

Возможности и ограничения волоконно-оптических систем передачи

Лабораторно-практическое занятие.

Время изучения 2 часа

Цель работы, порядок выполнения и содержание

- Цель работы: изучить современные и перспективные решения для волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) с одноканальной и многоканальной организацией передачи сигналов DWDM в одномодовых стандартных волокнах SMF, многосердцевинных MCF и маломодовых FMF волокнах.
- Порядок выполнения:
 - изучить предлагаемые материалы;
 - ответить кратко по существу на контрольные вопросы;
 - решить задачи;
 - составить отчёт с выводами по проделанной работе.

Список литературы для самостоятельного изучения

- 1. Когерентные оптические сети [Электронный ресурс] : учеб. пособие / [Фокин, В. Г.](#) *Когерентные оптические сети.*[Текст]: учебное пособие, СибГУТИ, 2015. 371с. Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. - Новосибирск : СибГУТИ, 2015. - 371 с. : ил. - Библиогр.: с. 356-364.
- 2. Оптические мультиплексоры OADM/ROADM и коммутаторы PXC в мультисервисной транспортной сети [Электронный ресурс] : учеб. пособие / [Фокин, В. Г.](#) [Текст]: учебное пособие, СибГУТИ, Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. - Новосибирск: [б. и.], 2011. - 204с.
- 3. [Фокин, В. Г.](#) , Ибрагимов Р.З. Оптические системы с терабитными и петабитными скоростями передачи.[Текст]: учебное пособие, СибГУТИ, 2016. -162с.
- 4. Фокин В.Г., Ибрагимов Р.З. Гибкие транспортные сети [Электронный ресурс] : учеб. пособие, СибГУТИ, 2020. - 219с.

Содержание отчёта

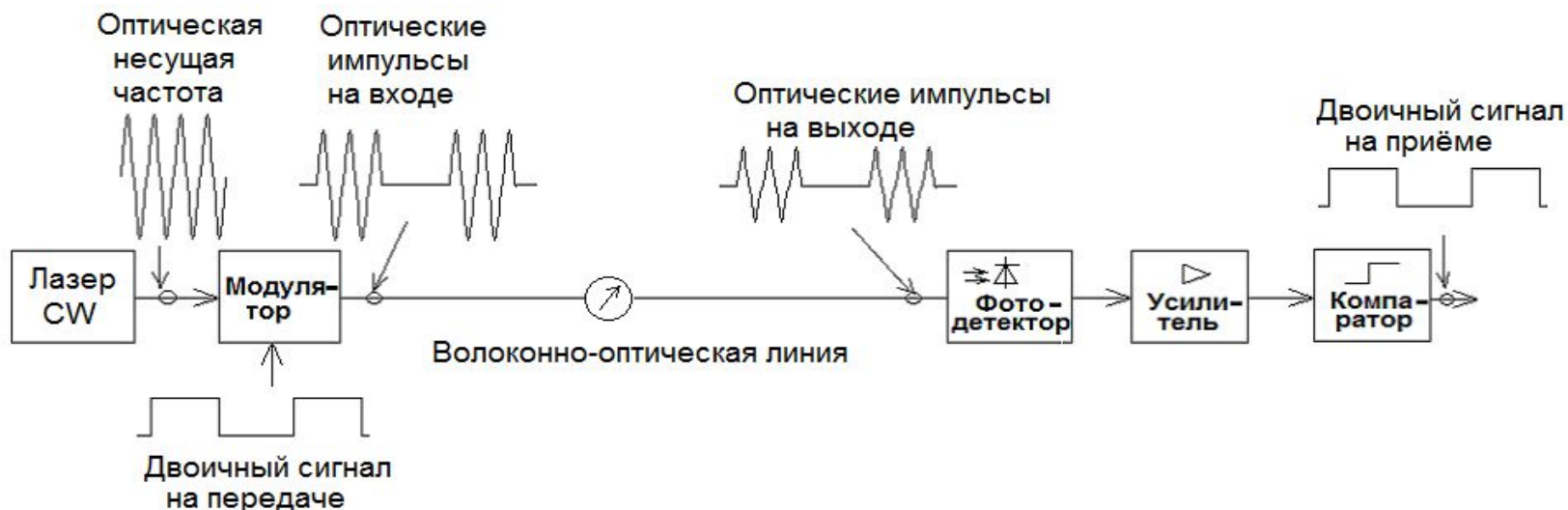
- 1. Название работы. Ф.И.О. исполнителя с подписью. Руководитель занятия. Дата выполнения.
- 2. Цель занятия.
- 3. Содержание занятия с перечнем изучаемых разделов.
- 4. Краткие ответы на контрольные вопросы.
- 5. Решение задач и выводы по результатам выполнения работы.

ВВЕДЕНИЕ

- Весь ход развития оптических систем передачи последних лет связан с тремя тенденциями:
- *совершенствование характеристик существующих волокон для расширения полосы передачи, применения новых конструкций волокон с возможностью передачи сигналов с повышенными уровнями мощности, 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 (Dense Wavelength Division Multiplexing) (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), 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.

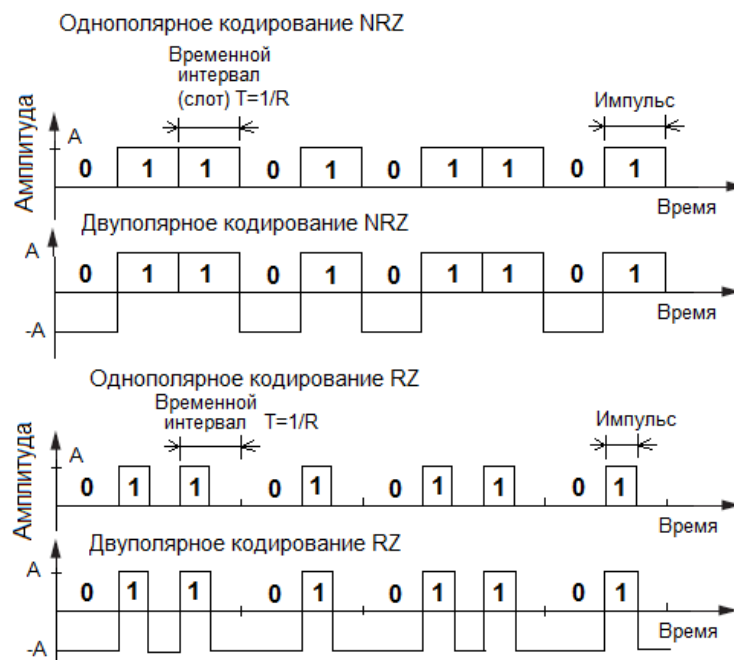
1. Информационные сигналы и волоконно-оптическая среда для их передачи

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



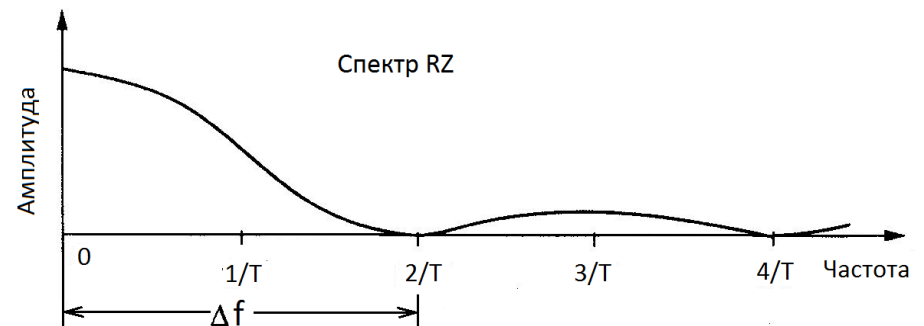
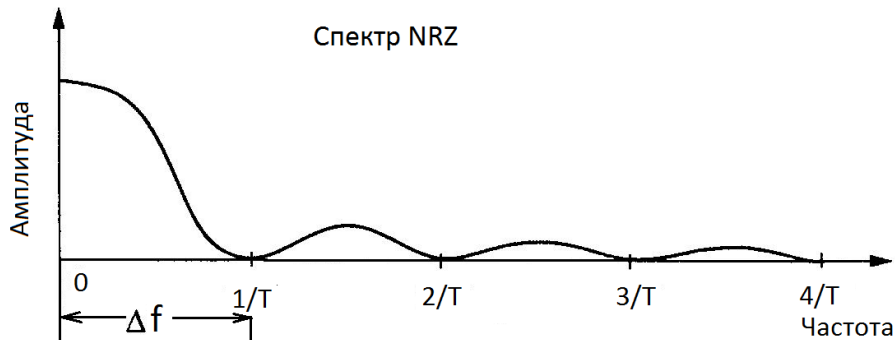
1. Информационные сигналы и волоконно-оптическая среда для их передачи

- Форма представления информационных импульсных посылок может быть в одном из двух вариантов, в одной или двух полярностях (рис.1.2). 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%.
- *Рис. 1.2.* Форматы кодирования информационных импульсных последовательностей в двоичном представлении



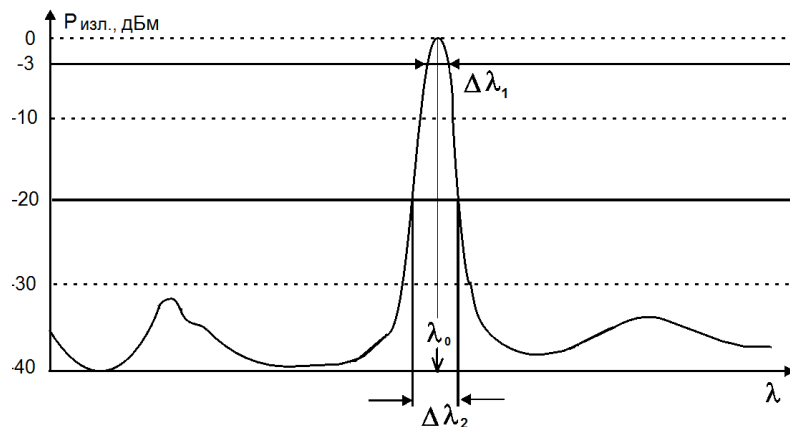
1. Информационные сигналы и волоконно-оптическая среда для их передачи

- Спектральные характеристики сигналов в этих форматах имеют существенные отличия по спектральной плотности мощности компонент (рис.1.3). 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 $\Delta f_{NRZ} = 1/T$, для формата RZ 50% эта полоса составит $\Delta f_{RZ} = 2/T$, т.е. спектр расширяется в два раза.
- Рис. 1.3.* Спектральная плотность мощности двоичных последовательностей в форматах RZ, NRZ



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

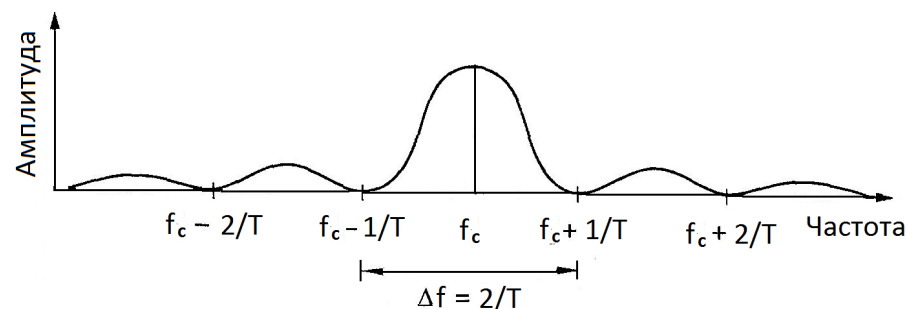
- С модуляции информационным сигналом оптической несущей частоты начинается формирование оптического линейного сигнала, ширина спектра которого зависит от ширины спектра излучения источника (светодиода или лазера) и от спектра модулирующего сигнала. Учитывая, что максимальная эффективность использования 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. Достижимые скорости передачи информации двоичными посылками в современных технологиях, например, OTN/OTN 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.
- Рис. 1.4. Оценка ширины спектральной линии источника излучения. Рис. 1.5. Оптический спектр модулированного сигнала NRZ



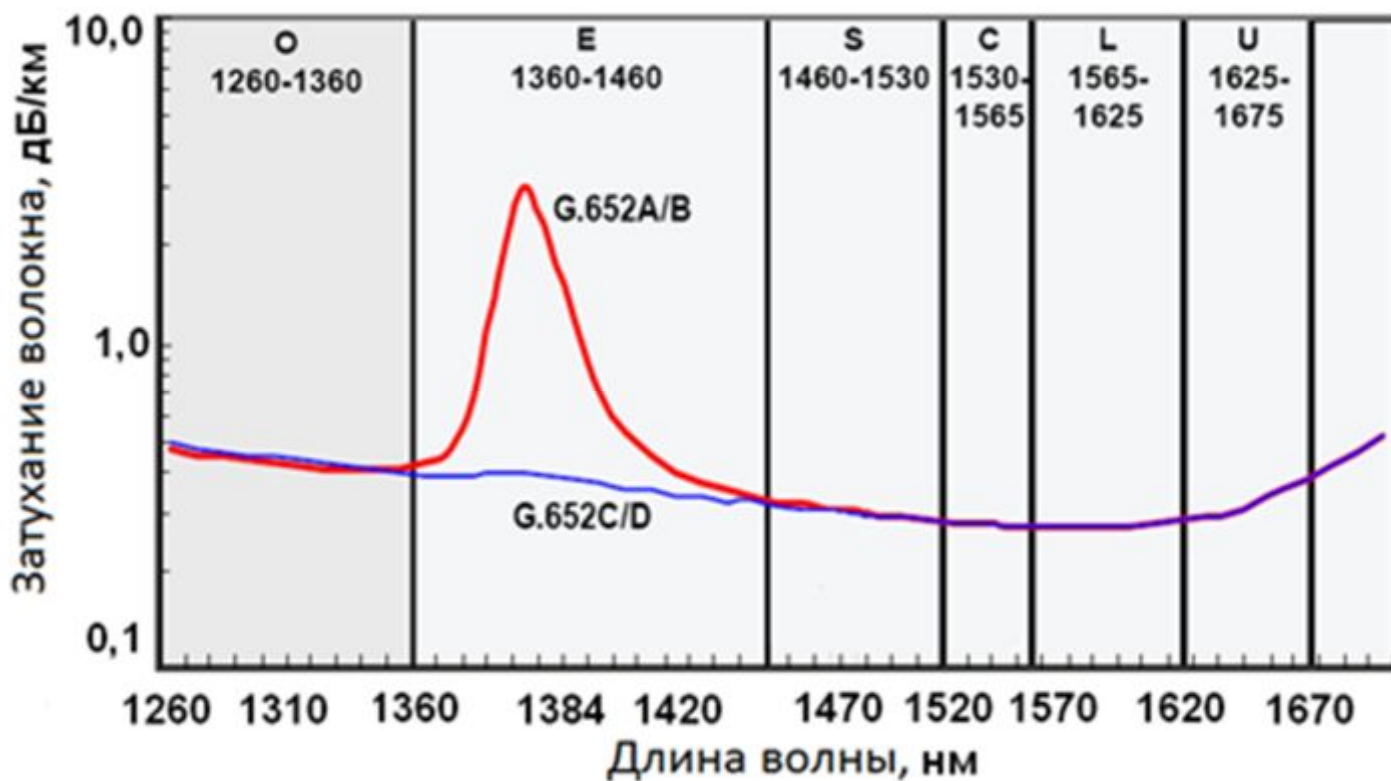
$\Delta\lambda_1$ - максимальная ширина спектра на уровне -3 дБм (половина мощности)

$\Delta\lambda_2$ - максимальная ширина спектра на уровне -20 дБм

λ_0 - центр моды



Затухание оптического волокна стандарта ITU-T G.652 (a,b,c,d) и оптические диапазоны волн для систем передачи



Число спектральных каналов в оптических диапазонах и ограничения по скорости

- Оценка числа спектральных каналов в каждом из оптических волновых диапазонов приведена в табл.1.1. 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 O, E, S, C, 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. 1.1. Ёмкость спектральных диапазонов одномодовых волокон для сигналов в формате NRZ

Диапазон	Полоса частот, ТГц	Число спектральных каналов в сетке волн					Ёмкость Тбит/с
		12,5 ГГц	25 ГГц	50 ГГц	100 ГГц	230 ГГц	
O	17,42	1393	696	348	174	75	8,4
E	15,0	1200	600	300	150	65	7,28
S	9,4	752	376	188	94	40	4,48
C	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

Как эффективнее использовать оптические диапазоны и весь рабочий спектр волокна?

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

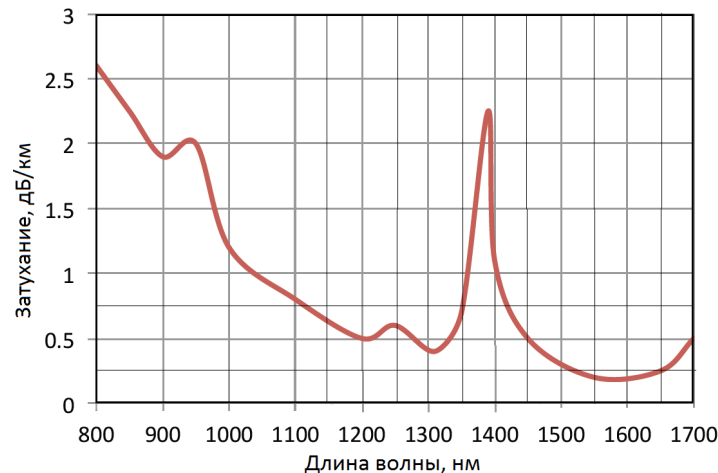


Рис. 1.7. Характеристика затухания стекловолокна

Дисперсионные и нелинейные ограничения волоконных световодов

- 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.

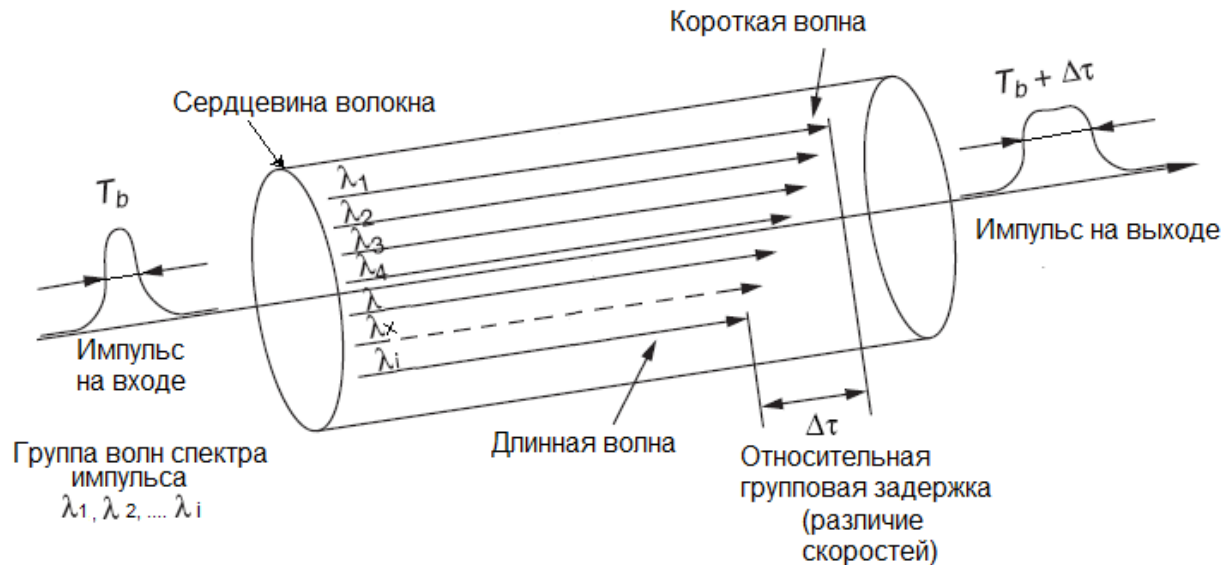


Рис. 1.8. Различие скоростей распространения спектральных компонент оптических импульсов в одномодовом волокне

Дисперсионное расширение импульса и штраф за снижение оптической мощности

- 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, учитываемых в расчётах оптических интерфейсов.

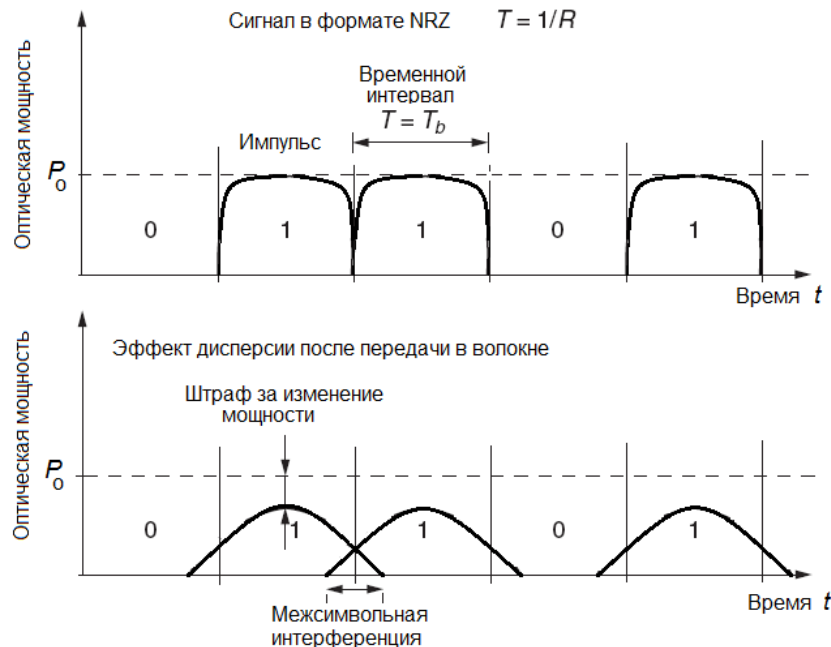


Рис. 1.9. Межсимвольная интерференция, вызванная дисперсией волокна

Учитываемые виды дисперсии

- 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

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

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

Хроматическая дисперсия

- 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

$$M(\lambda) = \frac{\lambda}{C} \frac{d^2 n}{d^2 \lambda}$$

- и получается материальная дисперсия $\Delta\tau = \tau_m = -L\Delta\lambda M(\lambda)$.

- Аналогично определяется волноводная дисперсия: $\tau_B = L\Delta\lambda B(\lambda)$,

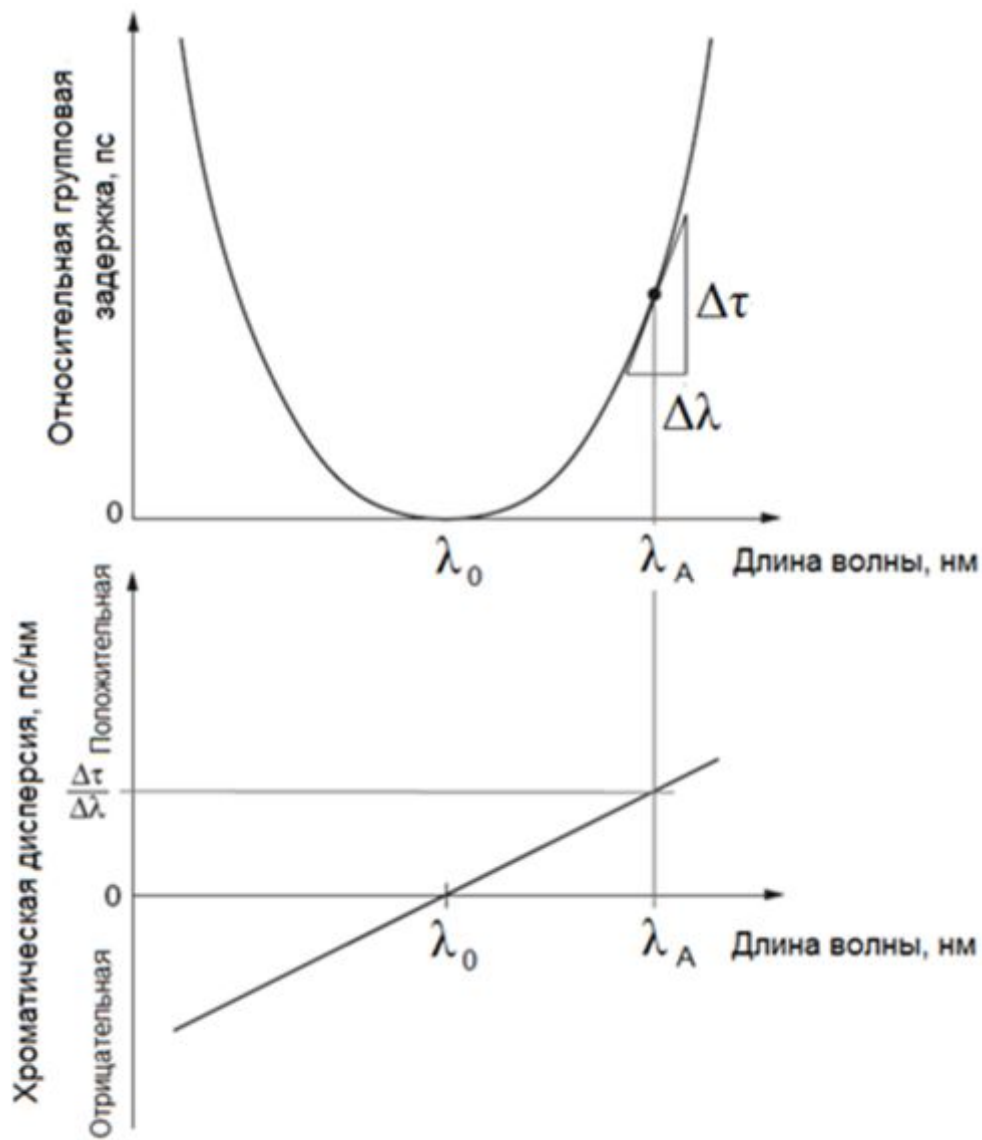
где коэффициент удельной волноводной дисперсии $B(\lambda) = \frac{2n_1^2 \Delta}{C\lambda}$,

- Δ – разность показателей преломления, n_1 показатель преломления сердцевины волокна, λ – длина волны, C скорость света в вакууме. Результирующая (хроматическая) дисперсия представляет собой сумму

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

- 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 $\lambda_0=1310$ нм.

Рис. 1.10. Относительная групповая задержка и хроматическая дисперсия



Характеристики дисперсии стандартных волокон

- Связь между шириной спектра сигнала и величиной групповой задержки нормируются для каждого типа волокна удельной относительной величиной
- и наклоном характеристики дисперсии (пример на рис.1.10 для волны λ_A). Типовыми являются показатели хроматической дисперсии (ХД), например, для SMF G.652 величина дисперсии 17 пс/нм×км на волне 1550 нм, 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).

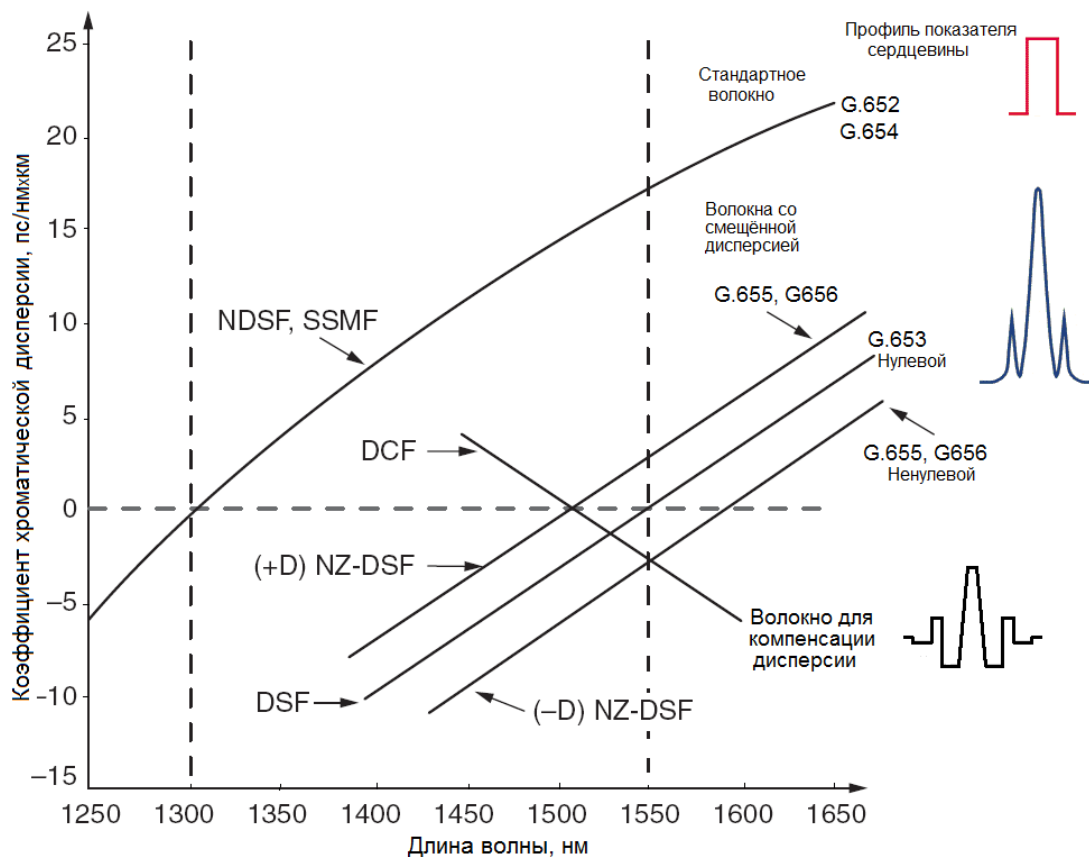


Рис. 1.11. Характеристики хроматической дисперсии стандартных волоконных световодов

Различие волокон по стандартам и дисперсионным характеристикам

- 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;
- CSF (Cut-off Shifted Fibre) по рекомендации ITU-T G.654 смещённая длина волны отсечки в волокне с минимизацией затухания на волне 1550 нм;
- 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.
- 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 нм – 1625 нм.

Дисперсия поляризованной моды (ПМД)

- Дисперсия поляризованных мод также характеризуется удельным коэффициентом, учитывающим статистическую среднеквадратическую зависимость, величина которой нормируется для конкретных волокон в стандартах. 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:

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

- Результирующая удельная дисперсия одномодовых волоконных световодов представляет собой сумму:

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

- 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.1.2 для хроматической дисперсии и табл. 1.3 для ПМД. Критерием оценки является коэффициент битовых ошибок (BER, bit error rate), величина которого не должна превышать на приёме 10^{-12} .
- Примеры волокон с характеристиками для организации связи на повышенные дистанции представлены в табл.1.4.

Роль дисперсии в ограничении для систем передачи

Табл. 1.2. 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	
		1 дБ	2 дБ	1 дБ	2 дБ
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. 1.3. 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

Волоконные световоды с минимальными значениями затухания

Табл. 1.4. Оптические волокна Corning для протяженных линий и высоких скоростей передачи

Средняя волна рабочего диапазона 1550 нм						
Тип волокна	Vascade EX3000 Fiber (G.654D)	Vascade EX2000 Fiber (G.654B)	Vascade EX1000 Fiber (G.654C)	Vascade LEAF EP Fiber (G.655)	Vascade L1000 Fiber (G. ?)	Vascade S1000 Fiber (G. ?) DCF
Описание волокон	Волокно с очень низкими потерями, очень большим полем моды и высокой положительной дисперсией	Волокно с очень низкими потерями, большим полем моды и высокой положительной дисперсией	Волокно с очень низкими потерями, высокой положительной дисперсией	Волокно с отрицательной дисперсией NZDSF, большим полем моды	Волокно с высокой положительной дисперсией, с большим полем моды	Волокно с высокой отрицательной дисперсией, с отрицат. наклоном характеристики дисперсии
Затухание, дБ/км	0,157	0,154	0,162	0,198	0,182	0,231
Эффективная площадь поля моды, мкм ²	150	112	76	65	100	27
Дисперсия, пс/нм×км	+20,9	+20,2	+18,5	-4,0	+18,5	-38,0
Наклон характеристики дисперсии, пс/нм ² ×км	+0,06	+0,06	+0,06	+0,12	+0,06	-0,12
ПМД, пс/км ^{0,5}	≤0,05	≤0,05	≤0,05	≤0,05	≤0,05	≤0,05

Учёт ограничений от ПМД

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

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

- где E доля битового интервала, на которую допускается изменение из-за ПМД при заданном коэффициенте ошибок. Например, для коэффициента ПМД $\tau_{\text{ПМД}} = 0,04$ пс/км² и $E = 0,1T_b$ 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 оптической передачи, обусловленные нелинейными эффектами ВОЛОКНА

- 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 :

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

- где $n_{\text{эфф}}(\lambda)$ показатель преломления сердцевины волокна при низком уровне мощности оптического излучения, γ коэффициент нелинейности (коэффициент Керра) для стекла от $2,0 \times 10^{-20}$ до $3,5 \times 10^{-20} \text{ м}^2/\text{Вт}$, P мощность оптического излучения в Вт, $A_{\text{эфф}}$ эффективная площадь сердцевины волокна в м^2 , которая может отличаться у различных волокон в несколько раз (см. табл.1.4). Нелинейная зависимость показателя преломления стекловолокна приводит к дополнительному снижению мощности оптического сигнала, передаваемой в линии (рис.1.12).

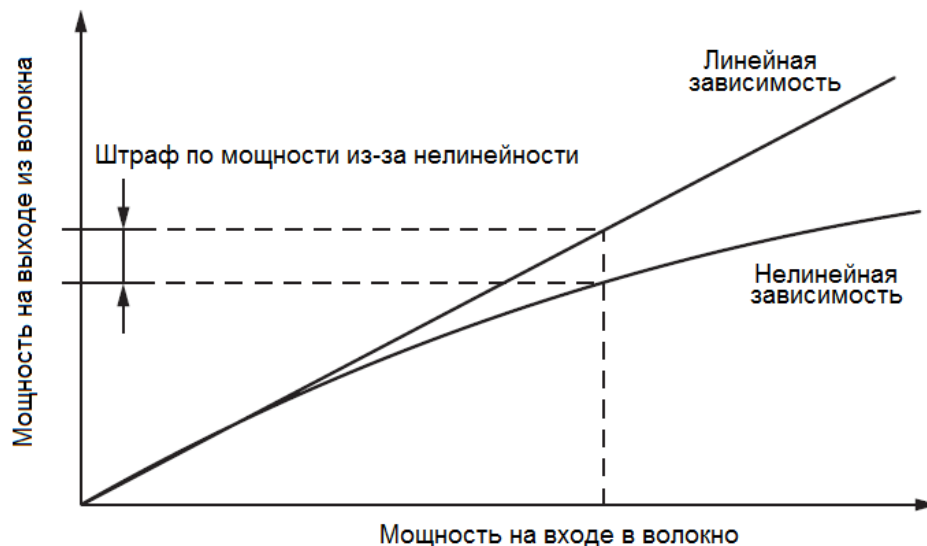


Рис. 1.12. Нелинейное свойство стекловолокна и оценочный показатель штрафа в системе

Роль нелинейных эффектов в ограничении передачи сигналов в волокне

- 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. 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.

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		
	200 ГГц	100 ГГц	50 ГГц
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

Роль нелинейных эффектов в ограничении передачи сигналов в волокне

- 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.*
- 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 представлены в табл.1.4.

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

Каналы DWDM		Коэффициент хроматической дисперсии		
Число каналов	Частотный интервал, ГГц	2 пс/нм×км	5 пс/нм×км	10 пс/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

2. Как повысить эффективность передачи оптических сигналов в волокнах?

- 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 1000 км на волокнах G.652 для волны 1550 нм совокупная хроматическая дисперсия составит около 18 000 пс/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 66 пс, 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.



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

Снижение роли дисперсии в оптическом канале электронной компенсацией

- Основным решением компенсации дисперсии в оптических каналах гибких оптических сетей с высокой скоростью передачи (от 100 Гбит/с и выше) служит применение цифровой обработки, принятого и преобразованного в электрический формат, каждого канального сигнала в системе DWDM средствами транспондеров (рис.2.2). 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 80 000 пс/нм (80 нс/нм), что при стандартном значении дисперсии SMF 18 пс/нм·км на волне 1550 нм позволяет организовать оптический канал на дистанции около 4,0 - 6,0 тысяч км без промежуточной обработки электронными средствами (усилителями, регенераторами), но с применением оптического усиления для компенсации затухания линии.

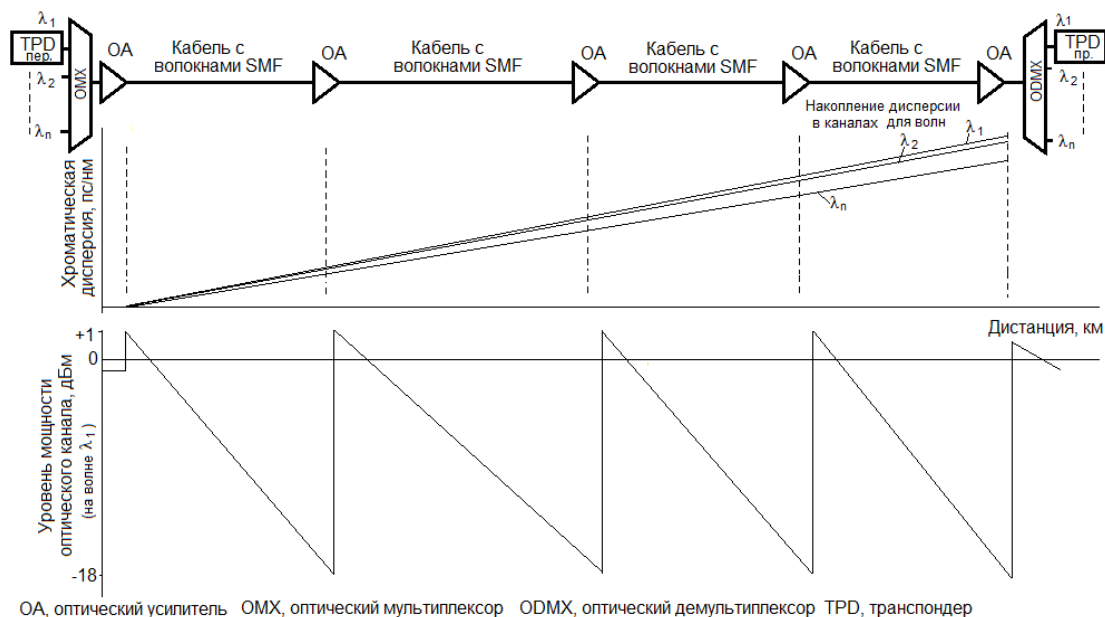


Рис. 2.2. Волоконно-оптическая линия с модулем обработки канального сигнала для компенсации дисперсии в приёмной части транспондера TPD_{пр}.

Применить когерентный приём сложных многоуровневых сигналов

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

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

- Например, 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). При этом выигрыш от применения гетеродина, 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 фотодетектора представлены алгоритмами:
- - 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}).

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

Применить упреждающую коррекцию ошибок FEC (forward error correction)

- К цифровой обработке относится и восстановление качества цифрового сигнала, соответствующего заданному коэффициенту ошибок не хуже 10^{-12} в оптических каналах сети OTN/OTN. Для этого в составе цифрового блока OTUk (Optical channel Transport Unit, транспортный блок оптического канала) (рис.2.3), где $k=1,2,3,4$ (в перспективе 5-й на 480 Гбит/с, 6-й на 1 - 2 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.2.4). 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 представлены в рекомендациях ITU-T G.709. Выигрыш от применения этого вида цифровой обработки имеет размерность энергетического потенциала (на примере, от 3 дБ до 9 дБ и до 12 дБ в зависимости от избыточности поля FEC от 7% до 20% и 30%).
- 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 подходящей спектральной эффективностью 6 - 8 бит/символ, обусловленной нелинейным пределом Шеннона (рис.2.5) и форматом кодирования.

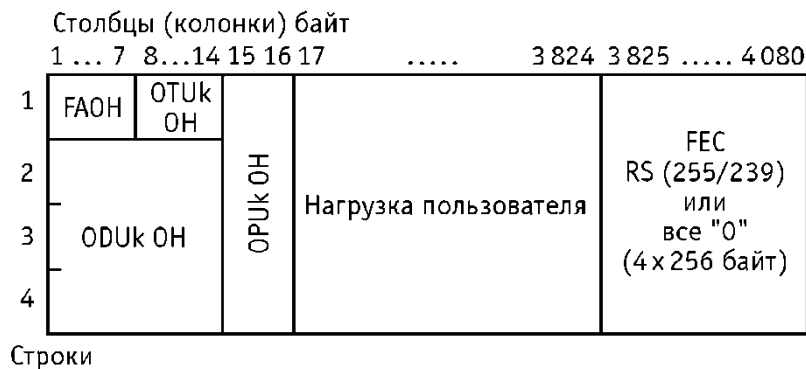


Рис. 2.3. Структура цифрового блока OTUk для передачи информационных данных в оптических каналах

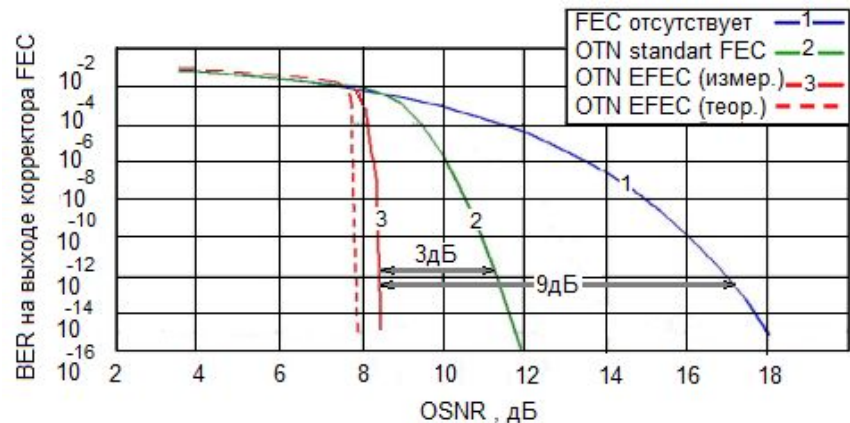


Рис. 2.4. Выигрыш от применения FEC в оптических каналах

Применить упреждающую коррекцию ошибок FEC

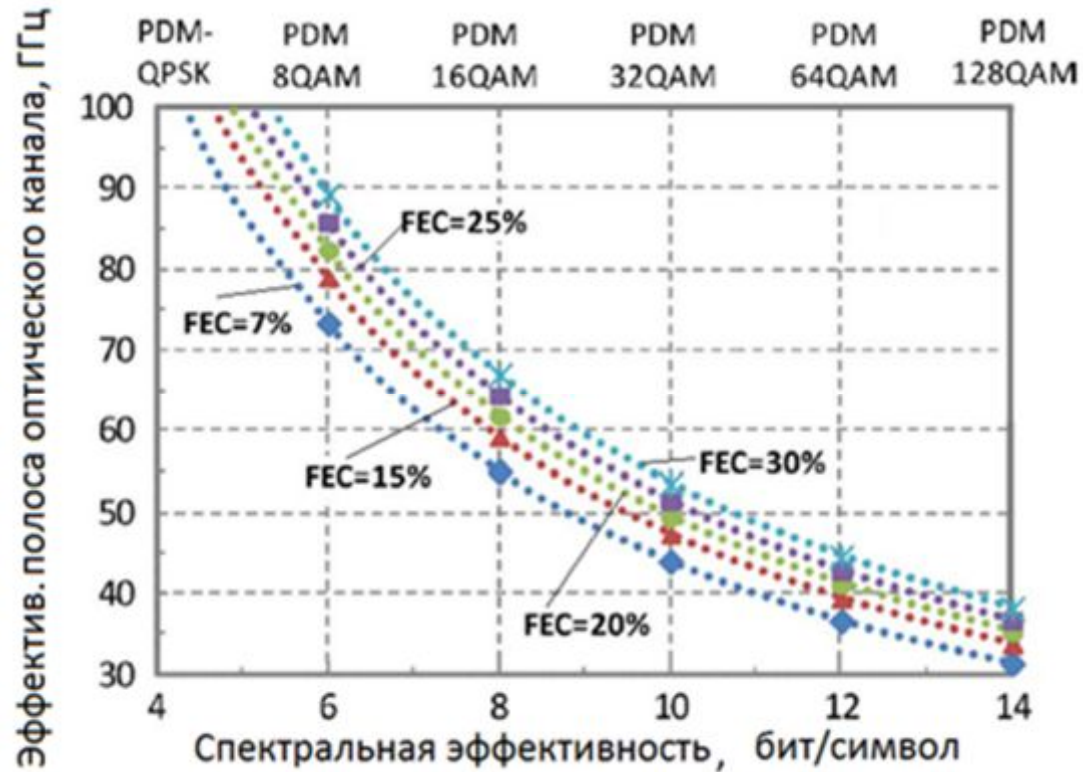


Рис. 2.5. Эффективность применения FEC для оптического канала 448-480 Гбит/с

Форматы кодирования и учёт нелинейного предела Шеннона

- Для поддержки нарастающих скоростей передачи в оптических каналах (от 40 Гбит/с на канал и до нескольких Тбит/с) разработаны и внедряются несколько видов форматов модуляции оптических несущих частот (рис.2.6), 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 модуляторах Маха-Зендера (MZM) и электронных компонентах логических кодеров. Электронными компонентами создаются необходимые уровни напряжений кодируемого сигнала и такты формирования оптических импульсов для управления несколькими MZM.

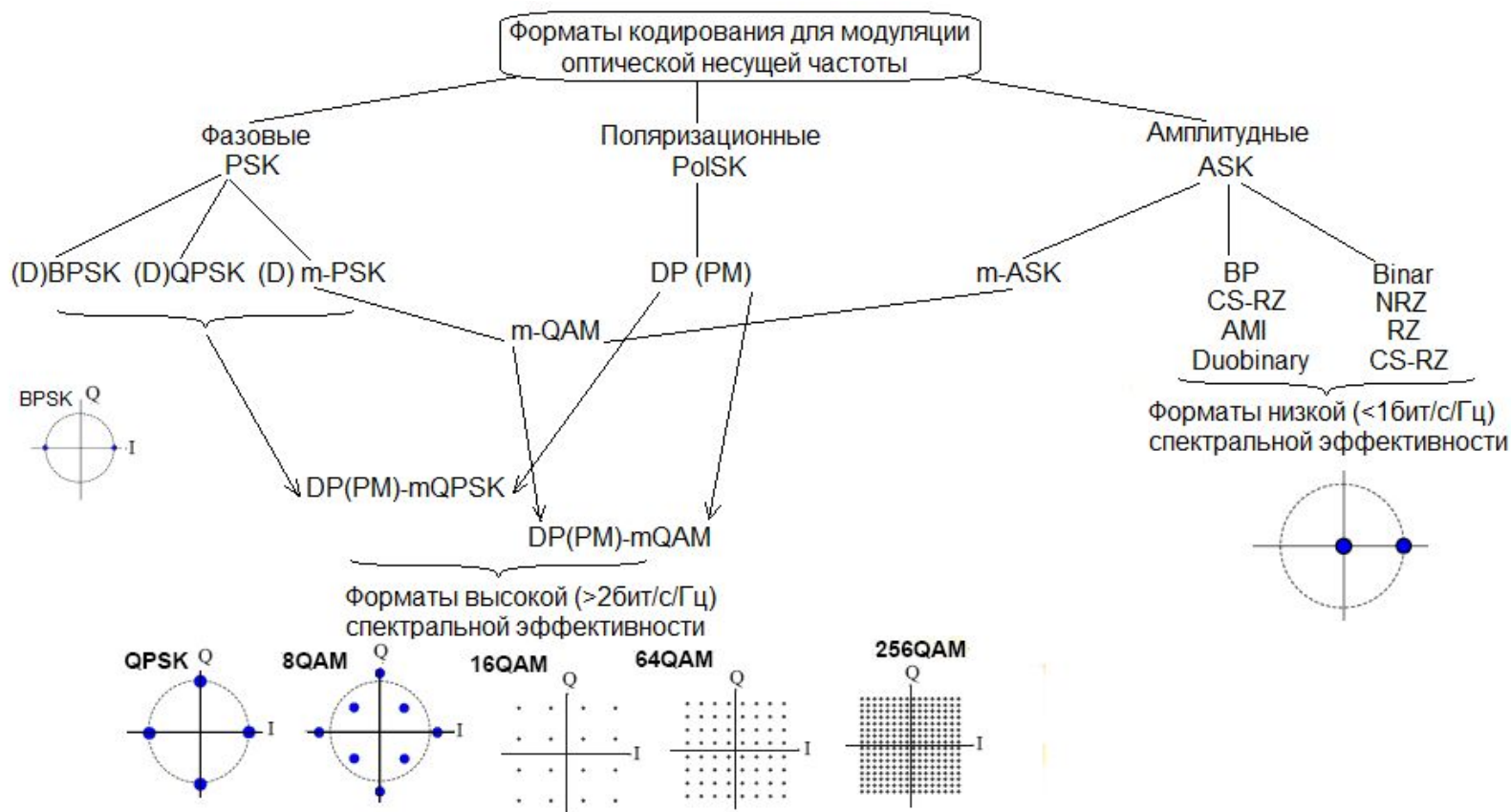


Рис. 2.6. Виды форматов модуляции для передачи в оптических каналах

Форматы кодирования и учёт нелинейного предела Шеннона

- 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 (решетчатое кодирование или TCM, trellis coded modulation), 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, PDM) - mPSK, DP(PM)-mQAM (m=4, 8, 16 и т.д.). Пример для сравнения форматов модуляции по спектрам представлен на рис.2.7. Видно, что формат модуляции может повысить спектральную эффективность с 2 бит/с/Гц до 4 бит/с/Гц с поляризационным мультиплексированием PM.

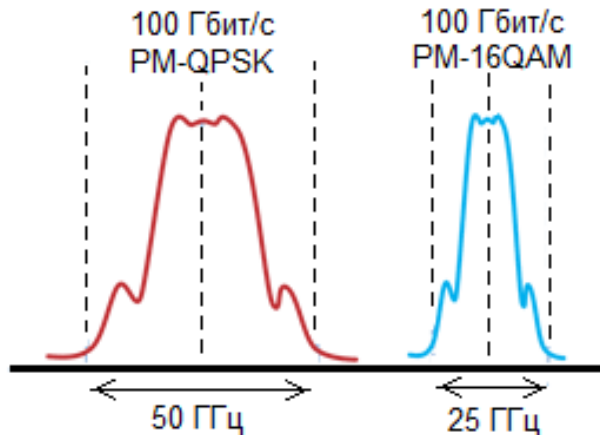


Рис.2.7. Спектры форматов оптической модуляции для цифрового сигнала 100 Гбит/с

Форматы кодирования и учёт нелинейного предела Шеннона

- 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

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad , \quad (2.2)$$

- 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.
- Пример взаимосвязи между теорией Шеннона (Shannon limit) и практическими результатами представлен на рис.2.8. 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 стекловолкна. Такой предел спектральной эффективности получил название «Нелинейный предел Шеннона». 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?

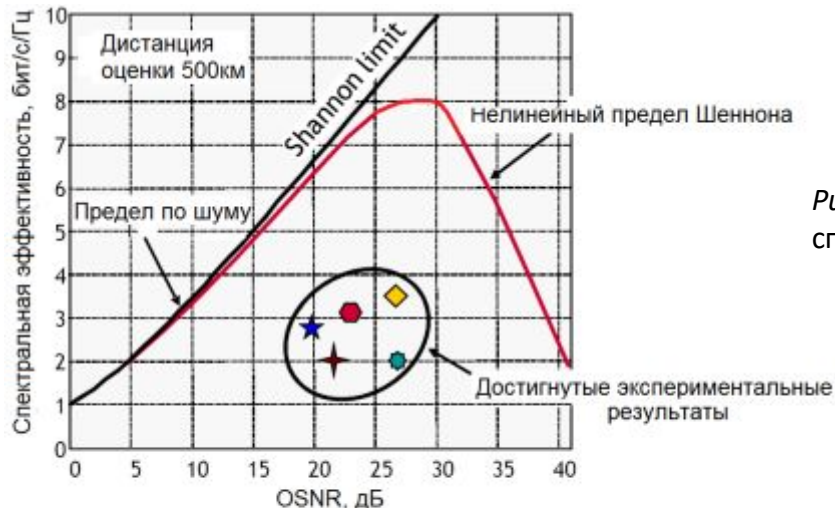


Рис. 2.8. Теоретический и экспериментальный пределы спектральной эффективности оптических систем

Форматы кодирования и учёт нелинейного предела Шеннона

- Известны несколько способов достижения высокой спектральной эффективности:
 - на протяженных секциях оптической передачи и мультиплексирования применять малошумные 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.) и m – PSK (рис.2.9);
 - применить формат плотного расположения поднесущих частот оптических каналов OFDM.
- 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.2.10, 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.

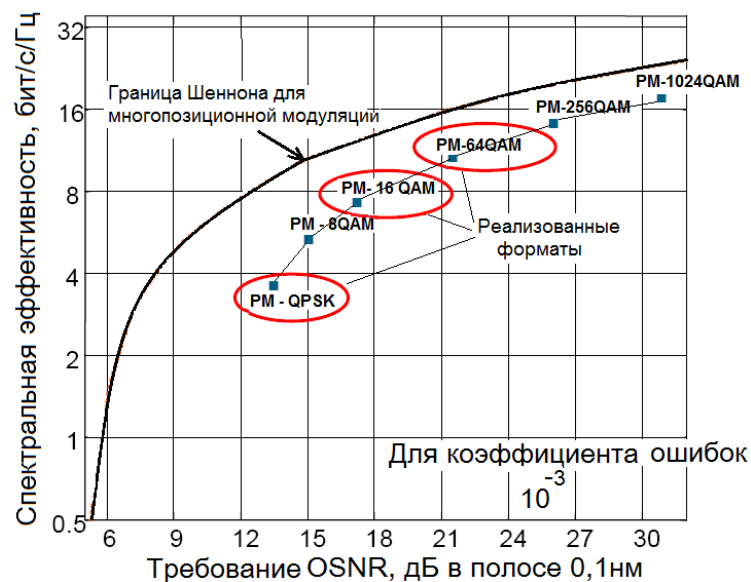


Рис. 2.9. Рост спектральной эффективности и требование по OSNR

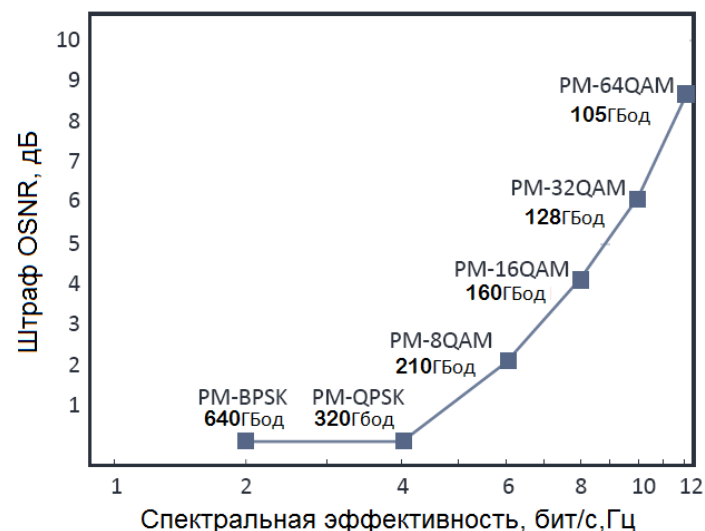


Рис. 2.10. Взаимосвязь спектральной эффективности и штрафа за ухудшение OSNR в оптическом канале с различными форматами модуляции на скорости 1 Тбит/с

Применить суперканальные решения

- Использование когерентного формата 100 Гбит/с DP QPSK со сверхплотным расположением каналов (6.5, 12.5, 25, 50 ГГц) позволяет увеличить пропускную способность одного волоконного соединения до 12–16 Тбит/с при использовании стандартного С-диапазона (1530-1565нм). Использование расширенного С-диапазона или одновременное использование С и L диапазонов позволяют довести суммарную емкость до 20–30 Тбит/с. Однако возрастание числа WDM каналов до нескольких сотен существенно усложняют управление сетью. Увеличение канальной скорости позволит уменьшить число каналов. Кроме того, канальные скорости 400 Гбит/с и 1 Тбит/с могут потребоваться в сетях с новым поколением TerabitEthernet. Увеличение канальной скорости при сохранении одной несущей наталкивается на проблему резкого уменьшения дальности передачи без регенерации (рис.2.11). Необходимость строительства дополнительных усилительных пунктов приводит к удорожанию систем связи.
- Оптимальным решением, позволяющим сохранить дальность передачи и увеличить канальную скорость, является использование множества несущих частот в одном объединенном канале, который принято называть *оптическим суперканалом*, схема формирования которого приведена на рис. 2.12

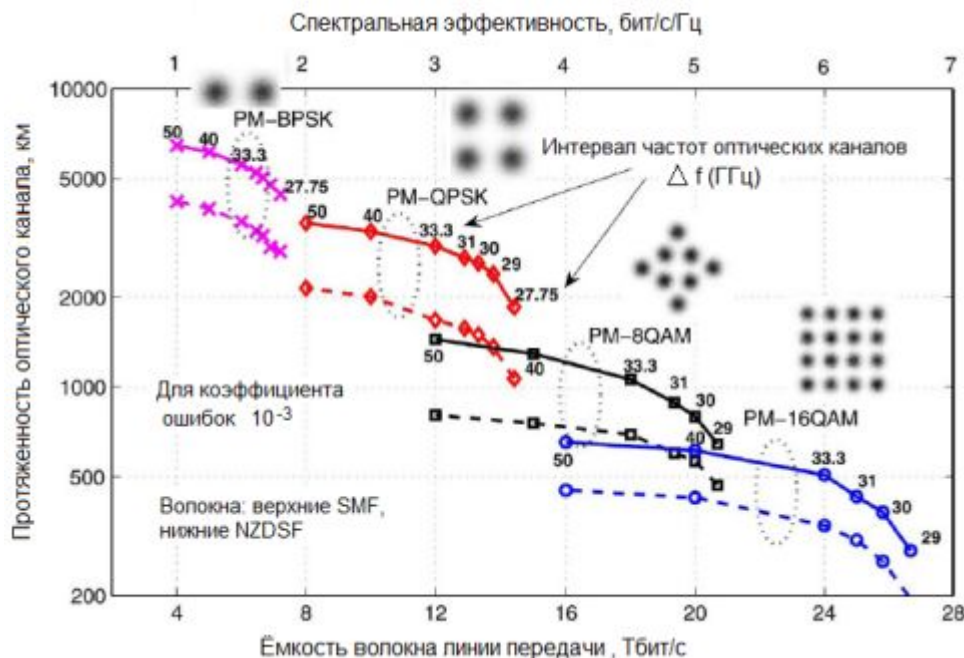


Рис. 2.11. Возможности по организации оптических когерентных каналов со скоростью 112 Гбит/с в системах с DWDM на различных волоконных линиях

Суперканальные решения

- Несущие частоты, относящиеся к одному каналу (рис.2.12), принято называть поднесущими частотами. Они формируются от одного лазерного источника оптической схемой нелинейной генерации. Разделенные демультиплексором поднесущие волны λ_1 - λ_n независимо модулируются. Поскольку наибольшей производительностью обладают системы связи на основе формата DP QPSK (входы модулятора I_1 - I_n , Q_1 - Q_n), то именно его целесообразно использовать в сочетании с одной из технологий передачи информации на многих поднесущих OFDM. Соседние поднесущие благодаря поляризации ортогональны, т. е. независимы, несмотря на частичное перекрытие спектров модулированных сигналов.
- Суперканал – это совокупность нескольких (порядка 10) очень плотно расположенных оптических каналов, которые обычно называют оптическими поднесущими (рис.2.13).

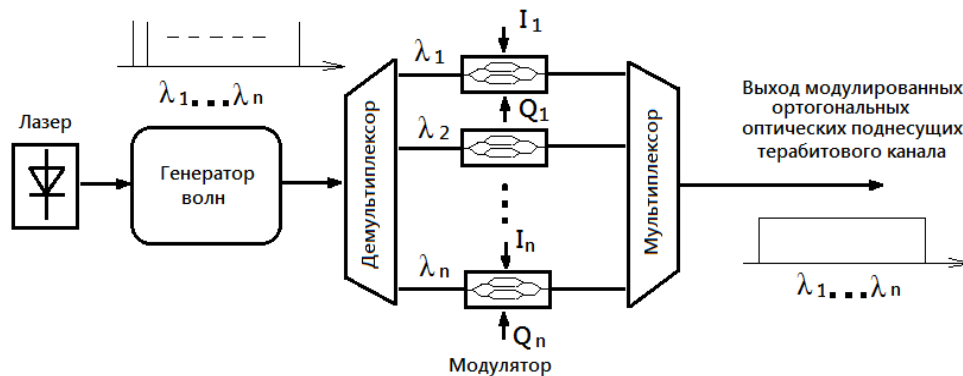


Рис. 2.12. Построение передатчика суперканала

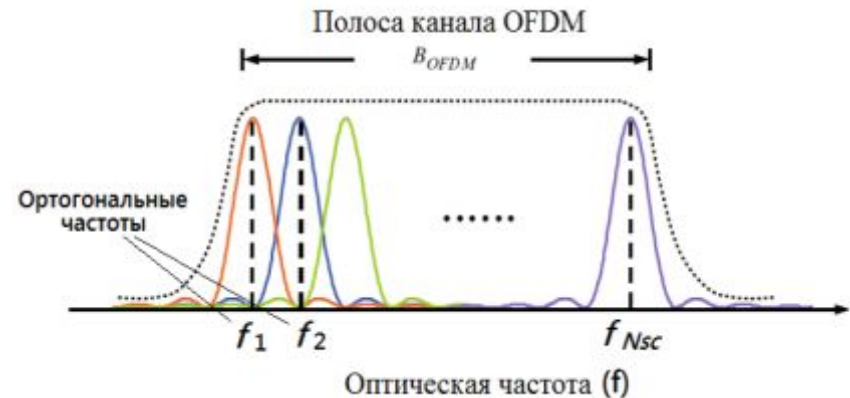


Рис. 2.13. Поднесущие частоты суперканала

3. Многосердцевинные и маломодовые волоконные световоды

- 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) (рис.3.1). 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) .
- При этом в сердцевине волокна можно добиться одномодового (single mode core) и маломодового (FMF, few mode fiber-core) режимов распространения оптических волн . Сохраняется возможность применения поляризационного мультимплексирования на каждой из оптических мод (рис.3.2).
- 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, FWF 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 (рис.3.3).

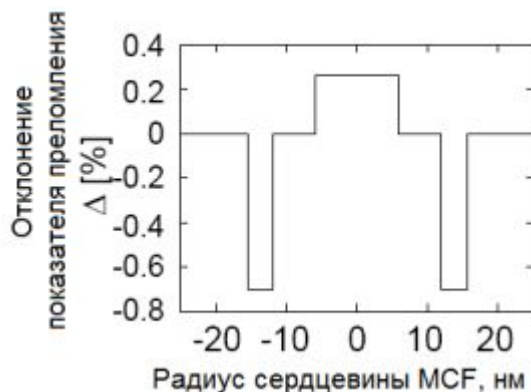
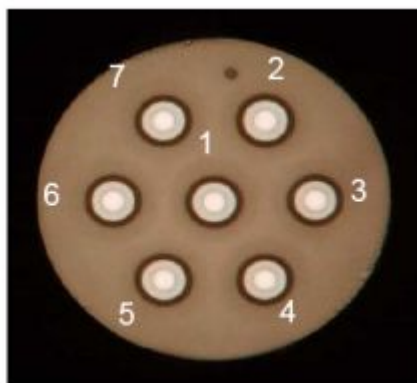


Рис. 3.1. Структура 7-ми сердцевинного волокна MCF и показателя преломления для одной сердцевины

Волокна типа FWF и MCF-FWF

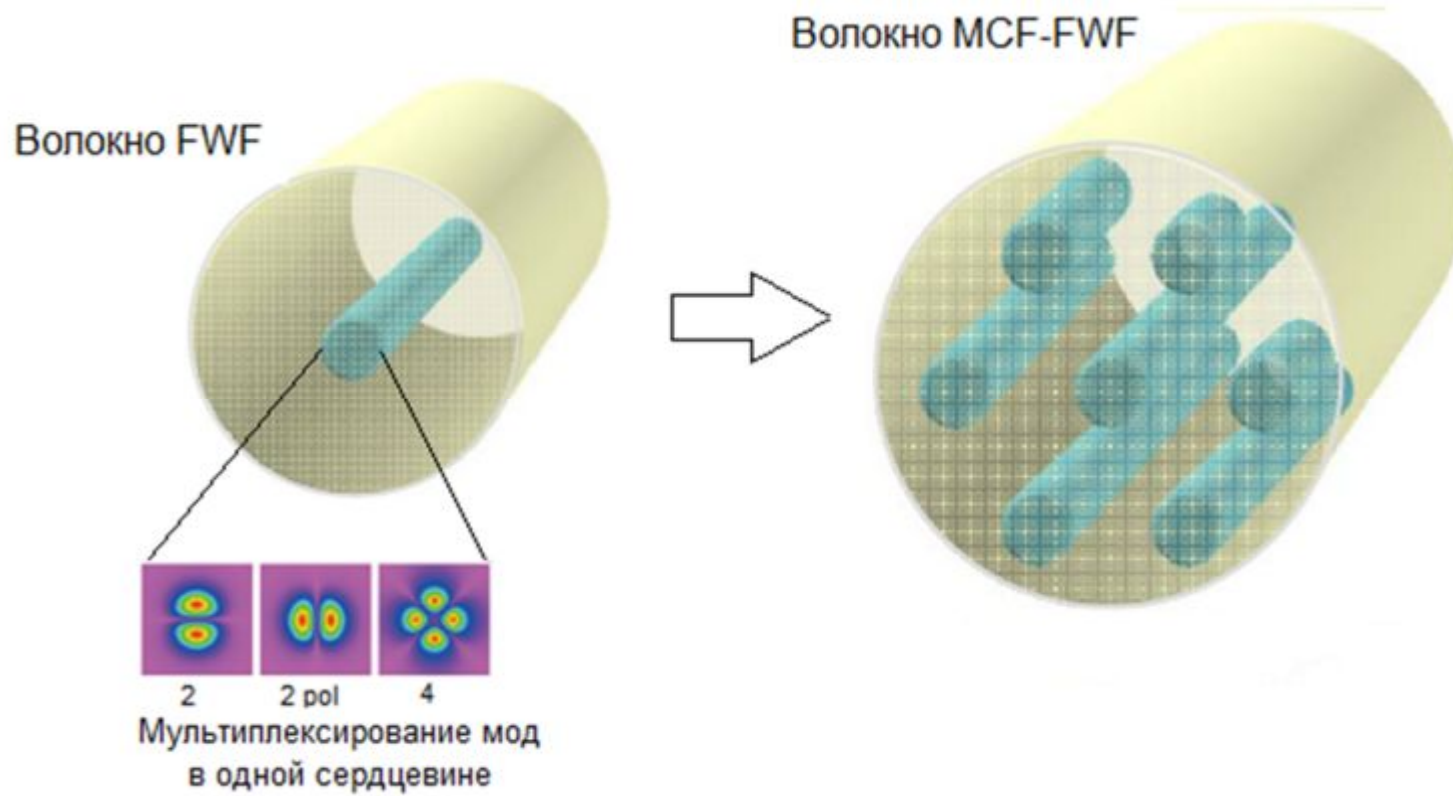
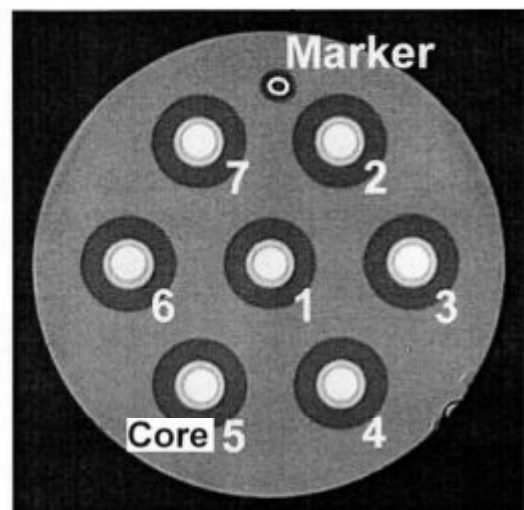


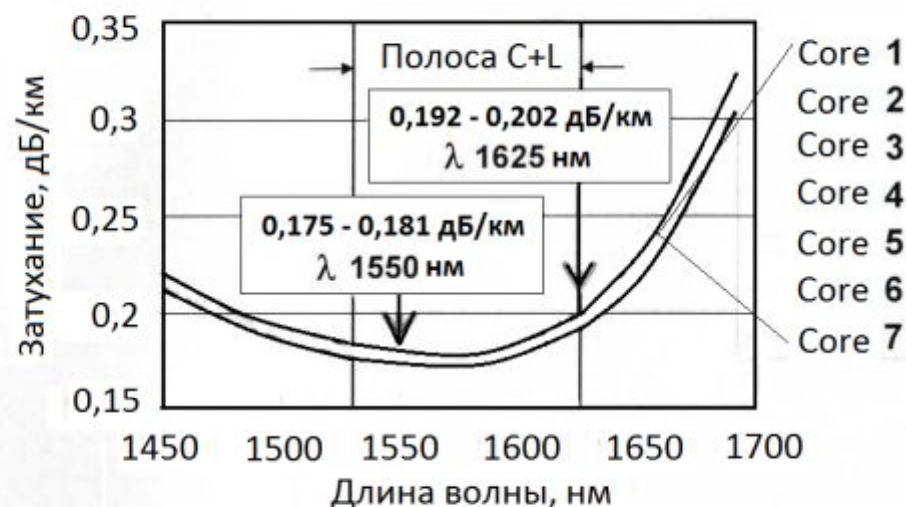
Рис. 3.2. Структура волокна FWF, мультиплексируемых мод и MCF-FWF/M

Характеристики одномодовых MCF

MCF в разрезе, диаметр 150-200мкм



Технические характеристики MCF



Наименов.	Волна отсечки $\lambda_{\text{сс}}$, нм	Поле моды, нм	Площадь моды, $A_{\text{эфф}}$ мкм ²	ХД, пс/нм × км	Наклон ХД, пс/нм ² × км	ПМД, пс/√км	Потери на изгибе, R=5мм, дБ/виток
λ , нм		1550				C+L	1625
Мин.	1483	9.72	78.2	22.1	0.062	0.044	0.019
Макс.	1509	9.88	81.3	22.2		0.205	0.022

Рис. 3.3. Конструкция и характеристики MCF с 7 одномодовыми оптическими сердцевинами

Конструктивное оформление волокон MCF, FMF

- Сердцевины волокон типа *coupled*, как правило, имеют определённую конфигурацию, например, гексагональную пакетную структуру HCPS (hexagonal close-packed structure), однокольцевую структуру ORS (one ring structure) (рис.3.4, 3.5).
- Сердцевины типа *uncoupled*, как правило, имеют изменчивую конфигурацию, например, с двумя кольцами сердцевин TPS (two-pitch structure) (рис.3.5).

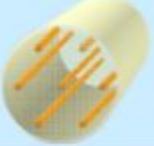
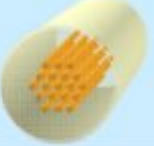
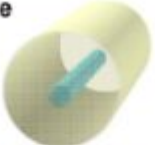
Single-Core Fiber (SCF)	Multi-Core Fiber (MCF)	
	Uncoupled MCF	Coupled MCF
Single-Mode (SM) 		
Few-Mode (FM) 		
Multi-Mode (MM) 		

Рис. 3.4. Типы волокон MCF пакетной структуры

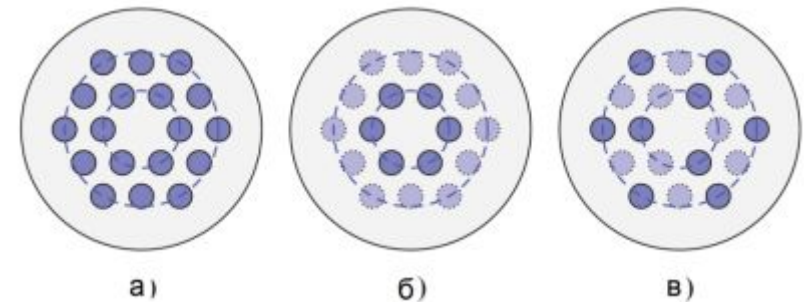


Рис. 3.5. Примеры конструкций волокон MCF радиально-кольцевой структуры с однонаправленной (а) и двунаправленной передачей сигналов перемещением колец (б) и перемещением в кольцах (в)

Конструктивное оформление волокон MCF, FMF

- 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. 3.5, 3.6) 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.

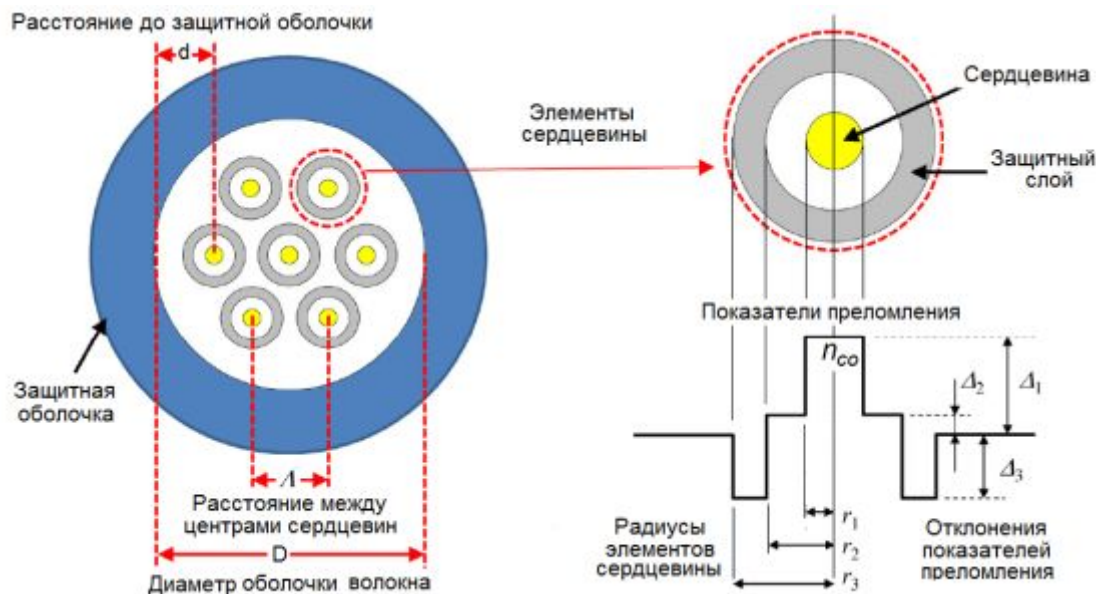


Рис. 3.6. Пример конструктивных элементов волокон MCF с 7 сердцевинами и их геометрические показатели

Практические характеристики MCF и взаимные влияния сердцевин

- Практические характеристики волокон MCF:
 - 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.
- Внутри любой пары рядом расположенных сердцевин с сонаправленной или противоположной передачей (рис.3.7) 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.

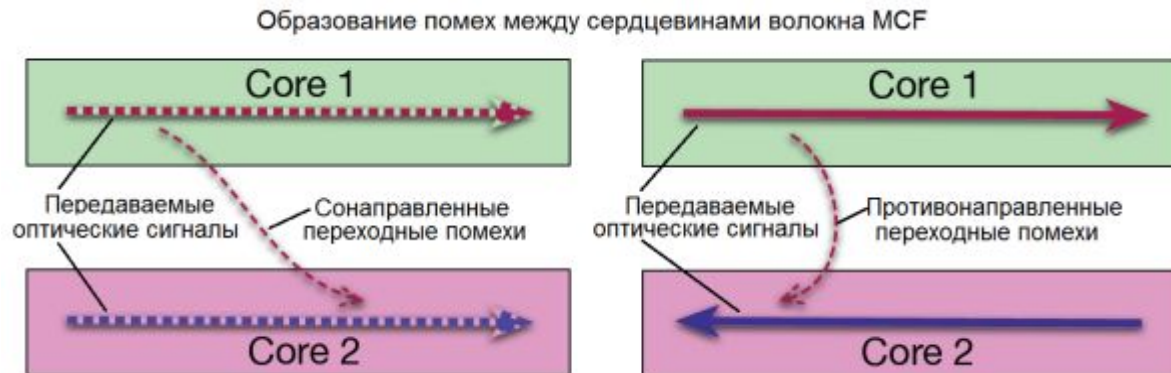


Рис. 3.7. Схемы переходных помех между сердцевинами MCF

Оценка взаимных влияний сердцевин

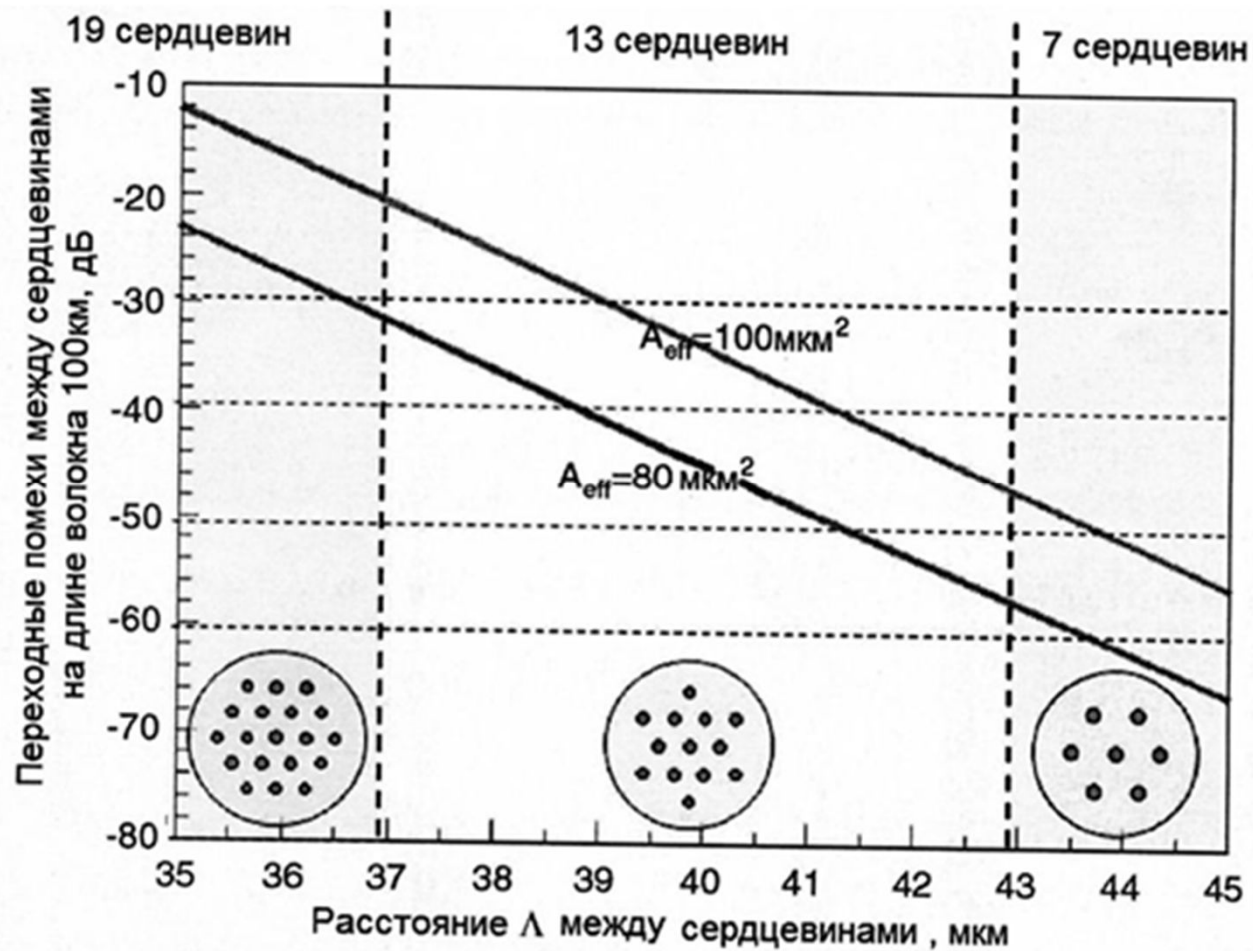


Рис. 3.8. Пример влияния конструктивных решений на величины переходных помех между сердцевинами MCF

Связь конструктивных и передаточных характеристик волокон MCF

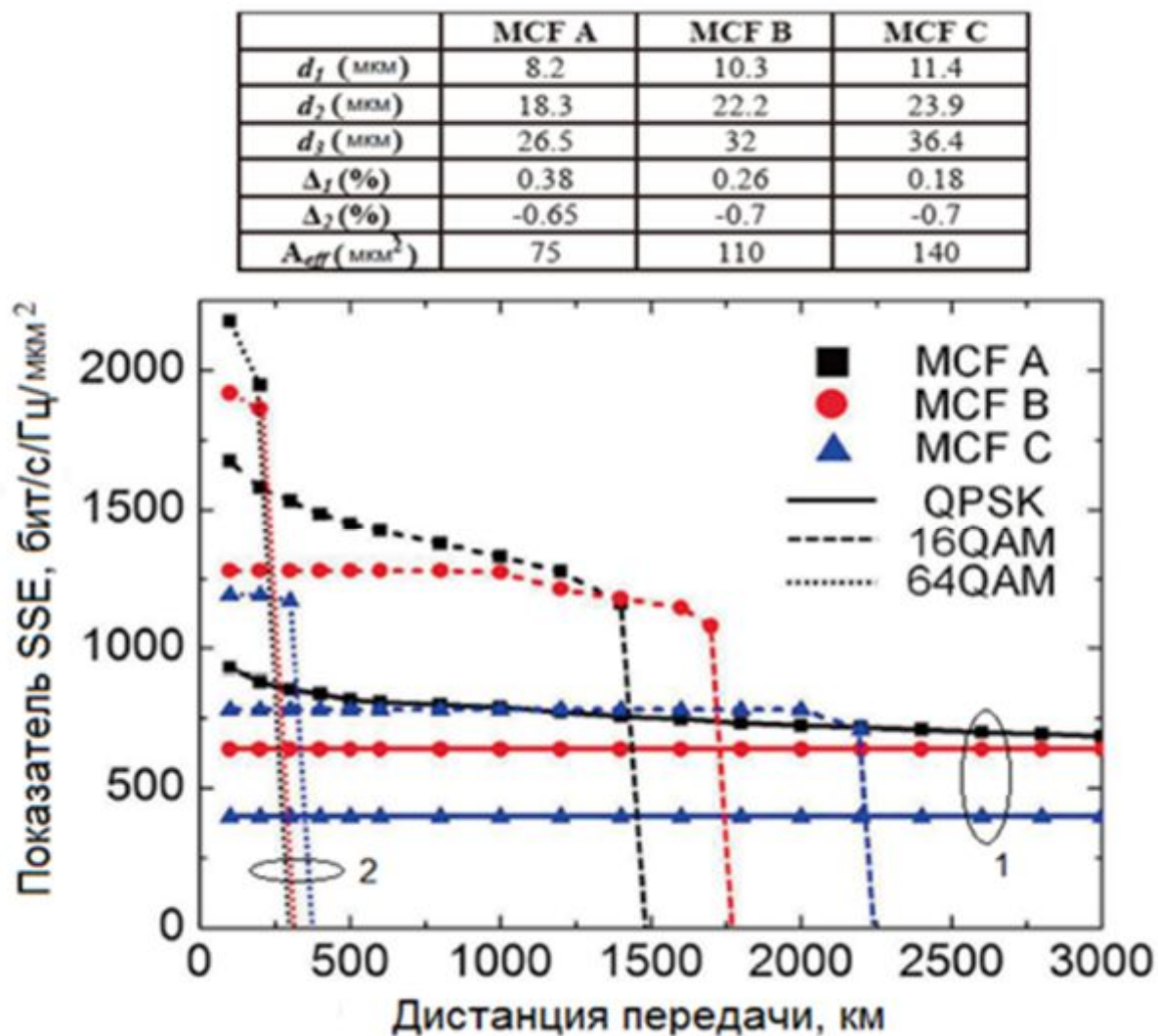


Рис. 3.9. Специальный показатель SSE и дистанция передачи в системе с различными форматами для трёх типов волокон MCF (A, B, C)

Волокна MCF в протяженных линиях с оптическим усилением

- 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.3.10).
- Блоки TFB (tapered fiber bundle, коннектор-разветвитель связки волокон) позволяют подключить к оптическому усилителю отдельные волокна (сердцевинки) 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.
- 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.

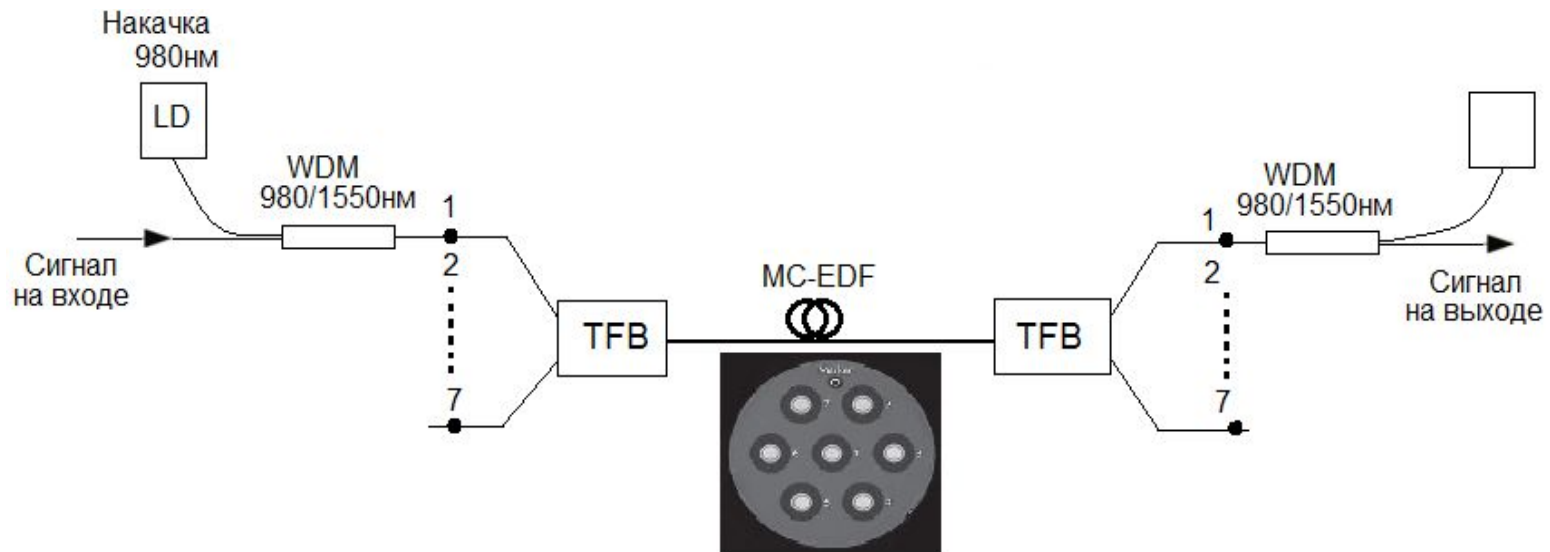
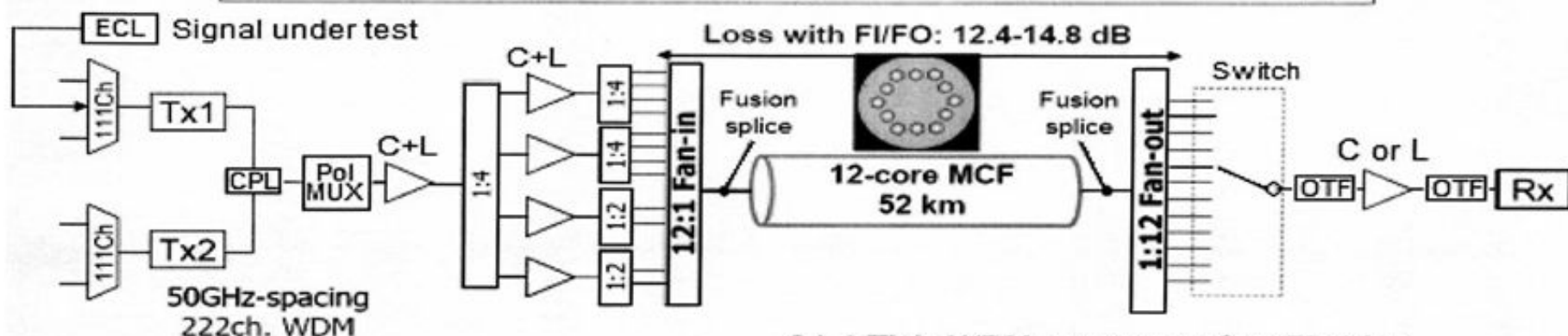


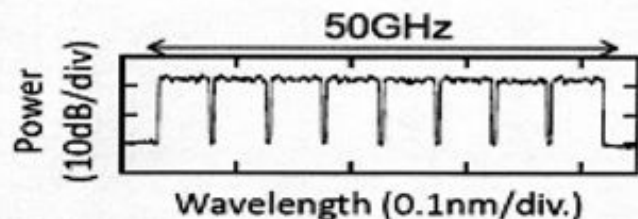
Рис. 3.10. Структура оптического усилителя на основе MC-EDFA

Пример экспериментальной системы передачи на скорость 1Пбит/с с волокнами MCF

1.01-Pb/s Capacity = 222-ch. WDM x 380 Gb/s x 12 core
Aggregate SE : 91.4 b/s/Hz (7.6 b/s/Hz/fiber x 12 cores)

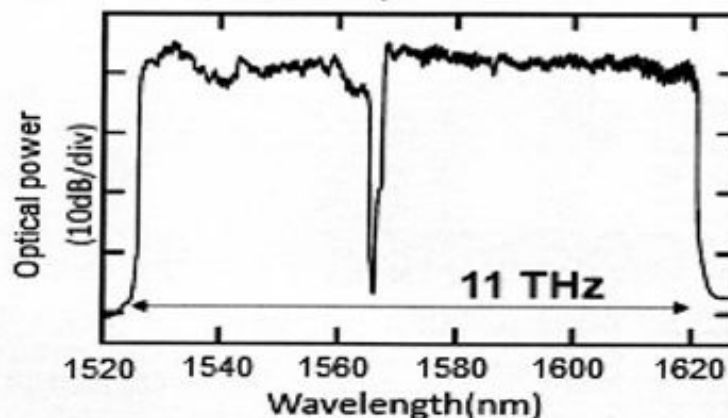


456.8Gb/s/ch. PDM 32-QAM SC-FDM signal
 (net data rate: 380Gb/s)



H. Takara et al, ECOC2012, Th.3.C.1. 2012
 (NTT, Fujikura, Hokkaido Univ.DTU)

84.4 Tb/s WDM spectrum after 52.4 km



Выводы по возможностям и проблемам MCF

- 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 многомодовом 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.

Волокна FMF в оптических системах передачи

- 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. 3.11). 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, $l=0, 1, 2..$ – азимутальное число распределения мод, $m=0, 1, 2, \dots$ – модовое число) может дополняться поляризационным разделением (рис.3.12), что также повышает эффективность использования волокна.

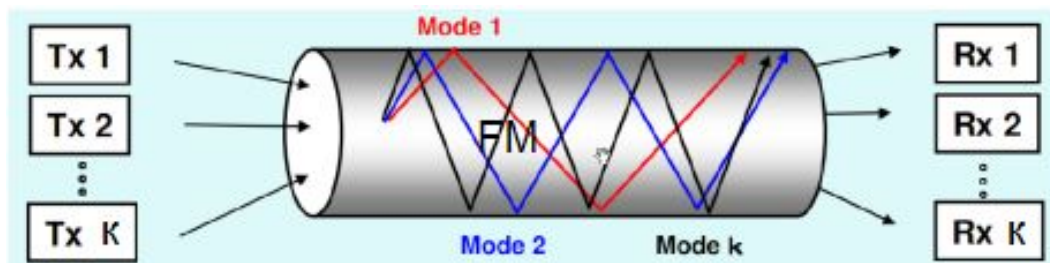


Рис. 3.11. Мультимодовый режим передачи в многомодовом волокне

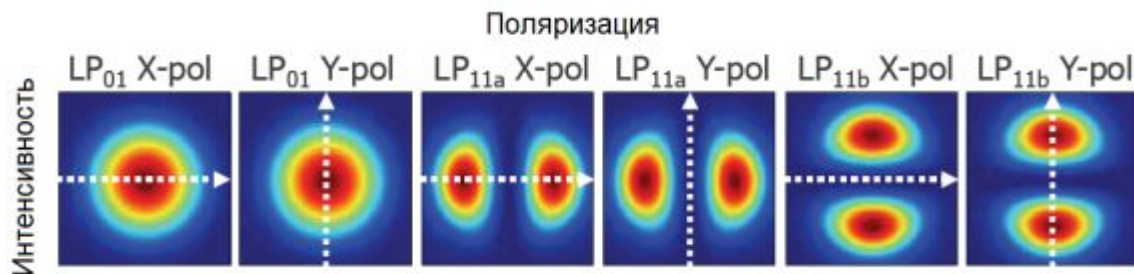


Рис. 3.12. Оптические моды с различной линейной поляризацией (плоскости поперечного сечения X, Y) в структуре волокна FM

Принцип построения оптической системы с модовым мультиплексированием

- Отдельные моды создаются передатчиками и направляются в устройства модового мультиплексирования (рис. 3.13), 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.
- На каждой из мод может располагаться спектр оптических каналов с различными форматами модуляции (рис. 3.14), в том числе с различной поляризацией.

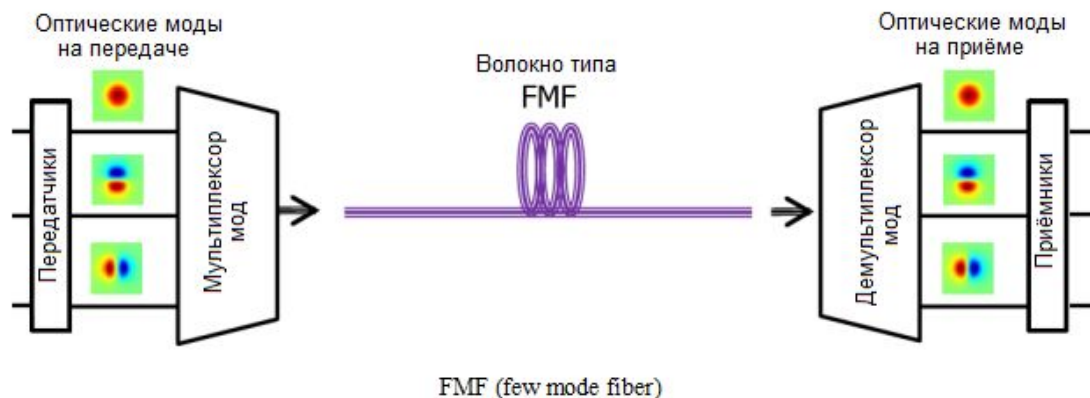


Рис. 3.13. Структура системы передачи MDM

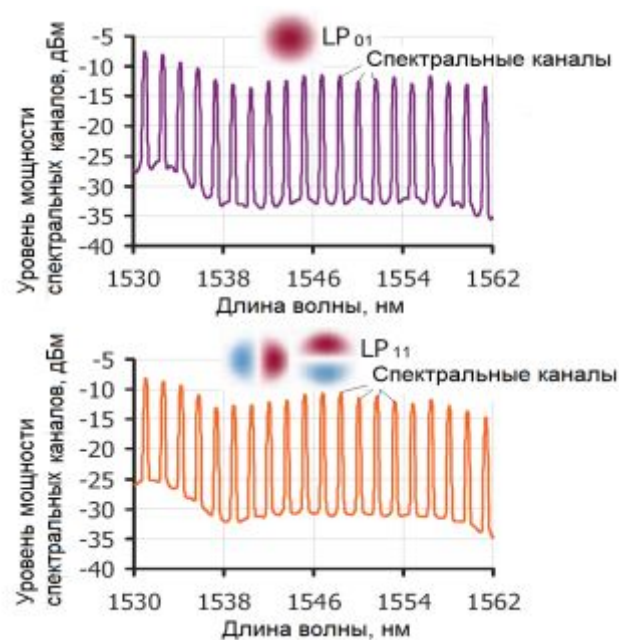


Рис. 3.14. Спектры оптических каналов мультиплексируемых мод в системе передачи MDM-DWDM

Промышленные маломодовые волокна и их характеристики

- 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.3.1. 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 демultipлексора, 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.

Характеристики передачи на волне 1550 нм	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

Табл. 3.1
Характеристики
2-х и 4-х
модовых волокон

Ввод и вывод мод в волокнах FMF, проблемы оптического усиления

- Из характеристик модового мультиплексора видно (табл.3.2), что изделие не отличается малыми потерями оптической мощности мод и его применение без оптического усиления не имеет смысла на протяженных линиях.
- Исследования оптических усилителей мод показывают, что сохраняется неравномерность усиления 3 – 7 дБ в стандартном диапазоне волн С (1530 - 1560 нм) (рис.3.15), 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.

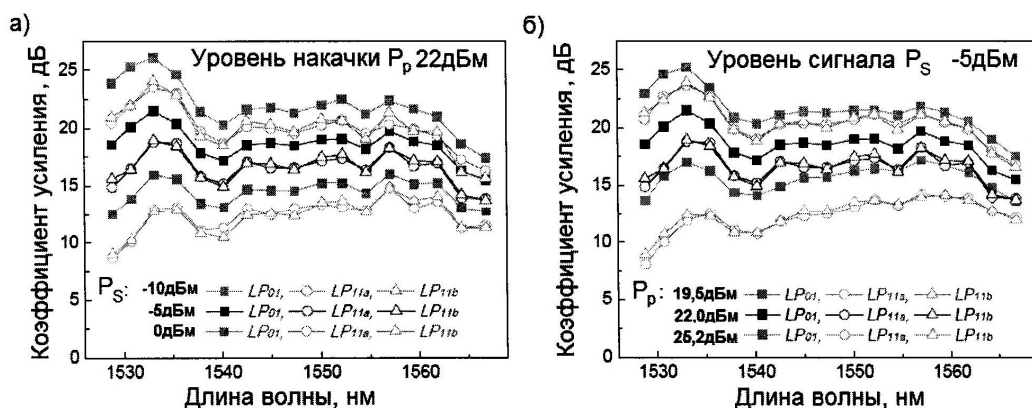
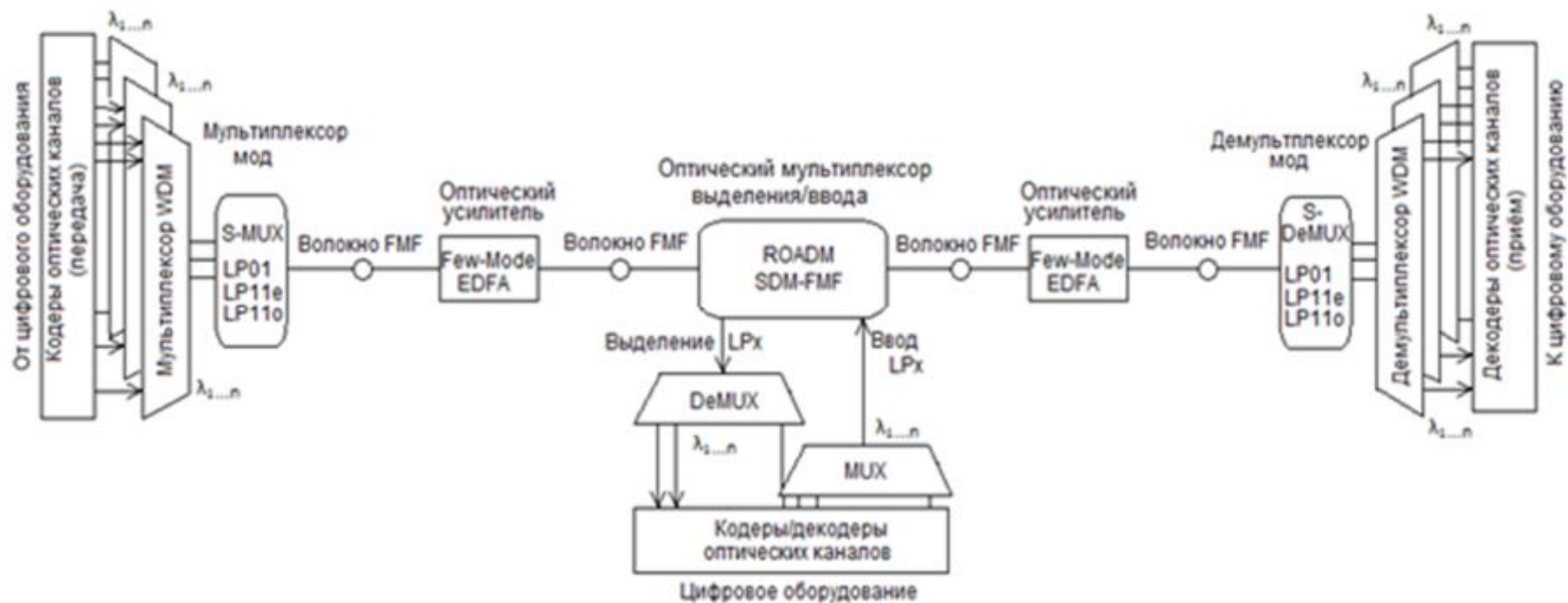


Рис. 3.15. Спектральные характеристики усиления эрбиевого усилителя 3-х мод при различных уровнях мод (а) и уровнях накачки (б)

Табл. 3.2. 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

Структурная схема системы передачи с волокнами FMF



Выводы по возможностям и ограничениям FMF

- 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 (задание: составить краткие ответы по существу)

- 1. В чём состоят тенденции в развитии волоконно-оптических систем передачи (ВОСП)?
- 2. Какие оптические компоненты могут входить в состав ВОСП?
- 3. Чем отличаются форматы сигналов NRZ, RZ в ВОСП?
- 4. Почему спектры сигналов NRZ и RZ отличаются в два раза?
- 5. Что происходит со спектром при модуляции оптической несущей частоты импульсным сигналом?
- 6. Какие оптические диапазоны одномодовых волокон стандарта G.652 имеют наименьшие потери оптической мощности?
- 7. Чем определяется число спектральных каналов DWDM в оптических диапазонах волокна SMF?
- 8. В чём недостатки передачи информационных сигналов в формате NRZ в оптических каналах систем DWDM?
- 9. Что называется спектральной эффективностью оптического волокна?
- 10. Что представляет собой дисперсия оптического волокна?
- 11. Чем порождается хроматическая и поляризационная дисперсия в оптическом волокне?
- 12. На что в системе передачи информационных сигналов влияет дисперсия?
- 13. Чем отличаются с точки зрения дисперсии волокна стандартов G.652, G.653, G.654, G.655, G.656?
- 14. Для чего нужны волокна типа DCF?
- 15. Как определить результирующую дисперсию одномодового ОВ?
- 16. Что обозначает штраф за дисперсию?
- 17. Какие типы ОВ предназначены для протяженных оптических линий с мультиплексированием DWDM и скоростями передачи 100/400 Гбит/с на канал?
- 18. Чем обусловлены нелинейные оптические эффекты в волокне?
- 19. Что такое коэффициент Керра?

Контрольные вопросы (задание: составить краткие ответы по существу)

- 20. Какие нелинейные эффекты оптических волокон ухудшают характеристики оптических сигналов?
- 21. Как увязаны между собой число спектральных каналов DWDM в волокне, полоса частот канала, максимальный допустимый уровень передачи сигнала в канале?
- 22. Как влияет ХД на нелинейные эффекты в ОВ?
- 23. Какие достоинства имеет электронная компенсация дисперсии?
- 24. В чём достоинство когерентного оптического приёма сигналов в ВОСП?
- 25. Для чего применяется FEC?
- 26. Какой выигрыш в энергетическом потенциале оптического канала можно получить за счёт FEC?
- 27. Какие форматы кодирования канальных сигналов предусмотрены в современных ВОСП?
- 28. Какие форматы кодирования канальных сигналов обеспечивают максимальную спектральную эффективность?
- 29. Что обозначает нелинейный предел Шеннона в оптическом канале?
- 30. Какова связь между нелинейным пределом Шеннона и форматом кодирования канального сигнала?
- 31. Почему необходимо использовать суперканальные решения по передаче информационных сигналов?
- 32. В чём преимущество использования волокон MCF и FMF?
- 33. Какие проблемы передачи сигналов в волокнах MCF и FMF ограничивают дистанции передачи?
- 34. Сколько мод в FMF можно использовать для организации DWDM каналов?
- 35. Какие предельные скорости передачи информации можно реализовать в системах на основе волокон MCF, FMF?

Задача

- Определить предельную скорость передачи всех каналов и спектральную эффективность ВОСП на основе волокон SMF, NZDSF, MCF, FMF, MCF-FMF (по варианту) для заданного по ширине спектра канала в оптических диапазонах S, C, L, C+L, S+C+L и скорости передачи в формате кодирования (модуляции).

Табл.1. Предпоследняя цифра номера студ. билета или пароля

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип ОВ	SMF	NZDSF	MCF	FMF	MCF-FMF	SMF	NZDSF	MCF	FMF	MCF-FMF
Число сердцевин/ мод	1/0	1/0	5/0	1/3	7/2	1/0	1/0	7/0	1/4	9/3

Табл.2. Последняя цифра номера студ. билета или пароля

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Диапазон ОВ	S	C	L	C+L	C+L+S	S	C	L	C+L	C+L+S
Формат кода	PM-QPSK	PM-16QAM	PM-QPSK	PM-16QAM	PM-32QAM	PM-QPSK	PM-QPSK	PM-16QAM	PM-16QAM	PM-QPSK
Скорость в канале, Гбит/с	40	100	100	400	400	400	100	200	400	40
Ширина спектра канала, ГГц	12,5	25,0	50,0	100	80,0	150	50,0	100	75,0	12,5

Методические указания к решению задачи

- 1. Используя данные табл.1.1 рассчитать по своему варианту число спектральных каналов в заданных диапазонах волн.
- 2. Рассчитать предельные скорости передачи всех каналов на основе индивидуальных данных по табл.1,2 задания. Учесть число спектральных каналов на каждой моде и каждой сердцевине по варианту.
- 3. Рассчитать спектральную эффективность используемых волокон на основе определения слайда 12.
- 4. Сделать вывод.