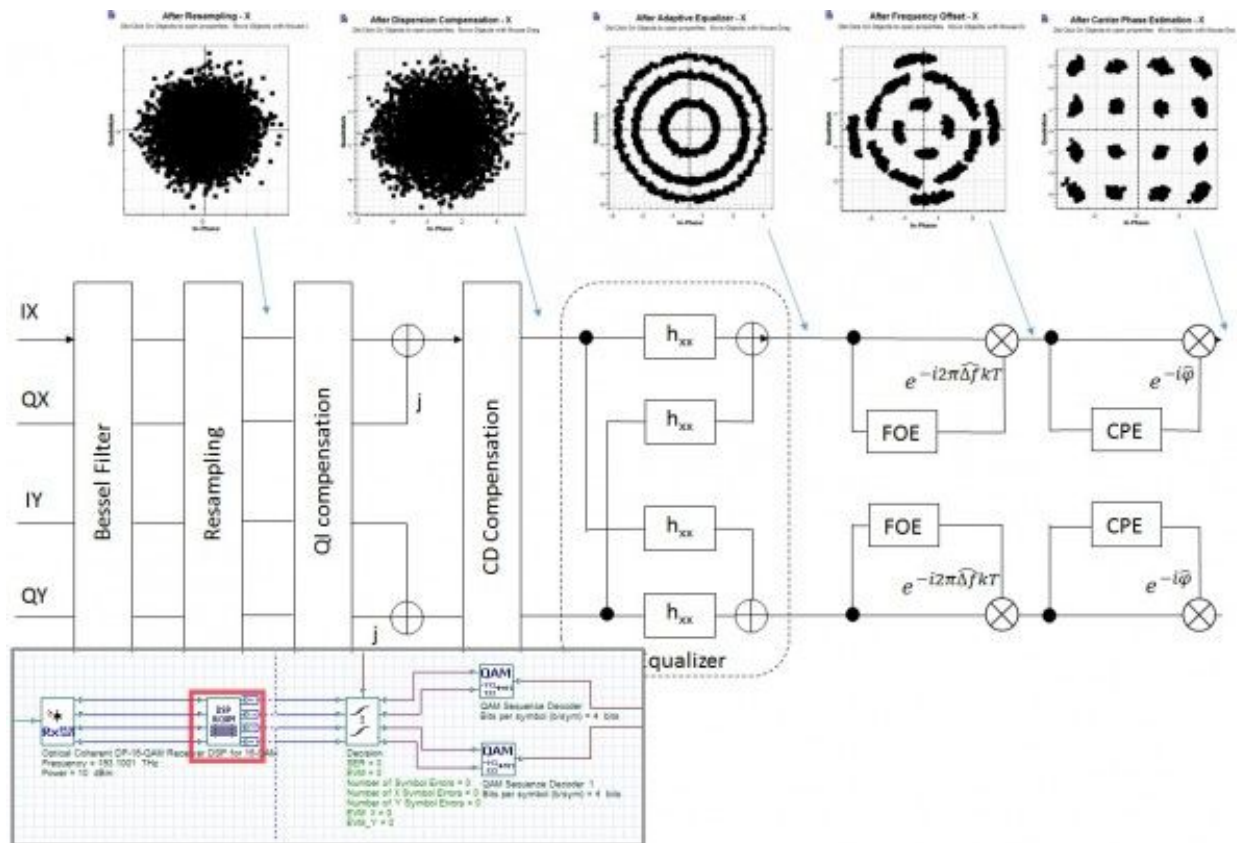


Рис. 8.3. Блок-схема цифровой обработки квадратурного сигнала

Внедрение прямоугольных оптических фильтров Найквиста позволяют реализовывать концепцию супер-каналов. Спектр данной системе представлен на рис. 8.4. Групповой сигнал приведен для пятиканальной оптической системы со скоростью одного канала 112 Гбит/с. Оптическая секция – 100 км Corning SMF G.652. Общая длина линии – 500 км.

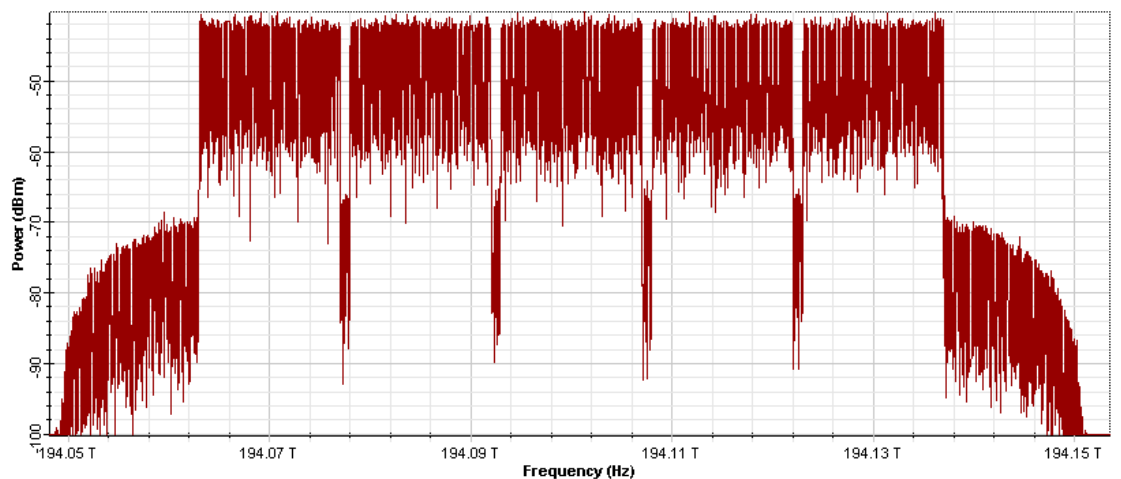


Рис. 8.4. Групповой спектр супер-канала DP-16QAM

Данный продукт позволяет интегрировать модули в текущую архитектуру системы, посредством использования исполнительных Matlab - файлов.

Также моделированию подлежат сетевые решения с оптическими суперканалами (рис.8.5).

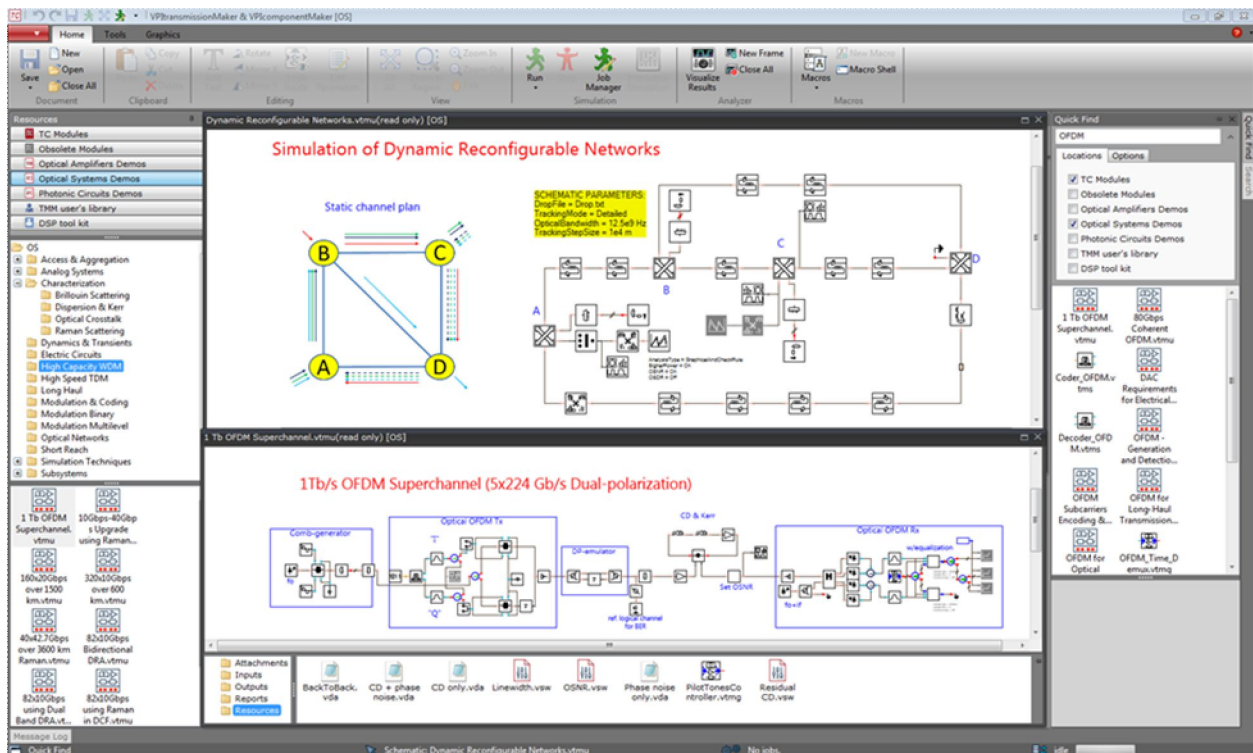


Рис. 8.5. Окно для моделирования оптических суперканалов в сети

8.2. Среда моделирования OptSim

На сегодняшний день только «Т8» единственная коммерческая компания (Россия), внедрившая данный продукт для проектирования сетей. Интерфейс программы представлен на рис.8.6. Также как и Optisystem позволяет выполнять ряд задач, поставленных перед инженерами-проектировщиками. В первую очередь это:

- Моделирование DWDM-сетей сложной топологии
- Расчет коэффициента ошибок BER, Q-фактора, оптического отношения сигнал/шум (OSNR)
- Расчет нелинейных эффектов
- Оптимизация сети для уменьшения ее стоимости
- Организация рабочей группы для расчетов сети высокой сложности
- Быстрый ввод новых устройств для моделирования новых оптических усилителей, транспондеров и других устройств
- Разработка сетей нового поколения с использованием новых форматов модуляции оптического сигнала
- Анализ ошибок и сбоев в существующих сетях

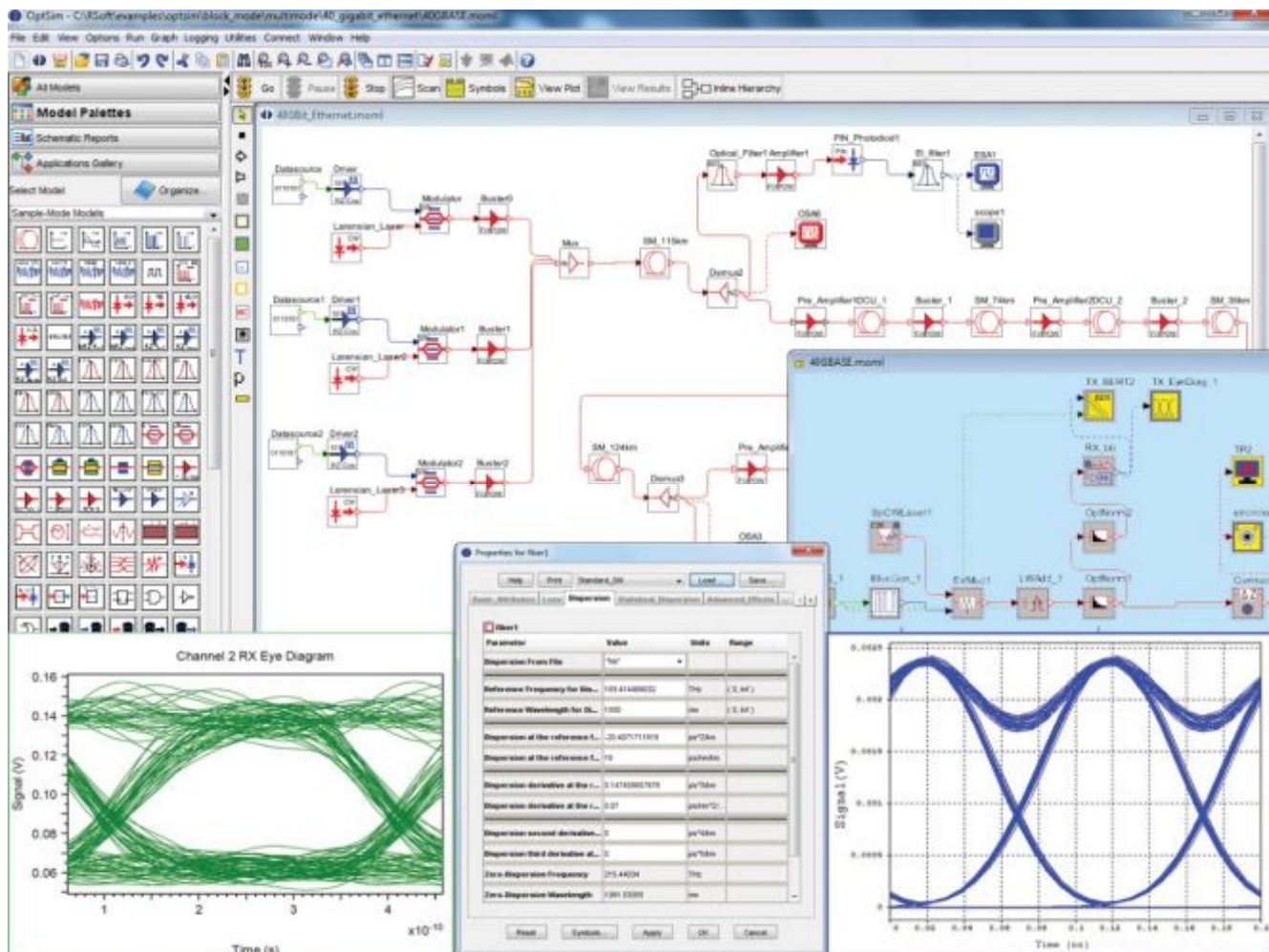


Рис. 8.6. Интерфейс OptSim

Система OptSim – ведущий в мире пакет программ для моделирования систем DWDM и других оптических сетей любой сложности. Моделирование производится с учетом воздействия всех основных линейных и нелинейных эффектов в оптическом волокне: фазовой само- и кроссмодуляции, четырехволнового смешения, вынужденного рамановского и бриллюэновского рассеяний, хроматической и поляризационной модовой дисперсии. Система адаптируется под оборудование конкретного производителя и дает хорошее соответствие модели и реальных параметров сети.

8.3. Алгоритмы упреждения ошибок

Популярным алгоритмом упреждения ошибок в системах с многоуровневыми форматами модуляции является модифицированный алгоритм Витерби (рис. 8.6) [82]. Чаще всего, данный алгоритм используется совместно с адаптивным фильтром Винера или Калмана, где реализуется восстановление фазы.

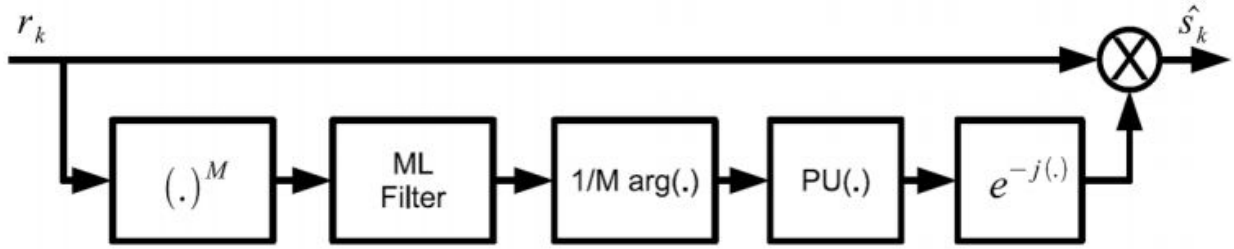


Рис. 8.6. Блок-схема алгоритма восстановления фазы на основе предсказания Витерби – Витерби

Алгоритмы Витерби-Витерби и прямого детектирования используют в своей основе метод максимального правдоподобия (ML), данный метод требует в качестве своего основного параметра соотношение SNR (signal to noise ratio). Таким образом, прежде чем использовать данные алгоритмы, необходимо достоверно определить значение SNR, так как ошибка в оценке соотношения сигнал-шум будет влиять на точность оценки ML, что ухудшит производительность всей системы в целом [83, 84, 85].

Комплексный сигнал r_k представляется в виде:

$$r_k = s_k \exp(j\theta_k) + \omega_k, \quad (8.1)$$

где s_k – исходная кодовая комбинация;

ω_k – совокупный шум в канале связи;

θ_k – фазовым сдвигом.

Значение θ_k представляется в виде дискретного Винеровского процесса.

При прохождении отчета через блок восстановления фазы амплитуда и фаза данного сигнала претерпевает манипуляции, направленные на очистку зашумленного отчета.

$$r_{k-i}^M = \{s_{k-i} \exp[j(\theta_k + \sum_{m=0}^{i-1} \Delta_m)] + \omega_{k-i}\}^M, \quad (8.2)$$

$$r_{k-i}^M \approx s_{k-i}^M \exp[jM(\theta_k + \sum_{m=0}^{i-1} \Delta_m)] + z_{k-i}, \quad (8.3)$$

где z_{k-i} – является Гауссовской случайной величиной с нулевой средней дисперсией σ_z^2 ;

$\sigma_z^2 = M^2 E_s^{M-1} \sigma_\omega^2$, – дисперсия сигнала;

$E_s = |s_k|^2$ – абсолютное значение комплексного отчета.

Рассмотрим вариант, когда влияние фазового шума низкое, тогда можно аппроксимировать $\exp(\sum_{m=0}^{i-1} \Delta_m)$ по двум первым членам из ряда Тейлора:

$$r_{k-i}^M \approx E_s^{M/2} \exp(jM\theta_k) (1 + jM \sum_{m=0}^{i-1} \Delta_m) + z_{k-i}, \quad (8.4)$$

Таким образом можно получить матрицу размером $2N+1$, состоящую из отчетов возведенных в M -степень в соответствии с форматом модуляции

$$\mathbf{r} = [r_{k-N}^M, \dots, r_{k-1}^M, r_k^M, r_{k+1}^M, \dots, r_{k+N}^M], \quad (8.5)$$

Каждый символ в многоуровневом сигнале имеет функцию плотности вероятности. Чаще всего, для определения правильно принятого символа используется многомерное нормальное распределение Гаусса:

$$f_{\mathbf{r}|\theta[k]}(\mathbf{r}|\theta[k]) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{2N+1}{2}} |\mathbf{C}|^{\frac{1}{2}}} \times \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{r} - \mathbf{m}_r)^H \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{r} - \mathbf{m}_r) \right], \quad (8.6)$$

$$\text{где } \mathbf{m}_r = E\{\mathbf{r}\} = E_s^2 e^{jM\theta[k]} \mathbf{1}.$$

В предыдущем выражении единичная матрица представлена в виде $\mathbf{1} = [\mathbf{1} \ \mathbf{1} \ \dots \ \mathbf{1}]_{2N+1}^T$, а матрица $\mathbf{C}$ является ковариационной матрицей:

$$\mathbf{C} = E_s^M M^2 \sigma_{\Delta}^2 \mathbf{K} + E_s^{M-1} M^2 \sigma_w^2 \mathbf{I}_{(2N+1) \times (2N+1)}, \quad (8.7)$$

Использование данной матрицы обусловлено применением алгоритма максимального правдоподобия (MLSE). В случае с использованием в блоке цифровой обработки сигнала логарифмическая функция правдоподобия имеет следующий вид:

$$\theta_k^{ML} = \arg_{\theta_k} \max \ln(f_{\mathbf{r}|\theta_k}(\mathbf{r}|\theta_k)). \quad (8.8)$$

С учетом вышеприведенных выражений, выражение можно представить в виде:

$$\theta_k^{ML} = \frac{1}{M} \arg(\mathbf{1}^T \mathbf{C}^{-1} \cdot \mathbf{r}), \quad (8.9)$$

После прохождения блока максимального правдоподобия фаза зашумленного сигнала поступает на блок коррекции фазовых углов. Актуальность данной процедуры обусловлена тем, что θ_k в процессе прохождения отчета, за счет влияния шума, может меняться в пределах от $-\infty$ до $+\infty$, вместо того, чтобы ограничиться значениями $-\pi/M$ до $+\pi/M$. Тем самым, блок фазовой коррекции позволяет вернуть значения фазы сигнала в разрешенный диапазон. Выражение (8.10) показывает функцию управления фазовой коррекцией:

$$PU(\cdot) = (\cdot) + \left(\left[\frac{1}{2} + \frac{\hat{\theta}_{k-1} - (\cdot)}{\frac{2\pi}{M}} \right] \right) \frac{2\pi}{M}, \quad (8.10)$$

После прохождения цепи коррекции фазы сигнала, фазовый разброс, что существовал между незашумленной фазой и зашумленным значением фазы имеет вид:

$$\hat{\theta}[k] = \text{PU} \left\{ \frac{1}{4} \arg(\mathbf{1}^T \mathbf{C}^{-1} \cdot \mathbf{r}) \right\}, \quad (8.11)$$

В виду того, что полученный массив фаз необходимо скорректировать на практике используются фильтры Калмана и Виннера [86]. Данные фильтры позволяют на основе рассчитанных параметров предсказать значение исходной фазы принятого отчета. На рис. 8.7 представлен механизм возврата значения фазы сигнала к исходному состоянию.

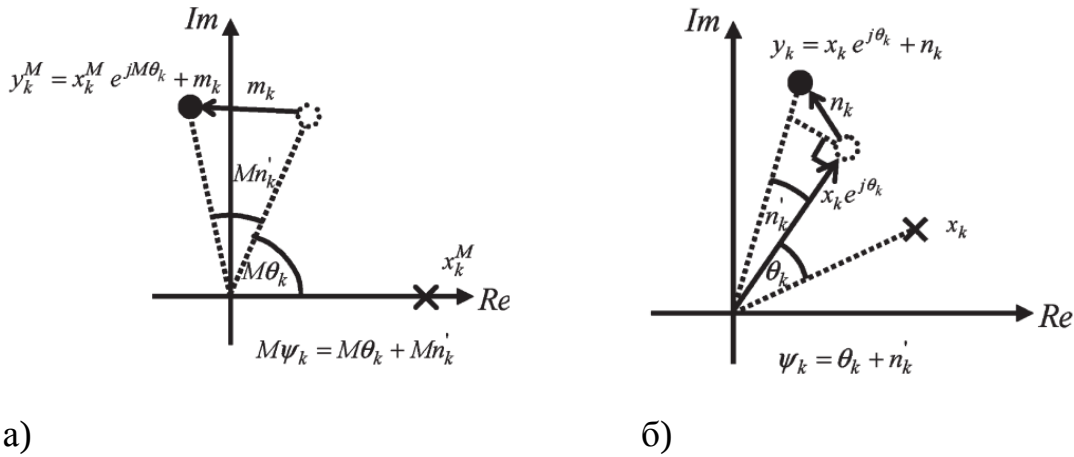


Рисунок 8.7. Модель восстановления фазы на основе «мягкого» принятия решения: а) алгоритм непрямого детектирования; б) алгоритм прямого детектирования

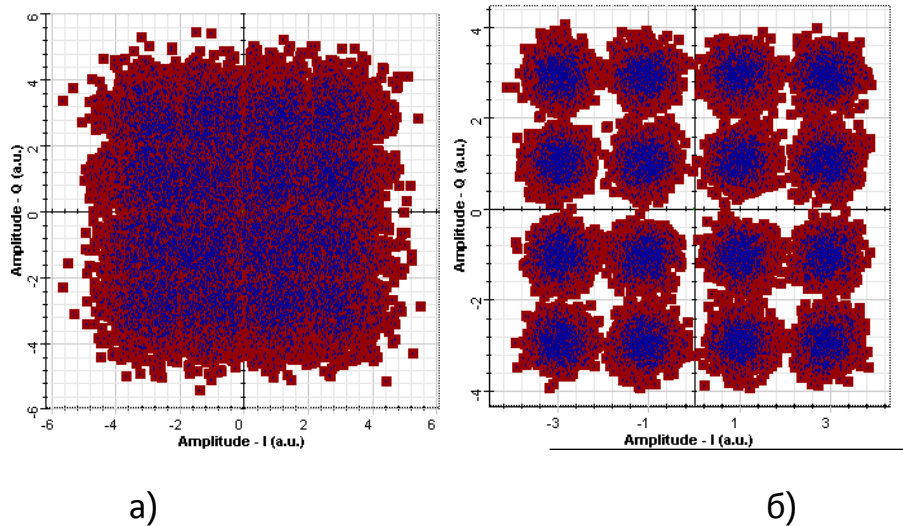


Рис. 8.8. Конселляционная диаграмма 16QAM сигнала при скорости 112Гбит/с

При моделировании одноканальной системы со скоростью 112 Гбит/с с использованием алгоритма упреждения ошибок были получены конселляционные диаграммы. На рис. 8.8а представлена зашумленная диаграмма. В данном случае

$BER \leq 10^{-2}$. Определение фазовых состояний 16QAM сигнала является невозможным. В случае использования блока цифровой обработки сигнала полученная зависимость позволяет определить принятые фазовые состояния сигнала (рис. 8.8б).

8.4. Выводы

Действенным средством исследования возможностей оптических систем передачи с терабитными и петабитными скоростями являются ряд программных продуктов, представленных на рынке инструментов для научных и инженерных разработок (Optisim, Optisystem).

Моделирование позволяет при минимальных затратах получить результаты для проектирования систем передачи с оптическими суперканалами и их эксплуатации в различных режимах (температурных, трафиковых, мощностных при перегрузках волокон, различных величинах OSNR и BER, и т.д.)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заявляемые операторами телекоммуникационных сетей новые виды широкополосных услуг нуждаются в транспортной поддержке оптическими сетями связи, построенными преимущественно на кабельных линиях с волокнами типа SMF. Предельные пропускные возможности волокон SMF известны и находятся в пределах 30 - 60 Тбит/с. Достижению указанных скоростей передачи способствуют DWDM с интервалом между каналами 25, 50 и 100 ГГц для диапазонов C и L, многоуровневая квадратурная модуляция (mQPSK, m=4, 16, 32, 64, 128, 256) оптической несущей частоты в каждом канале и поляризационное мультиплексирование.

По ряду прогнозов на развитие телекоммуникаций до 2020 – 2030 годов потребуются существенно большие пропускные способности транспортных оптических сетей, которые достигнут величин в 10-ки Пбит/с и возможно Ебит/с.

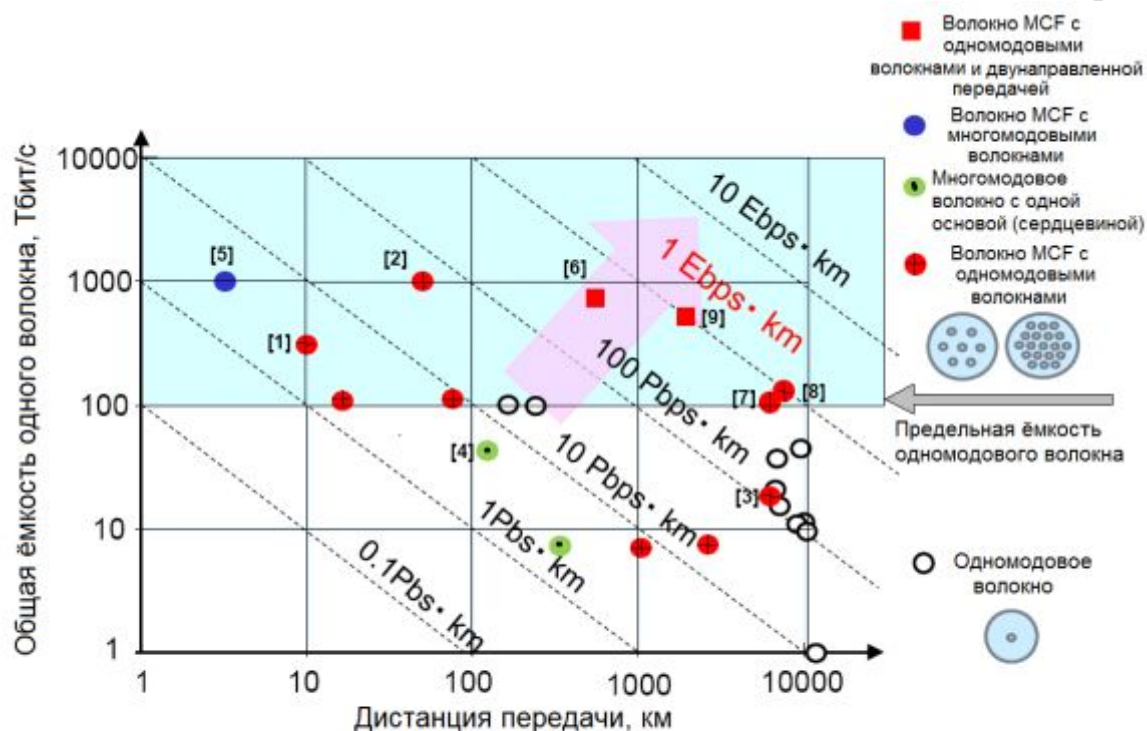
Решить задачи столь существенного роста пропускных способностей помогут: оптические суперканалы на скорость 1 Тбит/с; волоконные световоды нового поколения MCF, FMF; оптические мультиплексоры с гибким доступом к волоконным сердцевинам, группам спектральных каналов, отдельным спектральным каналам и оптические коммутаторы.

Для этого необходимо проведение ряда разработок и экспериментов модельного и натурного плана с оптическими системами передачи.

Направлениям таких разработок можно признать:

- оптические компоненты (волокна, соединения, коммутации и т.д.);
- электронные компоненты и алгоритмы обработки сигналов реального времени (корректоры дисперсии, корректоры ошибок FEC, подстройки частот лазеров когерентных приёмников);
- маршрутизация высокоскоростных соединений для высокоэффективного использования ресурсов оптических каналов и соединений, и их защиты.

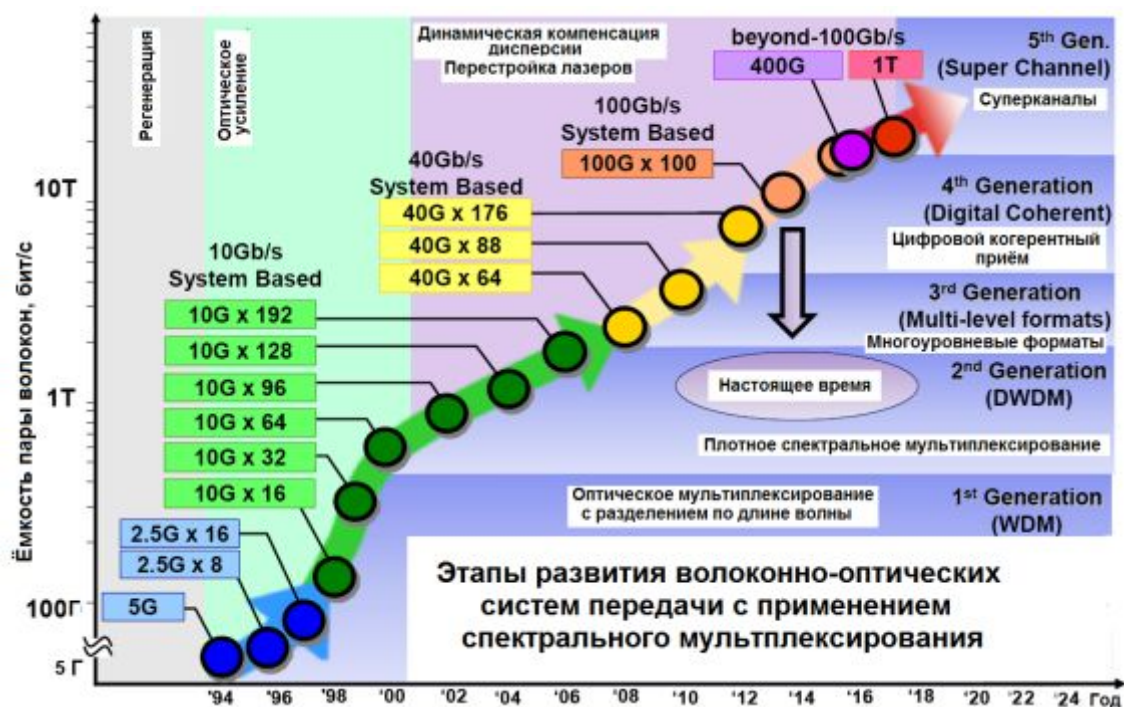
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Тренды по достижению петабитных и эксабитных скоростей оптических систем передачи [3]



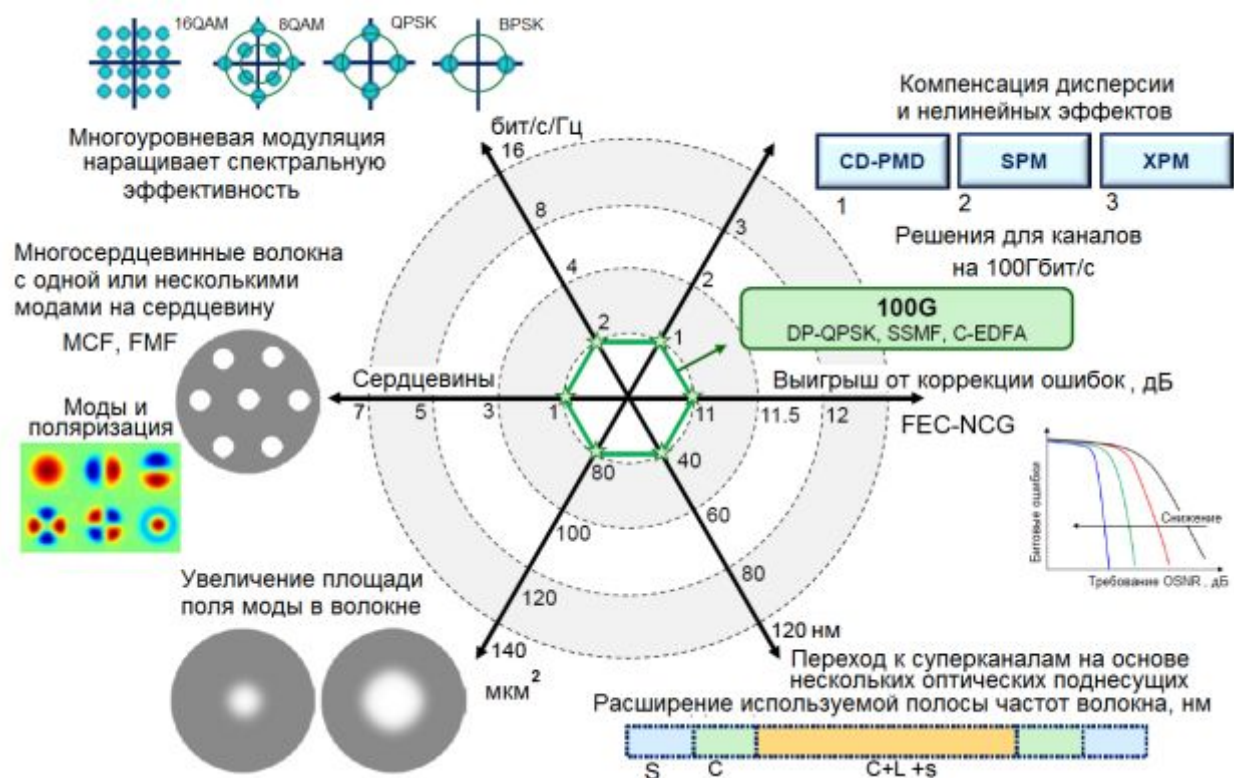
Информационные источники:

[1] J. Sakaguchi et al, OFC2012 PDP 5C.1, 2012, [2] H. Takara et al, ECOC2012, Th.3.C.1, 2012. [3] T. Tsuritani et al, ECOC2012, Th.3.C.3, 2012. [4] V.A.J.M. Sleiffering et al., ECOC2012, Th.3. C.4, 2012. [5] D. Qin et al., FiO 2012, PD FW6C.3, 2012. [6] A.Sano et al. Optics Express Vol.21(14), 16777-16783 (2013). [7] K. Igarashi et al., Optics Express, Vol. 21, (15), pp.18053-18060 (2013). [8] K. Igarashi et al., ECOC2013, PD3.E.3 (2013) [9] T. Kobayashi et al. ECOC2013, PD3.E.4 (2013).

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Этапы развития систем передачи



ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Способы достижения терабитных и петабитных скоростей передачи



ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Варианты представления мод волоконных световодов

lm	$N = l + 2(m-1)$	Стандартные скалярные моды	LP псевдо-векторные моды	Стандартные трёх векторные моды
01	0			
11	1			
21	2			
02	2			

Где N - модовое число, l – азимутальная ориентация мод, m – модовая составляющая в плоскости сечения волокна.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ASE, Amplified Spontaneous Emission, усиленная спонтанная эмиссия
ASON, Automatic Switched Optical Network, автоматически коммутируемая оптическая сеть

AWG, Array-waveguide-grating, волноводная решетка

BIP-8, Bit Interleaved Parity, пересчет чередующихся 8 бит для определения ошибок в оптическом канале

BOA, Booster Optical Amplifier, оптический усилитель мощности

BPSK, Binary Phase-Shift Keying, двухпозиционная фазовая манипуляция

BV-WXC, Bandwidth-Variable Wavelength Cross-Connect, управляемая по полосе волновая кроссовая коммутация

CFP, C-Form-Factor Pluggable, промышленный стандарт на модули 40/100Гбит/с

CSF, Cut-off Shifted Fibre, смещенная длина волны отсечки

CWDM, Coarse Wavelength Division Multiplex, грубое мультиплексирование с разделением по длине волны

DBR, Distributed Bragg Reflector, распределённый брэгговский отражатель

DFB, Distributed Feed-Back, распределённая обратная связь

DP-QPSK, Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keyed optical modulation, двойная поляризация с оптической квадратурной фазовой модуляцией

DRA, Distributed/ discrete Raman amplifier, распределённый/дискретный рамановский усилитель

DSP, Digital Signal Processing, цифровая обработка сигналов

DWDM, Dense WDM, плотное WDM

EAMs, Electro-Absorption Modulators, электроабсорбционные модуляторы

EDFA, Erbium-Doped Fiber Amplifier, эрбиевый волоконный усилитель

FAS, Frame Alignment Signal, синхросигнал, указывающий на начало цикла

FBG, Fiber Bragg Grating, волоконная брэгговская решетка

FEC, Forward Error Correction, упреждающая коррекция ошибок

FMF, Few mode fiber, маломодовое волокно

FP, Fabri-Perot, Фабри - Перо

FSK, Frequence-shift Keying, частотная манипуляция

FWM, Four-Wave Mixing, четырёхволновое смешивание

GCC, General Communication Channel, общий канал связи

G-MPLS, Generalized Multi-Protocol Label Switching, общий протокол многопротокольной коммутации по меткам

IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers, институт инженеров по электротехнике и электронике
ILF, Interleave Filter, полосный (интерливинговый) оптический фильтр
IP/MPLS/TP-MPLS, Internet Protocol/Multiprotocol Label Switching – Transport Profile, интернет протокол/многопротокольная коммутация по меткам и её транспортный профиль
ITU-T, International Telecommunications Union – Telecommunications services sector, сектор телекоммуникаций Международного Союза Электросвязи

LO, Local Oscillator, локальный генератор
LP_{lm}, Linearly polarized pseudo vector modes, линейнополяризованных псевдовектор мод

MCM, Multicarrier Modulation, модуляция многих несущих
MEMS, Microelectromechanical systems, микроэлектромеханическая система
MFAS, Multiframe Alignment Signal, синхросигнал сверхцикла
MFD, Mode Field Diameter, диаметр поля моды
MIMO, Multiple input and multiple output, множественный вывод/ввод
MQW, Multiple Quantum Wells, множественные квантовые ямы
MXP, Multi-rate, Multiprotocol Muxponder, многопротокольный, многоскоростной мультиплексирующий транспондер

NDSF, Non-Dispersion Shifted Fiber, волокно со смещённой ненулевой дисперсией
NLSE, Non Linear Schrodinger Equation, нелинейное уравнение Шрёдингера

OADM, Optical Add-Drop Multiplexer, оптический мультиплексор выделения/ввода
OAM&P, Operation, Administration, Maintenance and Provisioning, эксплуатация, администрирование, техническое обслуживание и настройка
OCCo, Optical Channel Carrier – overhead, заголовок оптического канала
OCh, Optical Channel, оптический канал
ODU, Optical channel Data Unit, блок данных оптического канала
ODU_k, Optical channel Data Unit-k, комплексно стандартизированный блок ODU уровня k, где k=1,2,3,4
ODU_k.ts, Optical channel Data Unit k fitting in ts tributary slots, блоки с установкой временных позиций
ODU_kP, Optical channel Data Unit-k Path monitoring level, блоки с уровнем мониторингом соединения (тракта) из конца в конец
ODU_kT, Optical channel Data Unit-k Tandem connection monitoring level, блоки с определённым уровнем мониторинга tandemных соединений
ODU_k-Xv, X virtually concatenated ODU_ks, виртуально сцепленные блоки (X – число блоков)

OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением
 OIF, Optical international forum – международный оптический форум
 OMS, Optical Multiplex Section, оптическая секция мультиплексирования
 OMU-n.m, Optical Multiplex Unit, оптический блок мультиплексирования
 ONE, Optical Network Element, оптический сетевой элемент
 OPLL, Optical Phase Locked Loop, оптическая петля управления фазой
 OPSMnk, Optical Physical Section Multilane, многолинейная оптическая физическая секция
 OPU, Optical channel Payload Unit, блок нагрузки оптического канала
 OP Uk Optical channel Payload Unit-k, комплексно стандартизированный блок OPU уровня k, где k=1,2,3,4
 OP Uk-Xv X virtually concatenated OP Uks, блок нагрузки оптического канала с виртуальной сцепкой (X – число сцепляемых OPU)
 OSC, Optical Supervisory Channel, оптический сервисный канал
 OSDM, Optical space division multiplexing, оптическое мультиплексирование с пространственным разделением
 OSNR, Optical Signal-to-Noise Ratio, оптическое отношение сигнал/шум
 OTL, Optical channel Transport Lane, канал оптической транспортной линии
 OTM, Optical Transport Module, оптический транспортный модуль
 OTN/OTH, Optical Transport Network - Optical Transport Hierarchy, оптическая транспортная сеть / оптическая транспортная иерархия
 OTS, Optical Transmission Section, оптическая секция передачи
 OTU, Optical Transport Unit, оптический транспортный блок
 OT Uk, completely standardized Optical channel Transport Unit-k, комплексно стандартизированный блок OTU уровня k, где k=1,2,3,4
 OT Uk-v, Optical channel Transport Unit-k with vendor specific OTU FEC, оптический транспортный блок со спецификацией упреждающей коррекции ошибок
 OT UkV, functionally standardized Optical channel Transport Unit-k, функционально стандартизированный блок OTU
 OVCO, Optical Voltage Controlled Oscillator, оптический генератор, управляемый напряжением
 OXC, Optical Cross-Connect, оптическая кроссовая коммутация

 PBS, Polarization Beam Splitters, поляризационно-зависимые разветвители
 PCF, Photonic crystal fiber, фотонно-кристаллическое волокно
 PDH, Plesiochronous Digital Hierarchy, плезиохронная цифровая иерархия
 PLC, Planar Lightwave Circuit, планарный волновой канал
 PSK, Phase-shift Keying, фазовая манипуляция
 PXC, Photonic cross-connect, фотонный кроссовый коммутатор

ROADM, Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer, перестраиваемый оптический мультиплексор выделения/ввода
ROSA, Receiver Optical Sub – Assembly, сборка оптического приёмника
RSA, Routing and Spectrum Allocation, маршрутизация и распределение спектра
RWA, Routing and Wavelength Assignment, маршрутизация и назначение длины волны

SBS, Stimulated Brillouin Scattering, стимулированное рассеяние Брюэллена
SDH, Synchronous Digital Hierarchy, синхронной цифровой иерархии
SFP, Small Form-factor Pluggable, компактный сменный форм-фактор
SM, Section Monitoring, наблюдение секции
SMF, Single Mode Fiber, одномодовое оптическое волокно
SOA, Semiconductor Optical Amplifier, полупроводниковый оптический усилитель
SPM, Self-Phase Modulation, фазовая самомодуляция
SRS, Stimulated Raman Scattering, стимулированное рассеяние Рамана
SSG-DBR, superstructure grating distribute Bragg reflector, распределённые брэгговские отражатели с решеткой суперструктуры

TDM, Time Division Multiplexing, мультиплексирование с временным разделением
TIA, TransImpedance Amplifiers, усилитель с конверсией сопротивления
TMN, Telecommunications Management Network, сеть управления телекоммуникациями
TWPD, Traveling-wave photodetector, фотодетектор бегущей волны

UNI, User-to-Network Interface, интерфейс пользователь-сеть

VCSEL, Vertical-Cavity Surface Emitting Laser, лазер вертикального излучения

WDM, Wavelength Division Multiplex, мультиплексирование с разделением каналов по длине волны
WSS, Wavelength Selective Switch, волновой селективный коммутатор

XPM, Cross-Phase Modulation, фазовая кросс-модуляция

ZDSF, Zero Dispersion Shifted Fiber, волокно со смещённой нулевой дисперсией

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дианов Е.М.* На пороге пета эры// Фотон-экспресс, 2013, №8. –С.30-35.
2. *Трещиков В.Н.* Разработка DWDM системы ёмкостью 25Тбит/с// Фотон-экспресс, 2013, №2. С.24-28.
3. *Yutaka Miyamoto.* Over one Pbit/s capacity optical transmission based on 400 Gb/s channel and beyond// The 6th International Symposium on Ultrafast Photonics Technologies (ISUPT 2013), Oct. 21st 2013, NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation. URL: <http://www.optics.rochester.edu/workgroups/knox/myweb/ISUPT2013/archive/Miyamoto.pdf>
4. *Барсков А.* Почему 400GbE, а не 1ТбЕ?// Журнал сетевых решений LAN, 2013г., №9.
5. Record 10 Tbps single-channel fiber-optic transmission demonstrated by ZTE// Laser Focus World, 03.30.2011. URL: <http://www.laserfocusworld.com/articles/2011/03/zte-10tbps.html>
6. *Ramaswami R., Sivarajan K.* Optical Networks: A Practical Perspective. Morgan Kaufmann Publishers. 1998. P. 632.
7. *Bob Chomycz.* Planning fiber optic networks. Mc Graw Hill, 2009.P. 401.
8. *Goving P. Agrawal.* Nonlinear Fiber Optics. Academic Press, 2001. P.481.
9. *T. H. Lotz, W. Sauer-Greff, R. Urbansky.* Spectral Efficient Coding Schemes in Optical Communications// International Journal of Optoelectronic Engineering 2012, 2(4): 18-25.
10. *J. Leuthold.* Optical Communications Systems - Part 2: Transmitters and Modulation Formats , URL: <http://ihq.webarchiv.kit.edu/studies/OTR/download/WS1112/Lecture/OK-S f.pdf>
11. *H. Debrégeas-Sillard, A. Plais, A. Vuong, Th. Fillion, D. Locatelli, J. Decobert, D. Herrati, P. Doussière, J. Jacquet.* Tunable semiconductor lasers for telecommunications applications// IEEE Photonics Technology Letters, Oct 2002, Vol.14, No.10, pp.1457-1459.
12. *L. A. Coldren, G. A. Fish, Y. Akulova, J. S. Barton, L. Johansson, C. W. Coldren.* Tunable Semiconductor Lasers// A Tutorial, vol. 22, Journal of Lightwave Technology, 2004, p. 193.
13. *Jeong-Woo Park, Sangpil Han, Donghun Lee, Han-Cheol Ryu, Jun-Whan Shin, Namje Kim, Young-Jong Yoon, Hyunsung Ko, and Kyung Hyun Park.* High-Speed Traveling-Wave Photodetector with a 3-dB Bandwidth of 410 GHz// ETRI Journal, Volume 34, Number 6, December 2012, pp. 942-945.
14. *P.-H Sun.* A SiGe/Si multiple quantum well avalanche photodetector// ISDRS 2009, December 9-11, 2009 College Park, MO, USA. URL: http://research.nchu.edu.tw/upfiles/ADUpload/oc_downmul 2327266253.pdf
15. *Новиков А.Г., Трещиков В.Н., Плаксин С.О., и др.* Перспективные DWDM системы связи со скоростью 20Тбит/с на соединение// Фотон-Экспресс, №3, 2012.- С.34-37.
16. *Kaminov Ivan P., Li Tingye, Willner Alan E.* Optical fiber telecommunications VIA. Components and subsystems. Elsevier, 2013.-774p.

17. *J. M. Kahn and K.-P. Ho*. Spectral Efficiency Limits and Modulation/Detection Techniques for DWDM Systems// IEEE. J. on Sel. Topics in Quantum Electron., vol. 10, no. 2, pp. 259-272, March/April 2004.
18. *G. Bosco, V. Curri, A. Carena, P. Poggiolini and F. Forghieri*. On the Performance of Nyquist-WDM Terabit Superchannels Based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM Subcarriers// Journal of Lightwave Technology 29.1 (Jan. 1, 2011 [JLT]) P. 61-53.
19. *Eugen Lach , Wilfried Idler*. Modulation formats for 100G and beyond// Optical Fiber Technology 17 (2011) 377–386. URL: http://www.ece.queensu.ca/Current-Students/Graduate/Course-Homepages/ELEC863_Winter2011/files/Lach_OFT_2011a.pdf
20. *H. Chaouch , C. Gonschior , K.-F. Klein , S. Vorbeck , M. Schneiders, W. Weiershausen, F. Kuppers*. Numerical analysis and system optimization for 100 Gbit/s carrier Ethernet serial modulation formats// Optics Communications 283 (2010). P. 2333–2338. journal homepage: www.elsevier.com/locate/optcom
21. Dispersion Compensating Fiber. Thorlabs. URL: <http://www.thorlabs.de/thorproduct.cfm?partnumber=DCF38>
22. *Kazuhiko Aikawa, Junji Yoshida,1 Susumu Saitoh, Manabu Kudoh, and Kazunari Suzuki*. Dispersion Compensating Fiber Module// Fujikura Technical Review, 2011. P.16-22.
23. ITU-T Recommendation G.709/Y.1331 (02/2012), Interfaces for the optical transport network (OTN).
24. *Морелос-Сарагоса Р.* Искусство помехоустойчивого кодирования. –М.: Техносфера, 2005.
25. *Yanfei Xu, Yaojun Qiao, Yuefeng Ji*. Improving nonlinearity tolerance of 112-Gb/s PDM OFDM systems with coherent detection using BLAST algorithm// CHINESE OPTICS LETTERS November 10, 2012. URL: <http://www.opticsinfobase.org/col/abstract.cfm?uri=col-10-11-110601>
26. *Bernhard Goebel, Bertram Fesl, Leonardo D. Coelho and Norbert Hanik*. Technische Universität München, Institute for Communications Engineering, D-80290 Munich, Germany Bernhard. Goebel@tum.de «On the Effect of FWM in Coherent Optical OFDM Systems» 2008, Optical Society of America. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.142.2998&rep=rep1&type=pdf>
27. *Arthur James Lowery*. Amplified-spontaneous noise limit of optical OFDM lightwave systems// OPTICS EXPRESS, January 2008 / Vol. 16, No. 2
28. *A. Li, X. Chen, A. A. Amin, J. Ye and W. Shieh*. Space-Division Multiplexed High-Speed Superchannel Transmission over Few-Mode Fiber//Journal of Lightwave Technology, Vol. 30, No. 24, December, 2012, pp. 3953-3963.
29. *M. Yamada, K. Tsujikawa, L. Ma, K. Ichii, S. Matsuo, N. Hanzawa and H. Ono*. Optical fiber Amplifier Employing a Bundel of Reduced cladding Erabium-Doped Fibers// IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 24, No. 21, November 2012, pp. 1910-1913.
30. *J. Zhou and P. Gallion*. A Novel Multiplexer/Demultiplexer for Multi-Core Fibers// IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 25, No. 13, July,2013, pp. 1214-1217.

31. S. K. Korotky. Price-Points for Components of Multi-Core Fiber Communication Systems Backbone Optical Networks// Journal of Optical Networking, Vol. 4, No. 5, May 2012, pp. 426-435.
32. H. Takara, H. Ono, Y. Abe, H. Masuda, K. Takenga, S. Matsuo, H. Kubota, K. Shibahara, T. Kobayashi and Y. Miyamoto. 1000-km 7-Core Fiber Transmission of 10×96-Gb/s PDM-16QAM using Raman Amplification with 6.5 W per Fiber// Optics Express, Vol. 20, No. 9, April 2012, pp. 10100-10105.
33. K. Imamura and R. Sugizaki. Recent Advances in Multi-Core Transmission Fibers// Proceedings of Opto Electronics Communications Conference (OECC2012), Busan, Korea, July 2012, pp. 559-560. URL: http://www.academia.edu/5498264/Multi-Core_Fibers_An_Overview
34. K. Takenga, Y. Arakawa, S. Tanigawa, N. Guan, S. Matsuo, K. Saito and M. Koshiha. Reduction of Crosstalk by Trench-Assisted Multi-Core Fiber// Proceedings of Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, Los Angeles, United States, March 2011. URL: http://www.academia.edu/5498264/Multi_Core_Fibers_An_Overview
35. K. Tomozawa and Y. Kokubun. Maximum Core Capacity of Heterogeneous Uncoupled Multicore Fiber// Proceedings of Opto Electronics and Communication Conference (OECC2010), Sapporo Convention Center, Japan, July 2010, pp. 170-171.
36. K. Mukasa, K. Imamura, Y. Tsuchida and R. Sugizaki. Multi-Core Fibers for Large Capacity SDM// Proceedings of Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, Los Angeles, United States, March 2011.
37. D. M. Taylor, C. R. Barnett, T. J. Shepherd, L. F. Michaille, M. D. Nielson and H. R. Simonsen. Demonstration of Multi-Core Photonic Crystal Fiber in an Optical Interconnect// Electronics Letters, Vol. 42, No. 6, March 2006, pp. 331-332.
38. M. Koshiha. Recent Progress in Multi-Core Fibers for Ultralarge Capacity Transmission// Proceedings of Opto Electronics and Communications Conference (OECC2010), Sapporo Convention Center, Japan, July 2010, pp. 38-39.
39. M. Koshiha, K. Saito and Y. Kokubun. Heterogeneous Multi-Core Fibers: Proposals and Design Principles// IEICE Electronics Express, Vol. 6, No. 2, pp. 98-103
40. B. Zhu, T. F. Taunay, M. F. Yan, J. M. Fini, M. Fishteyn, M. Monberg and F. V. Dimarcello. Seven-Core Multicore Fiber Transmissions for Passive Optical Networks// Optics Express, Vol. 18, No. 11, May 2010, pp. 11117-11122.
41. K. S. Abedin, T. F. Taunay, M. Fishteyn, M. F. Yan, B. Zhu, J. M. Fini, E. M. Monberg, F. V. Dimarcello and P. W. Wisk. Amplification and noise properties of an Erbium Doped Multicore Fiber Amplifier// Optics Express, Vol. 19, No. 17, August 2011, pp. 16715-16721.
42. T. Hayashi, T. Taru, T. Sasaki and E. Sasaoka. Characterization of Crosstalk in Ultra-Low-Crosstalk Multi-Core Fiber// Journal of Lightwave Technology, Vol. 30, No. 4, February 2012, pp. 583-589.
43. Y. Tottori, T. Kobayashi and M. Watanabe. Low Loss Optical Connection Module for Seven Core Multicore Fiber and Seven Single Mode Fibers// IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 24, No. 21, November 2012, pp. 1926-1928.

44. *T. Watanabe, M. Hikita and Y.Kokubun.* Laminated Polymer Waveguide Fan-Out Device for Uncoupled Multi - Core Fibers// OpticsExpress, 19 Th November 2012, Vol. 20, No. 24, pp. 26317-26325.
45. *H. Ono, M. Yamada, K. Takenga, S. Matsuo, Y. Abe, K. Shikama and T. Takahashi.* Amplification Method for Crosstalk Reduction in Multi-Core Fiber Amplifier// Electronics Letters, Vol. 49, No. 2, January 2013, pp. 138-140.
46. *Y. Abe, K. Shikama, S. Yanagi and T. Takahashi.* Physical-Contact-Type Fan-Out Device for Multicore Fiber// Electronics Letters, Vol. 49, No. 11, May 2013, pp. 711-712.
47. *I. Ishida, H. Hamaguchi, K. Takenga, S. Matsuo, K. Saitoh and M.Koshiba.* Longitudinal Power Decay of Weakly Coupled Multi-Core Fibere Fiber// IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 25, No. 13, July2013, pp. 1270-1273
48. *Kunimasa Saitoh and Shoichiro Matsuo.* Multicore fibers for large capacity transmission// Nanophotonics 2013; 2(5-6): P. 441–454.
49. *Tetsuya HAYASHI, Toshiki TARU, Osamu SHIMAKAWA, Takashi SASAKI, Eisuke SASAOKA.* Low-Loss and Large-Aeff Multi-core Fiber for SNR Enhancement// ECOC Technical Digest, 2012, OSA. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp>
50. *J. H. Chang, H. G. Choi, and Y. C. Chung.* Impacts of Increased Effective Area on the Capacity of Multi-Core Fiber System// OptoElectronics and Communications Conference held jointly with 2013 International Conference on Photonics in Switching (OECC/PS) 2013 18th.
51. *Osamu Shimakawa, Hajime Arao, Manabu Shiozaki, Tomomi Sano and Akira Inoue.* Connector Type Fan-out Device for Multi-core Fiber// SEI TECHNICAL REVIEW · Number 77 · October 2013, pp.23-28.
52. *Ricard J. Black, Langis Gagnon.* OPTICAL WAVEGUIDE MODES. Polarization, Coupling, and Symmetry. - McGraw-Hill Companies, 2010.-206p.
53. *Y. Jung, Q. Kang, V. A. J. M. Sleiffer, B. Inan.* Three mode Er³⁺ ringdoped fiber amplifier for mode-division multiplexed transmission// OPTICS EXPRESS, April 2013 | Vol. 21, No. 8
54. *M. Salsi, R. Ryf, G. Le Cocq, L. Bigot.* A Six-Mode Erbium-Doped Fiber Amplifier// ECOC Postdeadline Papers, 2012 OSA
55. *Steven Gringeri, E. Bert Basch, and Tiejun J. Xia.* Technical Considerations for Supporting Data Rates Beyond 100 Gb/s// IEEE Communications Magazine, February 2012, p. 21 - 30.
56. *M. D. Feuer¹, L. E. Nelson¹, K. Abedin, X. Zhou¹, T.F. Taunay, J. F. Fini, B. Zhu, R. Isaac¹, R. Harel, G. Cohen, and D. M. Marom.* ROADM System for Space Division Multiplexing with Spatial Superchannels. www.research.att.com/techdocs/TD_101123.pdf/
57. *Ezra Ip, Ming-Jun Li, Kevin Bennett, Yue-Kai Huang, Akihiro Tanaka, Andrey Korolev, Konstantin Koreshkov, William Wood, Eduardo Mateo, Junqiang Hu, Yutaka Yano.* 146λ·6·19-Gbaud Wavelength- and Mode-Division Multiplexed Transmission over 10·50-km Spans of Few-Mode Fiber with a Gain-Equalized Few-Mode EDFA// Journal of Lightwave Technology, Vol. 32, Issue 4, pp. 790-797 (2014)

58. Ezra Ip, Ming-Jun Li, Kevin Bennett, Andrey Korolev, Konstantin Koreshkov, William Wood, Carlos Montero, Jesús Liñares. Experimental Characterization of a Ring-Profile Few-Mode Erbium-Doped Fiber Amplifier enabling Gain Equalization// OFC/NFOEC Technical Digest 2013 OSA. URL: www.corning.com/.../downloadasset.aspx?id..
59. Andrew D. Ellis, Jian Zhao, David Cotter. Approaching the Non-Linear Shannon Limit// JLT-11648-2009.R1. URL: <http://core.ac.uk/download/pdf/9624238.pdf>
60. Birk M., Gerard P., Curto R. Real – Time Single-Carrier Coherent 100Gb/s PM-QPSK Field Trial. Journal of Lightwave Technology. 25, NO. 4, February 15 2011, pp.417-425.
61. S. Chandrasekhar, Xiang Liu. OFDM Based Superchannel Transmission Technology// Journal of Lightwave Technology, VOL. 30, NO. 24, December 15, 2012, pp. 3816-3823.
62. Itsuro Morita, Wei-Ren Peng. High Capacity WDM Transmission Using Terabit Super-Channels// ECOC Technical Digest 2012 OSA. URL: <https://www.deepdyve.com/lp/institute-of-electrical-and-electronics-engineers/high-capacity-wdm-transmission-using-terabit-super-channels-hWPx0k0X34>
63. Sumant Ku. Mohapatra, Ramya Ranjan Choudhury, Rabindra Bhojray and Pravanjan Das. PERFORMANCE ANALYSIS AND MONITORING OF VARIOUS ADVANCED DIGITAL MODULATION AND MULTIPLEXING TECHNIQUES OF F.O.C WITHIN AND BEYOND 400 GB/S//International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC) Vol.6, No.2, March 2014, pp.159-181.
64. J. Leuthold, W. Freude, C. Koos, D. Hillerkuss, R. Schmogrow. Real-time Digital Signal Processing for Software-defined Optical ...Proc. OECC 2012, Invited Paper 3B1-2. URL : books.google.ru/books
65. Milad Sharif and Joseph M. Kahn. Variable-Bandwidth Superchannels Using Synchronized Colorless Transceivers// Journal of Lightwave Technology, VOL. 32, NO. 10, MAY 15, 2014, pp.1921-1929.
66. Новиков А.Г., Чирков В.С., Леонов А.В. и др. 10-кратное увеличение пропускной способности DWDM-линий связи// Фотон-экспресс, 2013, №7.-С.25-27.
67. P. Mitchellab, R. Longonea, A. Janssena, B. Garretta and J. K. Luob. Evaluation of an InP Mach-Zehnder modulator for high speed optical network system architectures and emerging photonicallly integrated optical Modules// Journal of Optoelectronics and Advanced Materials Vol. 12, No. 5, May 2010, p. 965 – 975
68. Shinji Mino, Hiroshi Yamazaki, Takashi Goh, Takashi Yamada. Multilevel Optical Modulator Utilizing PLC-LiNbO3 Hybridintegration Technology// NTT Technical Review Vol. 9 No. 3 Mar. 2011.
69. René M. de Ridder and Chris G. H. Roeloffzen. Wavelength filter for fibre optics. http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F3-540-31770-8_10#page-1
70. OFC/NFOEC 2013 | OW1G.1 2013 NTT Photonics Laboratories. URL: <http://www.lambdasys.com/product/LEOK-25.htm>
71. Hiroshi Yamazaki, Takashi Yamada, Takashi Goh, and Akimasa Kaneko. PDM-QPSK Modulator With a Hybrid Configuration of Silica PLCs and LiNbO Phase

Modulators// Journal of Lightwave Technology, VOL. 29, NO. 5, MARCH 1, 2011. P. 721-727.

72. *Christopher Richard Doerr and Katsunari Okamoto*. Advances in Silica Planar Lightwave Circuits// Journal of Lightwave Technology, VOL. 24, NO. 12, DECEMBER 2006. Pp. 4763-4789.

73. *Koichi Murata, Takashi Saida, Kimikazu Sano*. 100-Gbit/s PDM-QPSK coherent receiver with wide dynamic range and excellent commonmode rejection ratio// OPTICS EXPRESS, №26, 12 December 2011.

74. *Annachiara Pagano, Emilio Riccardi, Marco Bertolini, Vitaliano Farelli, and Tony Van De Velde*. 400 Gb/s Real-Time Trial Using Rate-Adaptive Transponders for Next-Generation Flexible-Grid Networks// Journal of Optical Communications and Networking, Vol. 7, Issue 1, pp. A52-A58 (2015)

75. *Louay Eldada*. ROADM Architectures and Technologies for Agile Optical Networks// http://www.photonateck.com/upfile/2014/05/27/20140527165703_242.pdf

76. *Eduardo C. Magalhães, Marcelo R. Nascimento, Vinícius G. de Oliveira*. Node Architectures for Next Generation ROADMs: A comparative study among emergent optical solutions// Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 12, No. SI-2, July 2013. Pp. 156-166.

77. *A. Beling, H.-G. Bach, R. Kunkel, G. G. Mekonnen, and D. Schmidt*. InP-Based 1.55 μm High-Speed Photodetectors for 80 Gbit/s Systems and Beyond/ /ICTON/PICAW 2005, Fraunhofer Institute for Telecommunications. URL: <http://icton.ccaba.upc.edu/icton/Presentations/Tu B2 4 Beling.PDF>

78. *Pierluigi Poggiolini, Andrea Carena, Vittorio Curri, Gabriella Bosco, Fabrizio Forghieri*. Analytical Modeling of Nonlinear Propagation in Uncompensated Optical Transmission Links// IEEE Photonics Technology letters. 2011. Vol. 23, No. 11. P. 742 – 744.

79. *Bosco Gabriella, Carena Andrea, Curri Vittorio*. Performance limits of nyquist-WDM and CO-OFDM in High-Speed PM-QPSK System// IEEE Photonics Technology letters. 2010. Vol. 22, No. 15. P.1129-1131.

80. *P.J. Winzer, A.H. Gnauck, C.R. Doerr, M. Magarini, L.L. Buhl*. Spectrally Efficient Long-Haul Optical Networking Using 112-Gb/s Polarization-Multiplexed 16-QAM// J. Lightw. Technol. 2010. Vol. 28, No. 4. P. 547–556.

81. *G. Bosco, V. Curri, A. Carena, P. Poggiolini, F. Forghieri*. On the Performance of Nyquist-WDM Terabit Superchannels Based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM Subcarriers/ // J. Lightw. Technol. 2011. Vol. 29, Iss. 1. P. 53–61.

82. *Wei-Ren Peng, Itsuro Morita, Hidenori Takahashi, and Takehiro Tsuritani*. Transmission of High-Speed (Gb/s) Direct-Detection Optical OFDM Superchannel// Journal of Lightwave Technology, VOL. 30, NO. 12, JUNE 15, 2012 2025

83. *Savory S. J.* Digital filters for coherent optical receivers // Optics Express. 2005. Vol. 16, Iss. 2. P. 804-817.

84. *Kikuchi K., Fukase M., Kim S.-Y.* Electronic post-compensation for nonlinear phase noise in a 1000-km20-Gbit/s optical QPSK transmission system using the homodyne

receiver with digital signal processing // Optics Express, - 2011. Vol. 19, Iss. 26. P. B862-B867

85. Kikuchi, K. Polarization de-multiplexing algorithm in the digital coherent receiver // IEEE/LEOS Summer Topical Meetings. 2008. Vol., No.5. P.101-102

86. J. G. Proakis. Digital Communications, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

87. Фокин В.Г. Когерентные оптические сети: учебное пособие. Новосибирск, ФГБОУ ВПО СибГУТИ, 2015. -371с.

88. Леонов А., Наний О., Трещиков В. Нелинейные искажения и нелинейный шум в когерентных системах связи// Первая миля. 2014. №4. С. 50-55.

89 Qiao Yao-Jun, Liu Xue-Jun, and Ji Yue-Feng. Joint nonlinearity and chromatic dispersion pre-compensation for coherent optical orthogonal frequency-division multiplexing systems// Chin. Phys. B Vol. 20, No. 11 ,2011. http://iopscience.iop.org/1674-1056/20/11/114212/pdf/cpb_20_11_114212.pdf.

90. O. Gerstel; M. Jinno; A. Lord, S. J. B. Yoo. "Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?," *Communications Magazine, IEEE* , vol.50, no.2, pp.s12, s20, February 2012

91. A. Klekamp, R. Dischler, and F. Buchali. "Limits of Spectral Efficiency and Transmission Reach of Optical-OFDM Superchannels for Adaptive Networks", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 20, pp. 1526-1528, Oct.15, 2011.

92. Alcatel-Lucent and BT achieve fastest real-world fiber speeds of 1.4Tb/s with a world record spectral efficiency of 5.7b/s/Hz over core network. URL: <http://www.alcatel-lucent.com/press/2014/alcatel-lucent-and-bt-achieve-fastest-real-world-fiber-speeds-14tbs-world-record-spectral>.

93. Christina (Tanya) Politi*, Chris Matrakidis, Theofanis Orphanoudakis, Vassilios Anagnostopoulos, Alexandros Stavdas. Planning and Operation of Elastic Flex-grid Optical Networks with OFDM Variable Bandwidth Capabilities. URL: <https://www.deepdyve.com/lp/institute-of-electrical-and-electronics-engineers/planning-and-operation-of-elastic-flex-grid-optical-networks-with-ofdm-4zokIav7Uz>.

94. R. Slavík, S.G. Farwell, M.J. Wale, and D.J. Richardson. Compact Optical Comb Generator using InP Tunable Laser and Push-pull Modulator// *Photonics Technology Letters*, January 15, №2.

95. Edson P. da Silva, Daniel M. Pataca, Stenio M. Ranzini, Luis H. H. de Carvalho, Antonio A. Juriollo, Marcelo L. Silva, Júlio C. R. F. Oliveira. 450 Gb/s CO-OFDM DP-QPSK Superchannels for Long-Haul Transmission with High Spectral Efficiency. <http://www.imoc2013.org/IMOC2013/proceedings/pdfs/116758.pdf>.

96. Larry A. Coldren Fred Kavli. Photonic Integrated Circuits as Key Enablers for Datacom, Telecom and Sensor Systems//CLEO 2014. URL: https://coldren.ece.ucsb.edu/sites/coldren.ece.ucsb.edu/files/publications/photonic_integrated_circuits_as_key_enablers_for_datacom.pdf.

97. Optical Fiber Telecommunications Volume VIB: Systems and Networks. Ред.: Ivan Kaminow, Tingye Li, Alan E. Willner , 2013. -1096p. URL:<https://books.google.ru/books?id=1tR2jc8hw6oC&pg=PA118&lpg=PA118&dq=Tbps+optical+super-channel+receiver&source>

98. *Jane M. Simmons* . Optical Network Design and Planning, 2nd edition . Springer, 2014 . 516 p.
99. *Xiang Zhou, Lynn E. Nelson*. 400G WDM Transmission on the 50 GHz Grid for Future Optical Networks//JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 30, NO. 24, DECEMBER 15, 2012. Pp.3779-3791.
100. *Yu-Ting Hsueh, Andrew Stark, Cheng Liu, Thomas Detwiler, Sorin Tibuleac, Mark Filer, Gee-Kung Chang, Fellow, and Stephen E. Ralph*. Passband Narrowing and Crosstalk Impairments in ROADM-Enabled 100G DWDM Networks// JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 30, NO. 24, DECEMBER 15, 2012. Pp.3980-3986.
101. *Rami Al-Dalky, Aly Elrefaie, Taha Landolsi, and Mohamed Hassan*. Performance Degradation of 100 Gb/s PM-QPSK and 400 Gb/s PM-16QAM Single Carrier and Dual Carrier Coherent Systems Due to Cascaded Optical Filters// Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences, 2013, Vol. 4.Special Issue ICCSII. URL: http://www.cisjournal.org/journalofcomputing/archive/vol4si/vol4SI_9.pdf
102. *Guoying Zhang, Marc De Leenheer, Annalisa Morea and Biswanath Mukherjee*. A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking//IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 15, NO. 1, FIRST QUARTER 2013. Pp.65-87.

*Владимир Григорьевич Фокин
Роман Захирович Ибрагимов*

**Оптические системы с терабитными и
петабитными скоростями передачи**

Учебное пособие

Редактор: Горлов Н.И.
Корректор:

Подписано в печать.....

Формат бкмаги 62×84 1/16, отпечатано на ризографе, шрифт №10,
Изд. л....., заказ №....., тираж 50, типография СибГУТИ.
630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86.