

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

В. Ю. БУНАС, Н. В. ТАРЧЕНКО, В. Н. УРЯДОВ

***ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО ТРАКТА
ЦИФРОВОЙ ВОСП***

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Республики Беларусь
по образованию в области информатики и радиоэлектроники
в качестве учебно-методического пособия для студентов учреждений,
обеспечивающих получение высшего образования по специальности 1-45 01 01
«Многоканальные системы телекоммуникаций»*

Минск БГУИР 2012

УДК 621.395.52(076)
ББК 32.883я73
Б91

Р е ц е н з е н т ы:

директор учебного центра «Связьинформсервис»
кандидат технических наук, профессор Э. А. Чуйко;

директор ОАО «Гипросвязь»,
кандидат технических наук Н. Н. Анисимов;

доцент кафедры сетей и устройств телекоммуникаций
учреждения образования «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»,
кандидат технических наук М. Ю. Хоменок

Бунас, В. Ю.

Б91

Проектирование линейного тракта цифровой ВОСП : учеб.-метод. пособие / В. Ю. Бунас, Н. В. Тарченко, В. Н. Урядов. – Минск : БГУИР, 2012. – 70 с. : ил.

ISBN 978-985-488-595-7.

В пособии рассмотрены вопросы проектирования линейного тракта цифровых волоконно-оптических транспортных систем передачи, в том числе систем со спектральным разделением каналов, на основе параметров выбранных оптических интерфейсов и параметров оптических сетевых компонентов.

Предназначено для студентов, специальности 1-45 01 01 «Многоканальные системы и телекоммуникации», других специальностей телекоммуникационного направления, может быть использовано при дипломном проектировании.

УДК 621.395.52(076)
ББК 32.883я73

ISBN 978-985-488-595-7

© Тарченко Н. В., Урядов, В. Н., Бунас В. Ю., 2012
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ	4
1 ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ЛИНЕЙНОГО ТРАКТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ.....	6
2 ОПТИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕЙСЫ И ИХ ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ	7
3 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО ТРАКТА.....	21
3.1 Основные характеристики одномодовых оптических волокон	21
3.1.1 Затухание и дисперсия в оптических волокнах	21
3.1.2 Нелинейные эффекты в ОВ.....	26
3.1.3 Влияние линейных и нелинейных искажений	29
3.2 Оптический передатчик.....	30
3.3 Оптические усилители: классификация, основные параметры.....	31
4 ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНОГО ТРАКТА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ.....	35
4.1 Проектирование одноканальной системы по «худшему случаю»	35
4.2 Коэффициент ошибок по битам и Q -фактор	38
4.3 Влияние дисперсионных свойств оптического волокна на протяженность оптического тракта	42
4.4 Расчет оптического отношения сигнал/шум цепочки оптических усилителей.....	48
4.5 Оптическое перекрестное влияние	51
4.5.1 Основные определения	51
4.5.2 Межканальное перекрестное влияние.....	52
4.5.3 Интерферометрическое перекрестное влияние	55
4.6 Учет нелинейных явлений.....	58
5 ОБОБЩЕННАЯ МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНОГО ТРАКТА	61
5.1 Общие положения.....	61
5.2 Методика проектирования	61
ЛИТЕРАТУРА.....	68

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

1R	(Regeneration) Reamplification	Регенерация мощности
2R	(Regeneration) Reamplification, reshaping	Регенерация мощности и формы
3R	(Regeneration) Reamplification, reshaping, retiming	Регенерация мощности, формы и синхронизации
ADM	Add-Drop Multiplexer	Мультиплексор ввода-вывода
ASE	Amplified Spontaneous Emission	Усиленная самопроизвольная эмиссия
BER	Bit Error Ratio	Коэффициент ошибок по битам
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing	Грубое спектральное мультиплексирование
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Плотное спектральное мультиплексирование
DCF	Dispersion Compensating Fiber	Волокно с компенсацией дисперсии
DGD	Differential Group Delay	Дифференциальная групповая задержка
E/O	Electrical-Optical (conversion)	Электрооптическое преобразование
EDFA	Erbium-Doped (silica-based) Fibre Amplifier	Усилитель на волокне, легированном эрбием
FEC	Forward Error Correction	Упреждающая коррекция ошибок
FWHM	Full width half maximum	Полная ширина на половине максимума
FWM	Four-Wave Mixing	Четырехволновое смешение
IaDI	Intra Domain Interface	Внутридоменный интерфейс
IrDI	Inter Domain Interface	Междоменный интерфейс
MPI-R	Receive Main Path Interface reference point	Интерфейс многоканального тракта у приемника
MPI-S	Source Main Path Interface reference point	Интерфейс многоканального тракта у источника
M-Rx	Multi-channel Receiver	Многоканальный приемник
M-Tx	Multi-channel Transmitter	Многоканальный передатчик
NE	Network Element	Сетевой элемент
NRZ	Non-Return to Zero	Код без возврата к нулю
NF	Noise Factor	Шум-фактор
O/E	Optical-Electrical (conversion)	Оптоэлектронное преобразование
OA	Optical Amplifier	Оптический усилитель
OADM	Optical Add-Drop Multiplexer	Оптический мультиплексор ввода-вывода
OMS	Optical Multiplexing Section layer	Секция оптического мультиплексирования
ONE	Optical Network Element	Оптический сетевой элемент
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio	Отношение оптический сигнал/шум

OTH	Optical Transport Hierarchy	Иерархия оптической передачи
OTM	Optical Transport Module	Модуль оптической передачи
OTN	Optical Transport Network	Оптическая транспортная сеть
OTS	Optical Transmission Section layer	Секция оптической передачи
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy	Плещиохронная цифровая иерархия
PMD	Polarization Mode Dispersion	Поляризационная модовая дисперсия
R	Single channel receive reference point	Точка одноканального оптического интерфейса у приемника
Rx	Receiver	Приемник (оптический)
RZ	Return to Zero	Код с возвратом к нулю
S	Single channel source reference point	Одноканальный оптический интерфейс у источника
SDH	Synchronous Digital Hierarchy	Синхронная цифровая иерархия
SLM		Однопродольная мода
SNR	Signal-to-Noise Ratio	Отношение сигнал/шум
SPM	Self-Phase Modulation	Самомодуляция фазы
Tx	Transmitter	Передатчик (оптический)
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Мультиплексирование с разделением по длине волны
OXC	Optical cross-connect	Оптический коммутатор
XC	Cross-connect	Кроссовое соединение (коммутатор)
XPM	Cross-Phase Modulation	Перекрестная модуляция фазы
ВОСП	Волоконно-оптическая система передачи	
КОБ	Коэффициент ошибок по битам	
ОВ	Оптическое волокно	
ОУ	Оптический усилитель	
ПМД	Поляризационно-модовая дисперсия	

1 ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ЛИНЕЙНОГО ТРАКТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

В наиболее общем случае структурная схема линейного тракта многоканальной волоконно-оптической системы передачи (ВОСП), использующей спектральное разделение сигналов (показан один прямой канал), приведена на рисунке 1.1 и включает в себя следующие оптические сетевые элементы: оконечное оборудование системы передачи, в котором важны параметры оптических передатчика (T_x) и приемника (R_x), оптический мультиплексор (ОМ) и демultipлексор (ОД), реконфигурируемые оптические мультиплексоры ввода/вывода (OADM), оптические кросс-коммутаторы (ОХС), оптические усилители (ОА), которые могут использоваться как бустеры (ВОА), линейные (ЛОА) и предварительные (РОА) усилители, устройства компенсации дисперсии (ДХМ), участки оптического волокна.

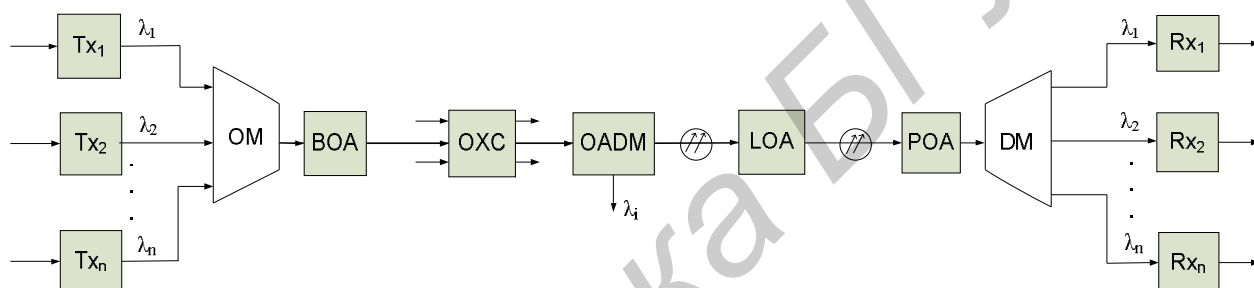


Рисунок 1.1 – Структурная схема линейного тракта ВОСП со спектральным разделением каналов

В схеме, представленной на рисунке 1.1, на вход канального оптического передатчика T_{x_i} поступает информационный цифровой сигнал (цифровая случайная импульсная последовательность в линейном коде) заданной скорости. В оптическом передатчике с помощью оптического модулятора (внешнего или непосредственно) осуществляется модуляция по интенсивности оптической несущей на заданной длине волны λ_i . Модулированные несущие мультиплексируются (объединяются) с помощью оптического мультиплексора WDM в агрегатный (групповой) оптический поток, который после усиления мощным оптическим усилителем (ВОА) вводится в оптическое волокно (ОВ). В оптическом тракте, являющемся, как правило, частью сложной оптической транспортной сети, возможна как оптическая кросс-коммутация сигналов в ОХС (коммутация части оптических канальных сигналов с произвольного входа на произвольный выход), так и ввод/выделение оптического сигнала с заданной длиной волны в оптическом мультиплексоре ввода/вывода (OADM). Для уменьшения влияния на передаваемый оптический сигнал дисперсионных искажений в ОВ в линейном тракте применяются устройства компенсации дисперсии. На приемной стороне многоканальный оптический сигнал с выхода ОВ усиливается в предварительном усилителе и демultipлексируется, т.е. разделяется на составляющие

потоки – модулированные несущие λ_i . Канальные оптические сигналы поступают на соответствующие оптические приемники (Rx_i), где они дополнительно фильтруются (оптические полосовые фильтры используются для уменьшения переходных помех и увеличения тем самым помехоустойчивости при детектировании), детектируются с помощью фотодетекторов (преобразуются из оптического сигнала в электрический) и регенерируются (восстанавливается цифровой канальный электрический сигнал с заданными параметрами качества, важнейшим из которых является коэффициент ошибок по битам).

При изложении материала в данном пособии не рассматриваются вопросы технологической и конструктивной реализации отдельных элементов оптического линейного тракта, а подробно анализируются их параметры, учитываемые при проектировании линейного тракта и влияющие на его протяженность.

При изложении методик проектирования линейного тракта будем исходить из того, что в наиболее общем случае система является многоканальной со спектральным разделением каналов и содержит все отмеченные на схеме рисунка 1.1 оптические сетевые элементы.

2 ОПТИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕЙСЫ И ИХ ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Для возможности сопряжения разнородного оборудования транспортной сети сетевые оптические элементы оснащаются оптическими интерфейсами, которые определены в ряде рекомендаций МСЭ-Т. Оптические интерфейсы транспортных сетей характеризуются развивающимся разнообразием. Это обусловлено развитием новых технологий передачи и внедрением новых компонентов: перестраиваемых лазеров; оптических усилителей; компактных компенсаторов дисперсии; процессоров предварительной коррекции ошибок (FEC) и т.д. Оптические интерфейсы стандартизированы в рекомендациях МСЭ-Т и IEEE 802.3. В соответствии с этими стандартами оптические интерфейсы можно разделить на три группы (рисунок 2.1):

- одноканальные, обеспечивающие передачу только на одной оптической частоте (G.955, G.957, G.691, G.693, IEEE 802.3 u,z);

- многоканальные, обеспечивающие передачу на двух и более оптических частотах одновременно (G.692, G.694.1, G.694.2, G.695, G.696.1, G.696.2, G.698.1, G.698.2, G.959.1, G.959.2);

- оптические интерфейсы пассивных оптических сетей (PON), которые поддерживают передачу оптических сигналов на 1, 2, 3 и более оптических частотах (G.983, G.984, G.985, IEEE 802.3ah).

Как показано в Рекомендации G.957, для одноканальных оптических линейных трактов, реализованных на оборудовании синхронной цифровой иерархии SDH (уровни STM1-STM-16), использовались три категории приложений:

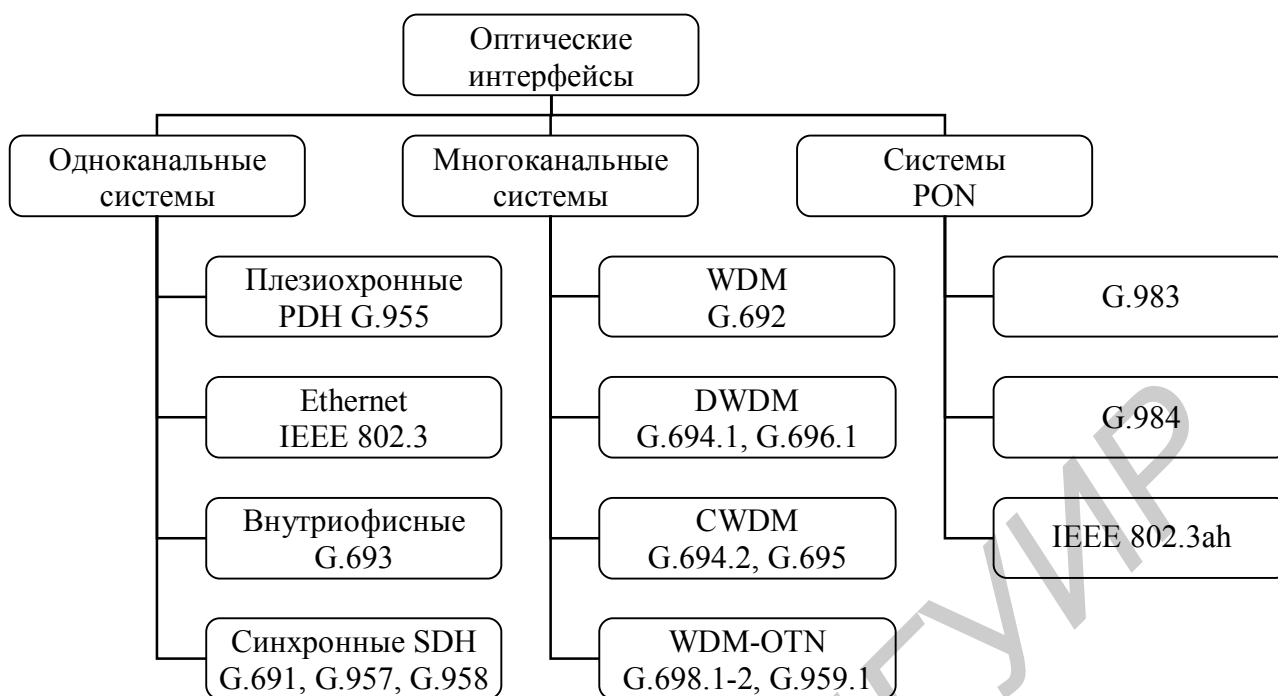


Рисунок 2.1 – Общая классификация оптических интерфейсов

– внутростанционные, соответствующие расстояниям присоединения, меньшим чем приблизительно 2 км;

– межстанционные малой дальности, соответствующие расстояниям присоединения, равным приблизительно 15 км;

– межстанционные большой дальности, соответствующие расстояниям присоединения, равным приблизительно 40 км в окне 1310 нм и приблизительно 80 км в окне 1550 нм.

Так как общие характеристики системы и конкретные значения для оптических параметров, как правило, зависят от скорости передачи информации, оптические интерфейсы СЦИ классифицировали, основываясь на приложениях с использованием набора прикладных кодов. Прикладной код составлялся следующим образом:

Приложение – уровень STM. Нижний индекс.

Использовались следующие обозначения:

приложение:

– I (внутростанционное);

– S (малой дальности);

– L (большой дальности);

нижний индекс:

– «1» – используются источник излучения с номинальной длиной волны 1310 нм и ОВ в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т G.652;

– «2» – используются источник излучения с номинальной длиной волны 1550 нм и ОВ в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т G.652 для приложений малой дальности и ОВ в соответствии с рекомендациями МСЭ-Т G.652 или G.654 для приложений большой дальности;

– «3» – используются источник излучения с номинальной длиной волны 1550 нм и ОВ в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т G.653.

На всем протяжении эволюции оптических систем передачи изменялись и совершенствовались прикладные коды. В рекомендации МСЭ-Т G.959.1 приведены прикладные коды последнего поколения.

На рисунке 2.2 показаны универсальные эталонные точки для оптических сетевых элементов, являющихся частью оптического линейного тракта. Термин «оптический сетевой элемент» (ONE) используется для иллюстрации общего случая универсального сетевого элемента в оптической транспортной сети. В целом ONE может иметь:

- 1) только многоканальные интерфейсы;
- 2) только одноканальные интерфейсы;
- 3) любую комбинацию одноканальных и многоканальных интерфейсов.

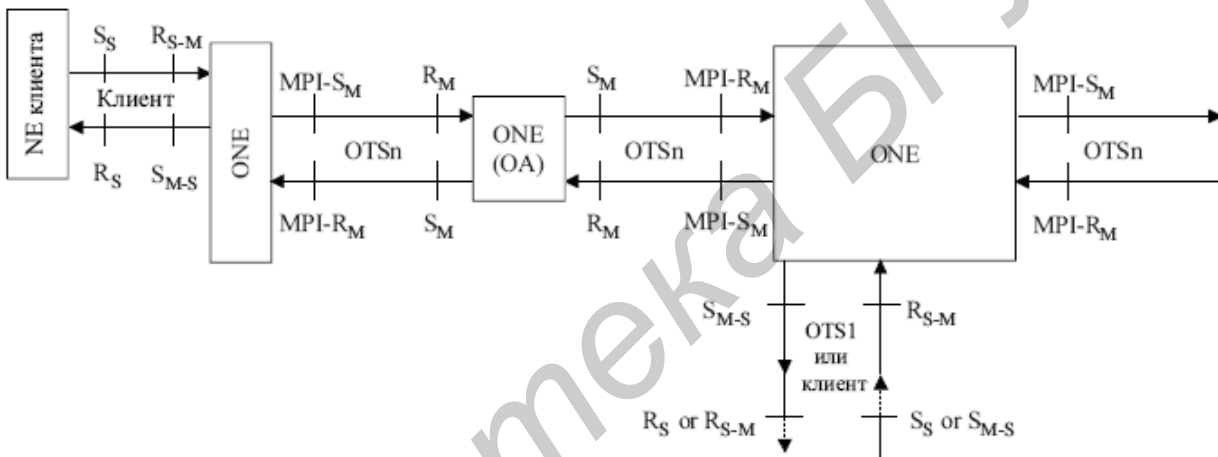


Рисунок 2.2 – Универсальные эталонные точки для оптических сетевых элементов

Эталонные точки определены следующим образом:

- S_S – (одноканальная) эталонная точка в оптическом волокне сразу после одноканального NE оптического разъема передатчика;
- R_S – (одноканальная) эталонная точка непосредственно перед оптическим разъемом NE одноканального клиентского приемника;
- S_{M-S} – (одноканальная) эталонная точка сразу после выходного оптического разъема любого трибутарного интерфейса оптического сетевого элемента (нижний индекс «M-S» означает одноканальный выход из системы, которая может быть многоканальной);
- R_{S-M} – (одноканальная) эталонная точка в оптическом волокне непосредственно перед входным оптическим разъемом любого трибутарного интерфейса оптического сетевого элемента (нижний индекс «S-M» означает одноканальный вход в систему, которая может быть многоканальной);

– MPI-S_M – (многоканальная) эталонная точка в оптическом волокне сразу после выходного оптического разъема транспортного интерфейса оптического сетевого элемента;

– MPI-R_M – (многоканальная) эталонная точка в оптическом волокне непосредственно перед входным оптическим разъемом транспортного интерфейса оптического сетевого элемента;

– S_M – (многоканальная) эталонная точка в оптическом волокне непосредственно перед оптическим разъемом транспортного интерфейса оптического сетевого элемента;

– R_M – эталонная точка в ОВ непосредственно перед входным оптическим разъемом линейного многоканального ОА.

При этом различают понятия междоменного и внутридоменного интерфейсов. Междоменные интерфейсы (IrDI) предназначены для соединения двух различных административных доменов. Такие домены могут иметь оборудование, изготовленное двумя различными производителями. Кроме того, два административных домена могут принадлежать двум различным сетевым операторам.

Оптические интерфейсы, реализуемые в оборудовании, обеспечивают поперечную совместимость (совместимость между производителями), которая автоматически обеспечивается для всех IrDI, имеющих одинаковый прикладной код nWx-utz.

Прикладной код идентифицирует сеть, реализацию и архитектурные характеристики приложения. Обозначение прикладного кода строится следующим образом:

PnWx-utz,

где P – при наличии указывает на «множественный» прикладной код, относящийся к IrDI. Множественные коды применимы к любому оптическому трибутарному сигналу внутри определенного класса;

n – максимальное число каналов, поддерживаемых прикладным кодом;

W – буква, определяющая длину интервала/коэффициент ослабления, например:

– I – внутриофисное приложение (затухание на участке до 7 дБ);

– S – малое расстояние (затухание на участке до 11 дБ);

– L – большое расстояние (затухание на участке до 22 дБ);

– V – очень большое расстояние (затухание на участке до 33 дБ);

– U – сверхбольшое расстояние (затухание на участке до 44 дБ);

x – максимальное число участков усиления, допустимое прикладным кодом;

у – определяет наивысший класс поддерживаемого оптического трибутарного сигнала (тип линейного кода и скорость передачи цифрового сигнала), например: «1» – класс NRZ 2.5G; «2» – класс NRZ 10G; «3» – класс NRZ 40G; «7» – класс RZ 40G.

t – определяет уровни мощности для прикладного кода, например:

- А – используются уровни мощности, подходящие для бустерного усилителя в исходном ONE, и уровни мощности, пригодные для предусилителя в оконечном ONE;
- В – используются уровни мощности, подходящие только для бустерного усилителя;
- С – используются уровни мощности, подходящие только для предусилителя;
- D – используются уровни мощности, подходящие для работы без усилителей;

z – обозначает тип источника и волокна следующим образом:

- «1» – используются источник излучения с номинальной длиной волны 1310 нм и ОВ в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т G.652;
- «2» – используются источник излучения с номинальной длиной волны 1550 нм и ОВ в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т G.652;
- «3» – используются источник излучения с номинальной длиной волны 1550 нм и ОВ в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т G.653;
- «5» – используются источник излучения с номинальной длиной волны 1550 нм и ОВ в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т G.655.

Определяются физические значения параметра для междоменных интерфейсов только с одним участком (для $x = 1$).

Двунаправленная передача в оптической системе будет обозначаться добавлением символа В перед прикладным кодом. Для приложения OTN он имеет следующий вид:

$VnWx-ytz$.

В некоторых прикладных кодах в конце кода добавляется суффикс. Пять суффиксов определяются следующим образом:

- F – в приложении для передачи используются байты FEC;
- D – в приложении используется адаптивная компенсация дисперсии;
- r – указывает на уменьшенное целевое расстояние, ограниченное дисперсией. Уменьшенные целевые расстояния могут быть обеспечены посредством других технических решений, которые оставлены для дальнейшего изучения (например подход с параллельными интерфейсами);
- a – указывает на то, что уровни мощности передатчика соответствуют приемникам на основе лавинного фотодиода APD;
- b – указывает на то, что уровни мощности передатчика соответствуют приемникам на основе p-i-n-фотодиода.

В таблице 2.1 приведены основные параметры многоканального междоменного оптического интерфейса класса 2.5G NRZ. Рассмотрим более подробно параметры оптических интерфейсов.

1 Максимальное число каналов (N) – максимальное число оптических каналов, которые могут одновременно присутствовать в интерфейсе.

2 Оптический компонентный (трибутарный) сигнал

– класса 2.5G NRZ – непрерывный цифровой сигнал с линейным кодированием без возврата к нулю со скоростью передачи от номинально 622 Мбит/с до номинально 2,67 Гбит/с;

– класса 10G NRZ – непрерывный цифровой сигнал с линейным кодированием без возврата к нулю со скоростью передачи от номинально 2,4 Гбит/с до номинально 10,71 Гбит/с;

– класса 40G NRZ – непрерывный цифровой сигнал с линейным кодированием без возврата к нулю со скоростью передачи от номинально 9,9 Гбит/с до номинально 43,02 Гбит/с.

3 Максимальный коэффициент ошибок по битам (BER). При проектировании оптического участка коэффициент ошибок по битам (КОБ) должен быть не хуже значения, определенного прикладным кодом. Это значение относится к каждому оптическому каналу при максимальных значениях ослабления в оптическом пути и дисперсии в каждом приложении. В случае прикладных кодов, требующих передачу байтов FEC (коды применения с суффиксом F), КОБ должен выполняться только после коррекции ошибок (если она используется). Для всех других прикладных кодов КОБ должен выполняться без использования FEC.

4 Типы одномодовых оптических волокон выбраны из типов волокон, определенных в Рекомендациях МСЭ-Т G.652, G.653 и G.655.

5 Интерфейс в точке MPI-S_M или MPI-S характеризуется следующими параметрами.

5.1 Максимальная ($P_{S\max}$) и минимальная ($P_{S\min}$) средние выходные мощности канала.

Средняя выходная мощность канала соответствует введенной в ОВ мощности канального оптического сигнала в эталонной точке MPI-S_M или MPI-S и определяется как средняя мощность псевдослучайной последовательности данных, введенных в волокно от ONE. Она может изменяться в диапазоне между максимальным ($P_{S\max}$) и минимальным ($P_{S\min}$) значениями, что обеспечивает определенную оптимизацию по стоимости, позволяет учитывать допуски для работы в стандартных условиях, деградацию разъемов, погрешности измерения и эффекты старения. Значения $P_{S\max}$ и $P_{S\min}$ позволяют вычислить чувствительность и перегрузку для приемника в контрольной точке MPI-R.

5.2 Максимальная средняя полная выходная мощность ($P_{S\Sigma}$)

Максимальное значение средней введенной в ОВ оптической мощности в точке MPI-S_M для многоканального оптического сигнала. Может быть оценена с помощью выражения

$$P_{S\Sigma} = P_{S\max}N, \text{ Вт или } p_{S\Sigma} = p_{S\max} + 10\lg N, \text{ дБм,}$$

где N – количество оптических каналов.

Таблица 2.1 – Параметры многоканального междоменного оптического интерфейса класса NRZ 2,5G

Параметр	Ед. изм.	P16S1-1D2 P16S1-1D5	P16I1-2D2 P16I1-2D3 P16I1-2D5	P16S1-2B2 P16S1-2B5	P16S1-2C2 P16S1-2C3 P16S1-2C5
1	2	3	4	5	6
Общая информация					
Максимальное число каналов		16	16	16	16
Скорость передачи / линейный код		2,5G NRZ	10G NRZ	10G NRZ	10G NRZ
Макс. коэффициент битовых ошибок		10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}
Тип волокна		G.652/ G.655	G.652/G.653 /G.655	G.652/ G.655	G.652/ G.653/ G.655
Интерфейс в точке MPI-S_M					
Макс. средняя выходная мощность канала	дБм	-4	-3	+3	-7
Мин. средняя выходная мощность канала	дБм	-10	-6	0	-11
Макс. средняя суммарная выходная мощность	дБм	+8	+9	+15	+5
Центральная частота	ТГц	192,1 + 0,2 m, m = 0...15			
Межканальный интервал	ГГц	200	200	200	200
Макс. отклонение центральной частоты	ГГц	40	40	40	40
Мин. коэффициент гашения в канале	дБ	8,2	8,2	8,2	8,2
Маска глаз-диаграммы		NRZ 2,5G	NRZ 10G	NRZ 10G	NRZ 10G
Оптический путь (один участок) от точки MPI-S_M до точки MPI-R_M					
Макс. коэффициент ослабления	дБ	11	6	11	11
Мин. коэффициент ослабления	дБ	2	0	0	0
Макс. хроматическая дисперсия	пс/нм	800	400	800	800
Мин. оптические возвратные потери в точке MPI-S _M	дБ	24	24	24	24
Макс. дискретный коэффициент отражения между точками MPI-S _M и MPI-R _M	дБ	-27	-27	-27	-27
Макс. дифференциальная групповая задержка	пс	120	30	30	30

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6
Интерфейс в точке MPI-R _M					
Макс. средняя мощность	дБм	-6	-3	+3	-7
Мин. средняя мощность	дБм	-21	-12	-11	-22
Макс. средняя суммарная мощность	дБм	+6	+9	+15	+5
Максимальное различие между мощностями в канале	дБ	-	-	-	-
Макс. потери в оптическом пути (штраф оптического тракта)	дБ	1	2/1/1	2/1	2/1/1
Мин. эквивалентная чувствительность	дБм	-22	-14/-13/-13	-13/-12	-24/-23/-23
Макс. коэффициент отражения оптического сетевого элемента	дБ	-27	-27	-27	-27

5.3 Центральная частота (ν_0)

Номинальные значения частот оптических сигналов, используемых для передачи цифровой информации отдельных оптических каналов.

5.4 *Максимальное отклонение центральной частоты* ($\Delta\nu$) – разность между номинальной центральной частотой и фактической центральной частотой оптического сигнала. В отклонение центральной частоты включены все процессы, которые влияют на мгновенное значение центральной частоты источника излучения для интервала измерения, соответствующего скорости передачи в канале. Эти процессы включают скачки частоты излучения источника (chirp), пропускную способность, уширение в результате самомодуляции и влияние температуры и старения.

5.5 *Межканальный интервал* (ΔF) определяется как номинальная разность частот между двумя оптическими несущими соседних каналов. Разнос между оптическими несущими определяется скоростью передачи модулирующих канальных цифровых сигналов и выбирается из стандартного ряда: 12,5, 25, 50, 100, 200, 400 ГГц. В частности, в таблице 2.1 межканальный интервал равен $\Delta F = 200$ ГГц.

5.6 *Диапазон рабочих длин волн* системы зависит от исходных характеристик источника и приемника излучения, характеристик передачи волокна (коэффициента затухания, хроматической дисперсии) и полосы пропускания ОУ, если он используется.

Рабочие области длин волн для одноканальных и многоканальных внутридоменных и междоменных интерфейсов со скоростями каналов от 0,155 Гбит/с до 40 Гбит/с определены в Рекомендациях МСЭ-Т G.694.1 (DWDM) и G.694.2 (CWDM). В общем случае сетку частотных каналов для систем DWDM можно определить следующим образом:

$$192,1 + n \cdot \Delta F, \text{ ТГц},$$

где n – положительное целое, включая 0, соответствующее номеру канала, $n = 1 \dots N$;

ΔF – межканальный интервал, ТГц.

5.7 *Минимальный коэффициент экстинкции (гашения)* (в канале). Коэффициент экстинкции (EX) определяется следующим образом:

$$EX = 10 \log (A/B),$$

где A – средний уровень оптической мощности в центре логической «1»;
 B – средний уровень оптической мощности в центре логического «0».

5.8 Маска глаз-диаграммы сигналов в линейном коде – определяет общие характеристики формы импульса передатчика в точке MPI-S, включая время нарастания, время спада, выброс импульса, отрицательный выброс перед фронтом импульса и переходной процесс («звон»), которые должны контролироваться для предотвращения чрезмерной деградации чувствительности приемника. Глаз-диаграммы (eye pattern masks) для одноканальных систем СЦИ приведены в Рекомендациях МСЭ-Т G.957, G.691, G.693. Глаз-диаграмма для многоканальных и одноканальных интерфейсов IrDI с кодом NRZ определены в Рекомендации МСЭ-Т G.959.1. На рисунке 2.3 в качестве примера приведены маска глаз-диаграммы для оптического сигнала в коде NRZ и ее параметры (таблица 2.2) при различных битовых скоростях и длинах волн.

Таблица 2.2 – Параметры маски глаз-диаграммы

	NRZ 10G Область 1310 нм	NRZ 10G Область 1550 нм	NRZ 40G
$x_3 - x_2$	0,2	0,2	0,2
y_1	0,25	0,25	0,25
y_2	0,75	0,75	0,75
y_3	0,4	0,25	0,25
y_4	0,25	0,25	0,25

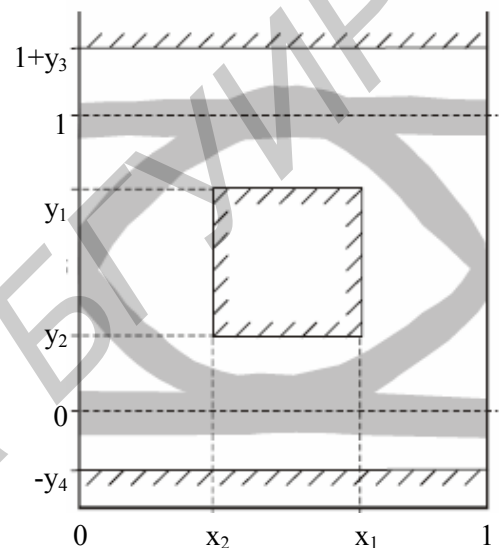


Рисунок 2.3 – Маска глаз-диаграммы оптического сигнала передачи в коде NRZ

Для некоторых прикладных кодов в оптических интерфейсах дополнительно указываются следующие параметры, характеризующие сигнал в точке S.

5.9 Тип источника. Тип используемого источника оптического излучения зависит от характеристик затухания и дисперсии ОВ и иерархического уровня каждого прикладного кода, в качестве источника могут применяться лазеры с несколькими продольными модами (MLM) и лазеры с одной продольной модой (SLM).

5.10 Максимальная среднеквадратичная ширина спектра излучения (RMS). В максимальной среднеквадратичной ширине или стандартном отклонении σ (нм) спектрального распределения лазера MLM учитываются все лазерные моды, амплитуды которых ниже пиковой моды не более чем на 20 дБ. Эта спецификация применяется только к системам с MLM лазером с длиной волны 1310 нм (рекомендация МСЭ-Т G.691).

5.11 Максимальная ширина спектра на уровне минус 20 дБ ($\Delta\lambda$) SLM лазера определяется максимальной полной шириной центрального пика длины волны, измеряемой на уровне -20 дБ от максимальной амплитуды центральной

длины волны при стандартных условиях работы (рекомендация МСЭ-Т G.691, рисунок 2.4).

Максимальная (оптическая) спектральная плотность мощности определяется как максимальный усредненный во времени уровень мощности на интервале 10 МГц в любой части спектра модулированного сигнала. Этот параметр используется для исключения попадания в режим бриллюэновского рассеяния для мощных источников с потенциально узкой собственной шириной линии, например, систем типа лазер – усилитель – модулятор. Однако эта характеристика применима к источникам любого типа.

5.12 Минимальный коэффициент подавления боковой моды ($SMSR_{min}$) – это минимальное отношение наибольшего пика всего спектра передатчика ко второму по амплитуде пику (рисунок 2.4).

Коэффициент подавления боковой моды ($SMSR$) предназначен для минимизации возможности ухудшения КОБ в результате действия шумов из-за перераспределения мод (MPN). Спецификация $SMSR$ относится только к лазерным источникам SLM.

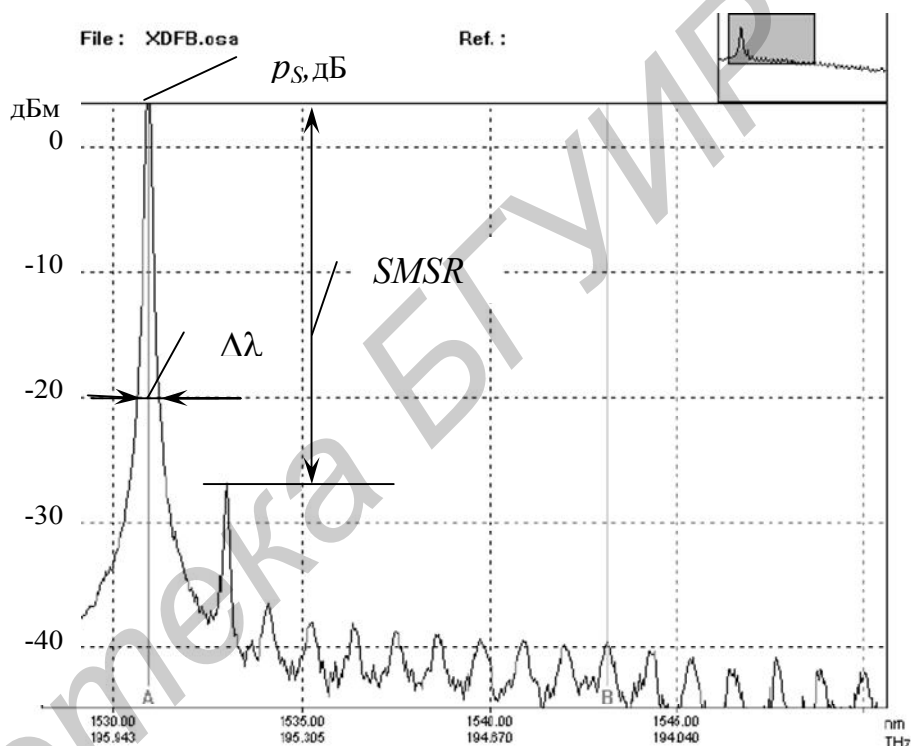


Рисунок 2.4 – Спектр излучения лазера

5.13 Отношение оптический сигнал/шум для источника оптического излучения. Определяется как отношение мощности оптического сигнала к мощности оптического шума у оптического передатчика в заданной полосе пропускания при соединении с трактом передачи.

5.14 Поляризация – распределение поляризации в сигнале оптического источника. Этот параметр может влиять на допуск для PMD; он важен в случае мультиплексирования по поляризации.

6 Оптический путь (один участок) от точки MPI-S_M до MPI-R_M или от MPI-S до MPI-R.

6.1 Максимальный коэффициент ослабления, при котором система работает с коэффициентом ошибок по битам $BER = 10^{-12}$ (или заданного прикладным кодом) при наихудших параметрах сигнала на передающей стороне и максимальной дисперсии.

6.2 Минимальный коэффициент ослабления, позволяющий системе обеспечить BER не ниже 10^{-12} (или значения, заданного прикладным кодом).

6.3 Максимальная хроматическая дисперсия – определяет максимальное допустимое для системы некомпенсированное абсолютное значение хроматической дисперсии. Требуемый максимальный допуск дисперсии системы принимается равным произведению требуемого расстояния на: 20 пс/нм·км – для ОВ в соответствии с Рекомендацией G.652, 3,3 пс/нм·км – для ОВ в соответствии с Рекомендацией G.653 в районе длин волн 1550 нм и для ОВ в соответствии с Рекомендацией G.652 в районе длин волн 1310 нм. Эти значения рассматриваются как наихудшие значения дисперсии для соответствующих типов ОВ. Использование наихудшего случая для этого параметра обеспечивает некоторый запас по дисперсии.

6.4 Максимальное отклонение хроматической дисперсии – это максимальная допустимая разность между фактическим значением хроматической дисперсии оптического пути от точки MPI-S до точки MPI-R (рисунок 2.5) и значением дисперсии оптического пути, определенном во время инсталляции. Отклонение хроматической дисперсии учитывается в приложениях с учетом параметров устройств компенсации дисперсии (DC). На рисунке 2.5 приемное оборудование содержит модуль компенсации дисперсии (DC) и оптический детектор (Det). Кроме того, в приемном оборудовании может использоваться предварительный оптический усилитель (POA).

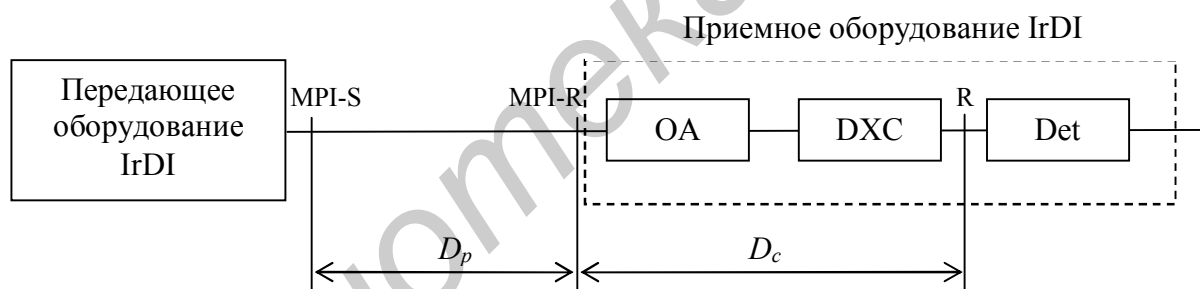


Рисунок 2.5 – К расчету отклонения хроматической дисперсии

Во время инсталляции приемного оборудования измеренное значение дисперсии оптического пути используется для установления величины компенсации дисперсии в DC. Если фактическое значение дисперсии оптического пути D_p и фактическое значение компенсации дисперсии в приемнике D_c , то существует требование, чтобы в любой момент времени после инсталляции:

$$|D_p + D_c| < D_{r \max},$$

где $D_{r \max}$ – максимальная допустимая остаточная хроматическая дисперсия. Например, $D_{r \max} = 30$ пс/нм для класса NRZ 40G без использования адаптивной компенсации дисперсии.

Такие факторы, как погрешность измерения, температура, ремонтные работы и старение, приводят к отличию фактического значения D_p от измеренно-

го на величину δ_p . Аналогично такие факторы, как установка степени разбейния, температура и старение, приводят к тому, что D_C отличается от измеренного значения при инсталляции на величину δ_C . Поэтому приведенное выше ограничение означает, что для исключения превышения $D_{r \max}$ требуется, чтобы

$$|\delta_p| + |\delta_C| < D_{r \max}.$$

6.5 Минимальные оптические возвратные потери в точке MPI-S_M или MPI-S. Отражения вызваны неоднородностями показателя преломления вдоль оптического пути. Отражения влияют на работу источника оптического излучения и усилителей, также многочисленные отражения приводят к интерференционному шуму в приемнике. Отражения на оптическом пути контролируются путем определения:

- минимальных оптических обратных потерь кабельного участка в эталонной точке источника (например MPI-S_M, MPI-S), включая любые соединители;
- максимального дискретного коэффициента отражения между эталонными точками источника (например MPI-S_M, MPI-S) и эталонными точками приема (например MPI-R_M, MPI-R).

Следует помнить, что коэффициент отражения определяется как отношение отраженной оптической мощности в точке к оптической мощности падающего света в этой точке, тогда как оптические возвратные потери – это отношение падающей оптической мощности к суммарной обратной оптической мощности для всего волокна, включая как дискретные отражения, так и распределенное обратное рассеяние, например рэлеевское рассеяние.

6.6 Максимальная дифференциальная групповая задержка. Дифференциальная групповая задержка (*DGD*) – это разность времени между частями импульса, которые переданы в двух основных модах поляризации оптического сигнала. Для расстояний, превышающих несколько километров, и при сильном взаимодействии между поляризационными модами можно статистически моделировать *DGD* в волокне с помощью распределения Максвелла. Максимальная дифференциальная групповая задержка определяется как значение *DGD*, которое система допускает при максимальном ухудшении чувствительности приемника (штрафе по оптической мощности) приблизительно на 1 дБ. Из-за статистической природы поляризационно-модовой дисперсии (ПМД) отношение максимальной *DGD* к средней *DGD* можно определить только вероятностно. Вероятность превышения мгновенным *DGD* любого данного значения может быть выведена из того, что она подчиняется статистике Максвелла. Поэтому, если известна максимальная допустимая для системы *DGD*, то можно определить эквивалентную среднюю *DGD*, деля ее на параметр ρ , соответствующий приемлемой вероятности.

$$DGD_{cp} = DGD_{\max} / \rho,$$

где ρ – отношение максимального значения к среднему значению в статистике Максвелла. Примеры таких отношений приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Отношение максимального значения DGD к среднему и соответствующая вероятность превышения максимального значения

Отношение максимального значения к среднему значению (ρ)	Вероятность превышения максимального значения
3,0	$4,2 \times 10^{-5}$
3,5	$7,7 \times 10^{-7}$
4,0	$7,4 \times 10^{-9}$

7 Интерфейс в точке MPI-R_M или MPI-R

7.1 *Максимальная средняя входная мощность* (в канале) – максимальное приемлемое значение принимаемой средней оптической мощности канального сигнала в точке MPI-R_M или MPI-R для достижения указанного максимального КОБ прикладного кода.

7.2 *Минимальная средняя входная мощность* (в канале) – минимальное значение принимаемой средней оптической мощности канального сигнала в точке MPI-R_M. Эта мощность является минимальной средней выходной мощностью канала минус максимальный коэффициент ослабления приложения без учета потерь в оптическом пути (штрафа по мощности оптического тракта).

7.3 *Максимальная средняя суммарная входная мощность* – максимальная приемлемая суммарная входная мощность в точке MPI-R_M.

7.4 *Максимальная разность мощностей в канале* – разность между наибольшим значением средней введенной в канал мощности и наименьшим значением средней введенной в канал мощности в один момент времени при заданной оптической пропускной способности в диапазоне независимо от числа каналов в приложении.

7.5 *Максимальные потери в оптическом пути* (штраф по мощности). Потери в пути – это наблюдаемое снижение чувствительности приемника (или эквивалентной чувствительности в случае многоканальных приложений) из-за искажения формы сигнала при прохождении по оптическому пути. Они проявляются как сдвиг кривых КОБ системы в сторону более высоких уровней входной мощности. Это соответствует положительным потерям в пути. Поскольку потери в пути приводят к изменению чувствительности приемника, они измеряются при заданном значении КОБ, например $BER = 10^{-12}$.

Для приложений со скоростями передачи в канале, соответствующих классу NRZ 40G, значение оптических потерь в пути на 1 дБ выше, чем для более низких скоростей передачи, что позволяет учесть также потери, связанные с ПМД (как первого, так и второго порядка). Среднее значение случайных дисперсионных потерь из-за ПМД включено в допустимые потери в пути. В этом отношении комбинация передатчик/приемник должна допускать фактическую дифференциальную групповую задержку величиной 0,3 тактового интервала при максимальном снижении чувствительности приблизительно на 1 дБ (при 50 % оптической мощности в каждой основной поляризационной моде). Для правильно спроектированного приемника это соответствует потерям оптиче-

ского пути $0,1 \dots 0,2$ дБ для DGD , что соответствует уширению импульса на $0,1$ тактового интервала.

7.6 Минимальная эквивалентная чувствительность – это минимальная чувствительность в точке $MPI-R_M$, которая потребовалась бы для помещенного в точку $MPI-R_M$ приемника в многоканальных приложениях для достижения указанного максимума КОБ прикладного кода при удалении всех каналов, кроме одного (с идеальным фильтром, не имеющим потерь). При этом учитываются потери мощности, вызванные использованием передатчика при стандартных условиях работы с наихудшими значениями коэффициента гашения, времени нарастания и спада импульса, оптических возвратных потерь в точке $MPI-S_M$, деградации разъемов, перекрестных помех со стороны передатчика, оптического шума усилителя и погрешностей измерения. Она не включает потери мощности, связанные с дисперсией, флуктуацией, нелинейностью или отражениями в оптическом пути; эти эффекты определяются отдельно в распределении максимальных оптических потерь в пути. Однако необходимо учитывать то, что вводимая в канал в точке $MPI-R_M$ минимальная средняя мощность должна превышать минимальную эквивалентную чувствительность на значение оптических потерь в пути. Эффекты старения отдельно не определяются. Указываются значения для наихудшего случая и окончания эксплуатации (end-of-life).

7.7 Максимальный коэффициент отражения оптического сетевого элемента. Обратные отражения от ONE в кабельную систему определяются максимальным допустимым коэффициентом отражения ONE, измеренным в эталонной точке $MPI-R_M$ или $MPI-R$. Оптический коэффициент отражения определен ранее (см. пункт 6.5 2-го раздела).

3 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО ТРАКТА

3.1 Основные характеристики одномодовых оптических волокон

3.1.1 Затухание и дисперсия в оптических волокнах

При организации передачи высокоскоростных данных в одномодовых ОВ возникают различные линейные и нелинейные искажения, приводящие к ухудшению параметров оптической системы передачи. Классификация этих искажений представлена на рисунке 3.1. Их учет необходим при проектировании линейного тракта.

Оптическое волокно характеризуется следующими основными параметрами:

- коэффициент затухания для всего диапазона рабочих длин волн, дБ/км;
- коэффициент хроматической дисперсии для всего диапазона рабочих длин волн, пс/(нм·км);

- длина волны нулевой дисперсии λ_0 , нм;
- наклон дисперсии в диапазоне рабочих длин волн в $\text{пс}/\text{нм}^2/\text{км}$;
- коэффициент поляризационно-модовой дисперсии k_{PMD} , $\text{пс}/\text{км}^{1/2}$.

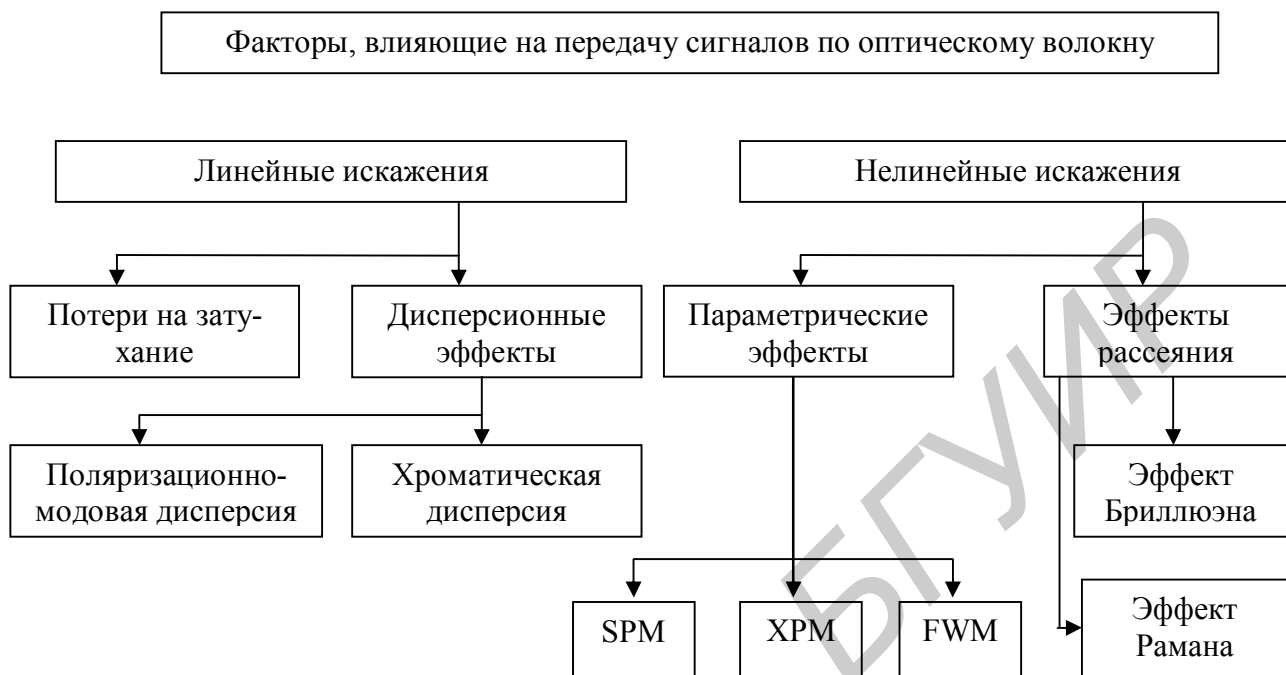


Рисунок 3.1 – Классификация искажений в ОВ

В соответствии с этими параметрами различают следующие типы одномодовых оптических волокон:

- одномодовое волокно (SMF), определенное в Рекомендации МСЭ-Т G.652;
- одномодовое волокно со сдвигом нуля дисперсии (DSF), определенное в Рекомендации МСЭ-Т G.653;
- одномодовое волокно со сдвигом длины волны отсечки (CSF), определенное в Рекомендации МСЭ-Т G.654;
- одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF), определенное в Рекомендации МСЭ-Т G.655;
- одномодовое волокно для компенсации дисперсии (DCF);
- волокна с отрицательным наклоном дисперсии;
- волокна с очень большой эффективной площадью сечения.

В зависимости от спецификаций системы (скорости передачи данных и кодирования, числа длин волн, длины усилительного пролета, выходной мощности усилителя, длины звена связи и т. д.) могут быть использованы различные сочетания этих типов волокон, чтобы обеспечить производительность системы. В таком случае считается, что эта система является системой с управляемой дисперсией.

Коэффициент затухания ОВ определяется особенностями его производства, соответствием той или иной рекомендации. Общий вид зависимости коэффициента затухания для волоконно-оптического кабеля (ВОК) на основе стан-

дартного одномодового ОВ в соответствии с Рекомендацией МСЭ-Т G.652 приведен на рисунке 3.2. Он учитывает потери на сростках, сделанных при установке и ремонте, и рабочий диапазон температур. В Рекомендации МСЭ-Т G.652 указывается, что значения затухания в составляют 0,3...0,4 дБ/км в области 1310 нм и 0,15...0,25 дБ/км в области 1550 нм. При этом диапазоны А и В используются для приложений большой дальности, С и D – для приложений малой дальности и внутривидеостанционных.

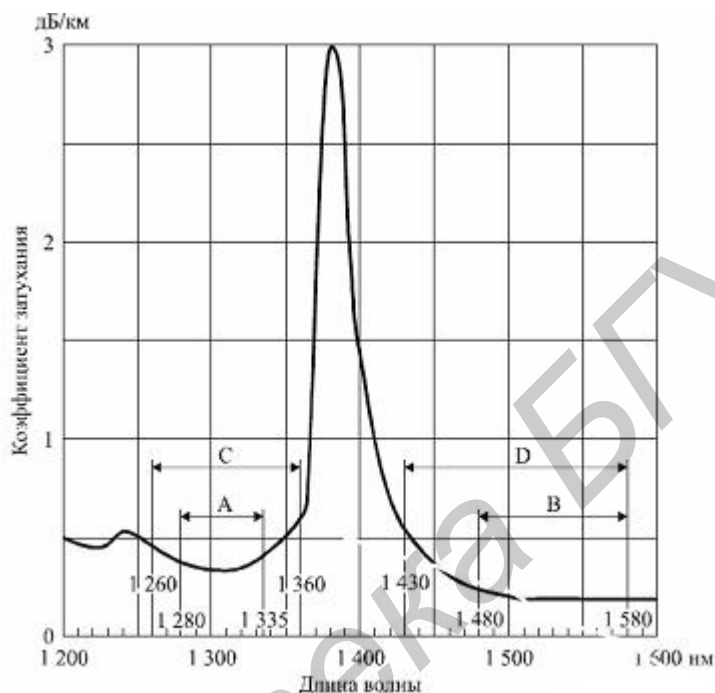


Рисунок 3.2 – Коэффициент затухания проложенного ВОК на основе стандартного одномодового ОВ

Среднеквадратическая дисперсия D стандартного одномодового ОВ в диапазоне длин волн $1200 < \lambda < 1625$ нм рассчитывается по формуле

$$\frac{\lambda S_{0 \max}}{4} \left(1 - \left(\frac{\lambda_{0 \max}}{\lambda} \right)^4 \right) \leq D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0 \max}}{4} \left(1 - \left(\frac{\lambda_{0 \min}}{\lambda} \right)^4 \right), \text{ пс}/(\text{нм} \cdot \text{км}), \quad (3.1)$$

где S_0 – наклон дисперсионной кривой конкретного ОВ на длине волны нулевой дисперсии, пс/(нм²·км), определяется паспортными данными на ОВ;

λ – рабочая длина волны, нм;

$\lambda_{0 \min}$, $\lambda_{0 \max}$ – минимальное и максимальное значения длины волны нулевой дисперсии ОВ, нм.

Для ОВ, выполненного в соответствии с требованиями Рекомендации МСЭ-Т G.655, типичные значения коэффициента хроматической дисперсии D в диапазоне длин волн 1550 нм и коэффициента наклона хроматической дисперсии S_{1550} при длине волны 1550 нм изменяются в зависимости от конкретной реализации (категории ОВ) и приведены в таблице 3.1. Эти значения можно ис-

пользовать для вычисления коэффициента хроматической дисперсии при проектировании оптической линии:

$$D(\lambda) = D_{1550} + S_{1550}(\lambda - 1550), \text{ пс/нм.} \quad (3.2)$$

Дисперсия накладывает ограничения на дальность передачи и верхнюю частоту передаваемых сигналов.

Таблица 3.1 – Параметры хроматической дисперсии ОВ G.655

Категория	D_{\min}	D_{\max}	Знак	$D_{1550}, \text{пс/нм} \cdot \text{км}$	$S_{1550}, \text{пс/нм}^2 \cdot \text{км}$
A	1,3	5,8	+	3,7	0,070
B	2,0	6,0	+	4,2	0,085
C	2,6	6,0	+	4,4	0,045
D	5,0	10,0	+	8,0	0,058
E	1,0	6,0	-	-2,3	0,065

Поляризационно-модовая дисперсия (ПМД) – основной механизм, с помощью которого все дефекты ОВ, связанные с его производством и размещением в оптическом кабеле, проявляются на характеристиках систем передачи. Влияние ПМД тем больше, чем выше скорость передачи в оптическом канале.

Главная физическая причина появления ПМД – некруглость профиля сердцевины одномодового волокна, которая обусловлена следующими факторами:

статическими:

- собственно несовершенство заводского процесса вытяжки волокон;
- скрутка волокон при изготовлении ВОК;
- изгибы ВОК и как следствие механические деформации волокон проложенного кабеля;

динамическими:

- изменение температуры окружающей среды – для ВОК, проложенного в грунте;
- динамические деформации волокон (ветровые нагрузки, вариации температуры окружающей среды, деформации вследствие оледенения кабеля) – для подвесных ВОК.

Электрическое поле световой волны всегда можно представить в виде суперпозиции двух ортогональных векторов или состояний поляризации SoP (State of Polarization). В идеальном изотропном волокне при любом таком разбиении обе компоненты распространяются с одинаковой скоростью, и в результате прохождения такой среды длительность результирующего импульса остается такой же, что и на входе в волокно. В волокне с анизотропным профилем появляются два различных эффективных показателя преломления, соответствующие двум определенным перпендикулярным линейным поляризациям. Это приводит к разным групповым скоростям распространения сигналов или мод с такими поляризациями и появлению задержки приходящих сигналов на прием-

ной стороне $\delta\tau$, которую принято называть дифференциальной групповой задержкой DGD (Differential Group Delay). Состояния поляризации, задающие самое быстрое и самое медленное распространение сигнала, называются быстрым и медленным главными состояниями поляризации PSP (Principal State of Polarization). Поскольку в традиционных ВОСП фотоприемник принимает сигнал одновременно от обоих SoP, то дифференциальная групповая задержка приводит к уширению результирующего сигнала. Оси линейных поляризаций быстрого и медленного PSP называются «быстрой» и «медленной» осями анизотропной среды (рисунок 3.3).

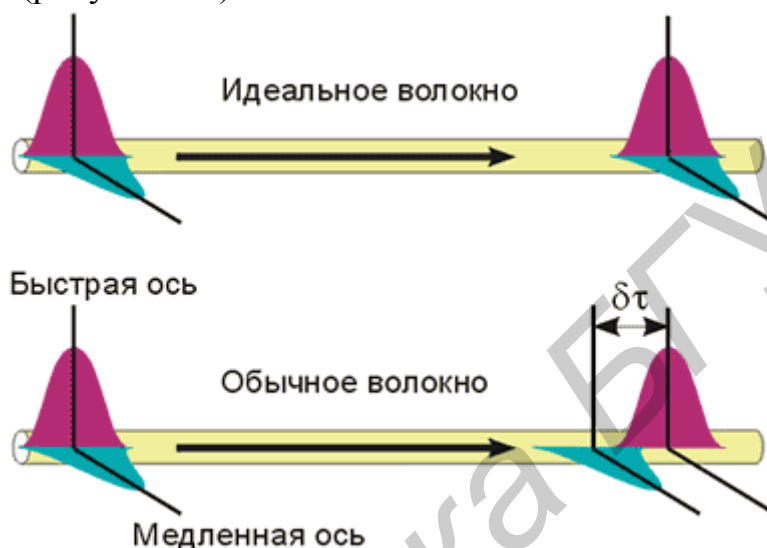


Рисунок 3.3 – Дифференциальная групповая задержка между модами двух состояний поляризации

В общем случае пассивная часть ВОСП представляет собой сложную систему, состоящую из сегментов волокон, соединенных последовательно в определенных точках путем разъёмных или неразъёмных (сварных) соединений. Отдельные участки ОВ имеют постоянные, но различные на каждом участке направления осей поляризации. В каждой из точек соединения происходит неконтролируемый и скачкообразный угловой поворот осей поляризации, что ведет к перераспределению энергии между ними в начале каждого последующего сегмента волокна. Так как направления осей поляризации соседних участков ОВ меняются случайным образом, форма и длительность оптического импульса претерпевают статистическое уширение.

Поляризационно-модовой дисперсией называют среднеквадратическое значение дифференциальной групповой задержки и определяют в соответствии с законом суммы независимых случайных величин по формуле

$$PMD(L) = \sqrt{\sum_i DGD_i(L)^2}, \quad (3.3)$$

где $DGD_i(L)$ – дифференциальная групповая задержка i -го сегмента оптического тракта, $i = 1 \dots N$, N – количество сегментов оптического тракта.

В свою очередь дифференциальная групповая задержка i -го сегмента вычисляется по формуле

$$DGD_i(L) = k_{PMD} \sqrt{L_i}, \quad (3.4)$$

где k_{PMD} – коэффициент ПМД сегмента, пс/км^{0,5}, указывается в паспортных данных на ОВ;

L_i – протяженность i -го сегмента оптического тракта, км.

Обычно ПМД измеряется в пс (10^{-12} с). Значения ПМД различных компонентов ВОСП приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Типичные значения ПМД в оптических компонентах

Компоненты ВОСП	PMD (пс)
Одномодовое оптическое волокно 1 м (приблиз.) 1 км	< 0,02 типовое > 0,5
Коннектор	< 0,01
Разветвитель	< 0,02

Несмотря на то что источником ПМД могут являться и другие активные и пассивные компоненты ВОСП, решающий вклад в ПМД вносит ОВ.

3.1.2 Нелинейные эффекты в ОВ

При организации передачи высокоскоростных данных в одномодовых ОВ возникают различные нелинейные искажения, связанные со следующими процессами (рекомендация МСЭ-T G.663).

Фазовая автомодуляция (SPM)

Является одним из первых нелинейных эффектов, который начинает проявляться при мощностях оптического сигнала примерно 8...10 мВт. SPM обусловлена зависимостью показателя преломления ОВ от интенсивности оптического сигнала. При изменении во времени интенсивности оптического сигнала изменяется показатель преломления ОВ, что и вызывает модуляцию фазы. Этот эффект называют фазовой автомодуляцией. В оптических передающих системах фазовая автомодуляция постепенно уширяет спектр сигнала вследствие изменения фазы из-за изменения оптической интенсивности (рисунок 3.4). В присутствии вызванного SPM уширения спектра сигнал испытывает более сильное временное уширение при распространении по ОВ из-за влияния хроматической дисперсии в области нормальной дисперсии ОВ (т. е. при длине волны меньше длины волны с нулевой дисперсией). Наоборот, в области аномальной дисперсии хроматическая дисперсия и SPM могут компенсировать друг друга, что приводит к меньшему уширению во времени. На этом явлении основана известная картина распространения солитона.

В общем случае влияние SPM существенно только в системах, обладающих высокой общей дисперсией, или системах с очень большой дальностью действия, таких, как подводные системы с оптическими усилителями. Системы, работающие в режиме нормальной дисперсии, которые ограничены с точки зрения дисперсии, могут не допускать дополнительных воздействий из-за SPM.

В системах WDM с очень малым разносом каналов вызванное SPM уширение спектра может также вызвать интерференцию между соседними каналами. Влияние SPM может также вызвать ухудшение при сочетании с узкополосной оптической фильтрацией. Поскольку SPM по существу является одноканальным эффектом, на нее не влияет большое количество каналов. Потери из-за искажений, вызванных SPM, увеличиваются при повышении вводимой в канал мощности. Кроме того, они увеличиваются при более высоких скоростях передачи в канале, поскольку сигналы с более высокими скоростями передачи имеют более крутые передние и задние фронты импульсов.

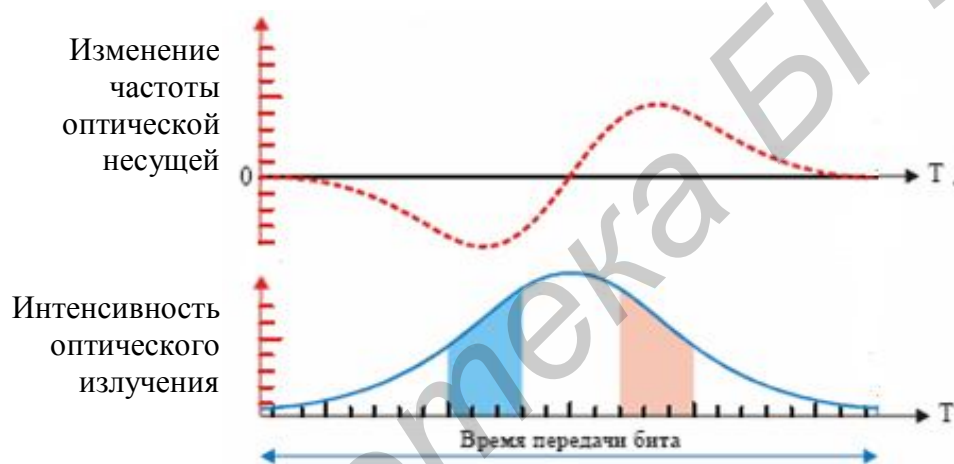


Рисунок 3.4 – Изменение во времени фазового сдвига и импульсов с линейной ЧМ, вызванное SPM

Влияние SPM может быть уменьшено при работе на длинах волн, превышающих длину волны оптического волокна с нулевой дисперсией, согласно Рекомендации МСЭ-Т G.655. Потери от SPM также уменьшаются при использовании оптических волокон с увеличенной эффективной площадью сечения волокна или с уменьшенной нелинейностью показателя преломления. Для всех конструкций оптических волокон влияние SPM может быть уменьшено при снижении вводимой в канал мощности, однако тенденции при проектировании систем требуют повышения мощности для обеспечения более протяженных участков.

Перекрестная фазовая модуляция (XPM)

В многоканальных системах изменение во времени оптической интенсивности приводит к изменениям фазы из-за взаимодействия оптических сигналов соседних каналов. Такое явление называется перекрестной фазовой модуляци-

ей. ХРМ постепенно уширяет спектр сигнала. Обусловленная ХРМ степень уширения спектра связана с разносом каналов и хроматической дисперсией ОВ, так как вызванное дисперсией различие групповых скоростей приводит к разделению взаимодействующих импульсов по мере их распространения по оптическому волокну. Если ХРМ вызывает уширение спектра, то сигнал подвергается более значительному временному уширению при распространении по ОВ из-за действия хроматической дисперсии.

Ухудшение работы системы из-за ХРМ проявляется в большей степени при уменьшении разноса каналов. Как отмечено в случае SPM, изменение фазы сигнала связано с изменением показателя преломления ОВ, которое, в свою очередь, связано с мощностью в канале. Повышение средней вводимой мощности приводит к увеличению сдвигов фазы, которые затем объединяются с явлениями дисперсии и приводят к еще большим ухудшениям работы системы.

Ухудшения от ХРМ более существенны при работе по ОВ в соответствии с Рекомендацией МСЭ-Т G.652, чем при работе по ОВ в соответствии с Рекомендациями МСЭ-Т G.653 и G.655. Уширение из-за ХРМ может привести к интерференции между соседними каналами в WDM-системах.

При любой конструкции ОВ для уменьшения влияния ХРМ необходимо снижать вводимую в канал оптическую мощность, однако при проектировании систем для обеспечения более протяженных участков ее же необходимо увеличивать.

Четырехволновое смешение (FWM)

Четырехволновое смешение (FWM) возникает тогда, когда взаимодействие двух или трех оптических сигналов с различными длинами волн формирует новые оптические сигналы, называемые продуктами смешения или боковыми полосами, на других длинах волн. Это взаимодействие происходит главным образом между сигналами в WDM-системах.

В случае двух сигналов модуляция интенсивности на частоте их биения модулирует показатель преломления ОВ и вызывает модуляцию фазы на разностной частоте. Фазовая модуляция создает две боковые полосы на частотах, определяемых этой разностью. В случае трех сигналов формируются дополнительные и более сильные продукты смешения (рисунок 3.5), которые попадают непосредственно в соседние каналы передачи сигналов, если разнос каналов совпадает с частотой. Две оптические волны, распространяющиеся по ОВ, эффективно формируют FWM, если выполняется условие согласования фаз между боковыми полосами и исходными сигналами.

Формирование боковых полос FWM может привести к существенному снижению мощности сигнала.

Кроме того, если продукты смешения попадают прямо в каналы передачи сигналов, они вызывают параметрическую интерференцию, которая проявляется как увеличение или уменьшение амплитуды импульса сигнала в зависимости от взаимодействия фаз сигнала и боковой полосы.

Параметрическая интерференция вызывает уменьшение раскрытия глаз-диаграммы на выходе приемника, что ухудшает показатели коэффициента ошибок по битам. Многоканальные системы развиваются в направлении увеличения количества каналов, что повышает количество возможных продуктов смешения, попадающих в каналы передачи сигналов.

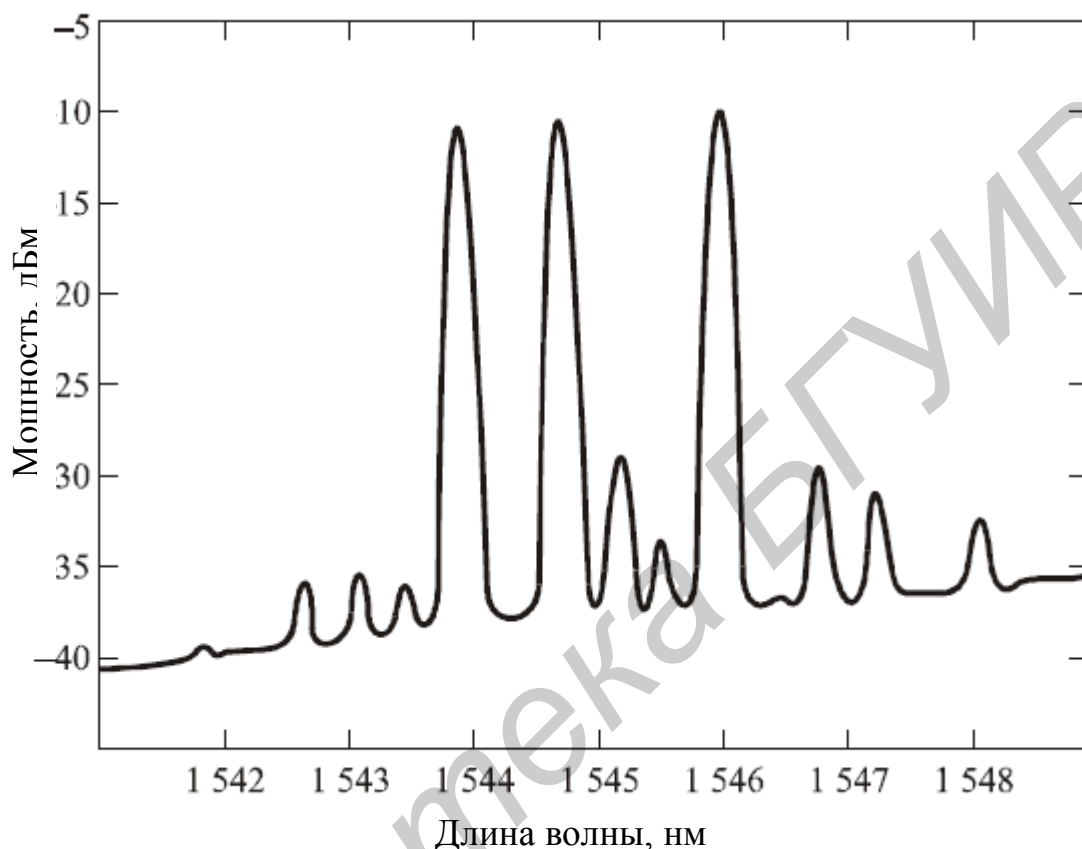


Рисунок 3.5 – Оптический спектр, измеренный на выходе волоконно-оптической линии длиной 25 км на основе ОВ со смещенной дисперсией

Вызванное FWM ухудшение работы системы может быть уменьшено за счет увеличения разноса каналов по частоте и применения хроматической дисперсии для нарушения согласования фаз между взаимодействующими волнами. Однако тенденция развития систем заключается в уменьшении разноса каналов по частоте, что позволяет использовать больше каналов в одной оптической полосе пропускания. Кроме того, поскольку вводимая в канал мощность повышается, влияние FWM (а следовательно, и ухудшение работы систем) также увеличивается.

3.1.3 Влияние линейных и нелинейных искажений

Нелинейные оптические явления, такие как SPM в одноканальных системах или XPM и FWM в системах WDM, воздействуют на систему высокоскоростной передачи с несколькими участками с полной компенсацией дисперсии.

Их воздействие увеличивается с повышением входной оптической мощности. В результате характеристики системы могут быть существенно ухудшены этими нелинейными эффектами, если вводимая в ОВ оптическая мощность становится очень большой.

Обычно влияние нелинейных эффектов на системы WDM оценивают с использованием инструментов численного моделирования.

Так как, с одной стороны, характеристики системы ухудшаются при низкой входной оптической мощности из-за малого отношения оптический сигнал/шум, получаемого на конце линии передачи, следует искать компромисс между малой входной мощностью (ограничение OSNR) и большой входной мощностью (ограничение нелинейными эффектами). В целях обеспечения наилучших характеристик системы при нахождении оптимальной рабочей точки необходимо учитывать:

- тип ОВ, используемого для передачи;
- схему компенсации дисперсии;
- длину участка;
- оптическую выходную мощность в линии;
- разнос каналов.

3.2 Оптический передатчик

Оптический передатчик характеризуется целым рядом параметров, из которых в процессе проектирования линейного тракта необходимо учитывать следующие.

1 Тип источника оптического излучения – используются лазерные диоды с несколькими продольными модами (MLM) и одной продольной модой (SLM).

2 Излучаемая оптическая мощность. Этот параметр лазерных диодов подробно описан в разделе 2.

3 Максимальная ширина спектра источников с SLM и с MLM.

Для источников с одной продольной модой (SLM) ширина спектра определяется как полная ширина наибольшего спектрального пика, измеренная на 20 дБ ниже максимальной амплитуды пика.

Максимальная (RMS) или стандартная девиация σ (нм) спектрального распределения лазера с несколькими продольными модами (MLM) относится ко всем модам лазера, которые не более чем на 20 дБ ниже пиковой моды. Эта спецификация требуется только для систем с лазером MLM на 1310 нм.

4 Частотно-модулированный импульс. Этот параметр («chirp») определен в Рекомендации МСЭ-Т G.691. Параметр линейной частотной модуляции частоты источника (также известный как параметр α) определяется следующим образом:

$$\alpha = \frac{\frac{d\varphi}{dt}}{\frac{1}{2P} \cdot \frac{dP}{dt}}, \quad (3.5)$$

где φ – оптическая фаза сигнала,
 P – мощность сигнала.

Следует отметить, что определенный таким образом параметр линейной частотной модуляции на протяжении импульса не постоянен. Следовательно, импульс может иметь нулевое значение усредненного параметра линейной частотной модуляции, и все же не будет свободен от частотной модуляции. Положительный параметр линейной частотной модуляции соответствует положительному сдвигу частоты (сдвиг в область синего участка спектра) во время нарастания импульса и отрицательному сдвигу частоты (сдвиг в область красного участка спектра) – во время спада импульса. Как правило, параметр линейной частотной модуляции модулятора лежит в пределах от -1 до $+1$ рад, тогда как переход при включении стандартного лазера может иметь параметр линейной частотной модуляции $10 \dots 100$ рад.

Спецификация частоты линейной частотной модуляции требуется для регулирования и описания изменения фазы сигнала, которая еле видна в спектре мощности, определяемом другими параметрами.

Изменение фазы сигнала может использоваться для получения «пикового качества» системы, например, за счет компрессии импульса в ходе линейной частотной модуляции, также может использоваться для изменения характера нелинейности из-за изменения мощности.

5 Собственный шум источника оптического излучения (см. раздел 2).

3.3 Оптические усилители: классификация, основные параметры

Различные категории приложений ОУ определяются в зависимости от используемой технологии и видов применения самого ОУ. По видам применения различают следующие ОУ.

Усилитель мощности – это ОУ с высоким значением мощности насыщения, предназначенное для использования непосредственно на выходе оптического передатчика для увеличения уровня мощности сигнала.

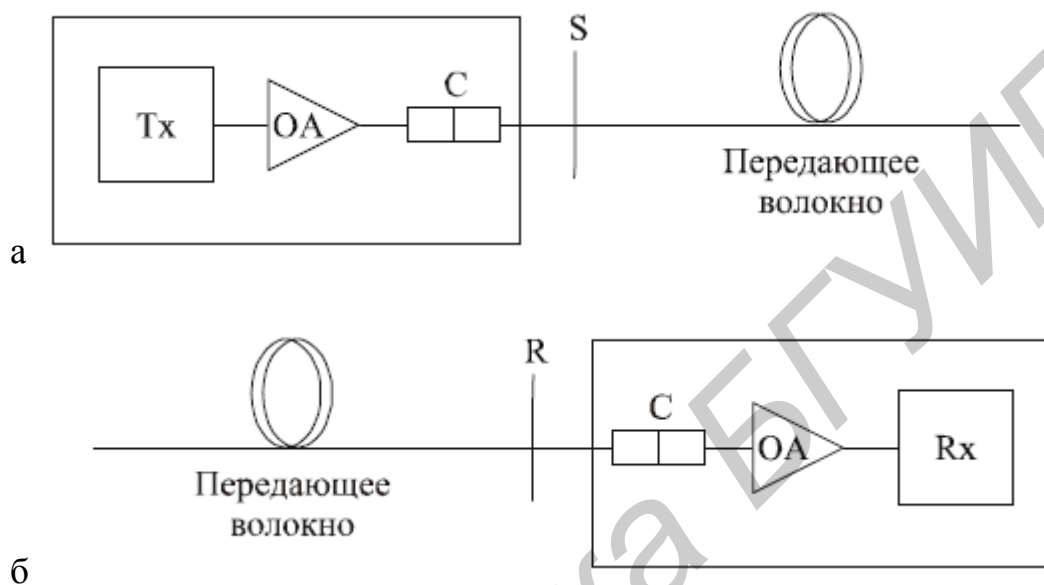
Предусилитель – это ОУ с очень низким уровнем шума, предназначенный для использования непосредственно на входе ОПР для увеличения его чувствительности.

Линейный усилитель – это ОУ с низким уровнем шума, предназначенный для использования между участками пассивного волокна для увеличения расстояния между окончанием оборудования системы передачи (участка регенерации), для компенсации потерь на ответвление в сети оптического доступа.

OAT – это подсистема, в которой усилитель мощности объединен с ОПд, что обеспечивает повышение мощности передатчика.

OAR – это подсистема, в которой предусилитель объединен с ОПр, что обеспечивает повышение чувствительности приемника.

Схемы включения оптических усилителей могут быть разнообразными. На рисунке 3.6 представлены схемы включения усилителя мощности и предварительного усилителя, С – разъемное соединение (коннектор).



а – схема включения OAT; б – схема включения OAR

Рисунок 3.6 – Схемы включения оптических усилителей

Оптические усилители, включенные в оптический тракт, рассматриваются как отдельный оптический сетевой элемент, размещенный между эталонными точками S и R (рисунок 3.7).

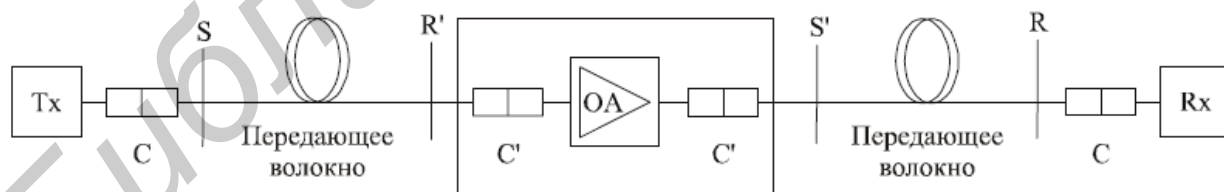


Рисунок 3.7 – Схемы включения линейных оптических усилителей

Как уже отмечалось, ОУ классифицируются по ряду признаков: месту использования в линейном тракте, количеству усиливаемых каналов, диапазону усиливаемых длин волн, способу реализации и пр. Типы ОУ и их соответствующие спецификации приведены в Рекомендациях МСЭ-Т G.661, G.662 и G.663. Определения линейных усилителей для многоканальных систем большой протяженности даны в Рекомендации МСЭ-Т G.692. Полный список общих

параметров усилителей приведен в Рекомендации МСЭ-Т G.661. При разработке конкретной системы учитывается лишь часть из этого набора параметров.

Использование ОУ в линейном тракте ВОСП приводит, с одной стороны, к увеличению протяженности участка регенерации, с другой – при проектировании оптического линейного тракта необходимо учитывать эффект накопления шумов оптических усилителей.

Независимо от назначения ОУ с точки зрения проектирования линейного тракта ОУ характеризуется следующими параметрами (рисунок 3.8):

- номинальная входная мощность сигнала;
- номинальная выходная мощность сигнала;
- усиление в режиме малого сигнала;
- номинальное усиление (коэффициент усиления);
- мощность спада усиления;
- мощность насыщения;
- коэффициент шума (NF) или шум-фактор;
- мощность усиленного спонтанного излучения;
- поляризационная чувствительность;
- спектральная ширина и равномерность коэффициента усиления в полосе усиления.

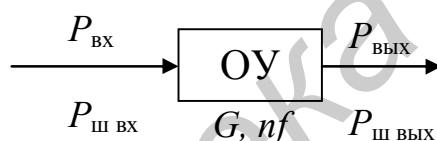


Рисунок 3.8 – Параметры оптического усилителя

Коэффициент усиления (G) – один из самых важных параметров ОУ. Коэффициент усиления зависит от длины волны сигнала, состояния поляризации на входе, мощности усиливаемого сигнала.

Коэффициент усиления измеряется или в размах или в дБ, определяется как отношение средних выходной $P_{\text{вых}}$ и входной $P_{\text{вх}}$ мощностей за вычетом вклада усиленного спонтанного излучения ASE самого усилителя:

$$G = \frac{(P_{\text{вых}}(\lambda) - P_{\text{ASE}}(\lambda))}{P_{\text{вх}}(\lambda)}, \text{раз} \quad \text{или} \quad g = 10 \lg \left(\frac{(P_{\text{вых}}(\lambda) - P_{\text{ASE}}(\lambda))}{P_{\text{вх}}(\lambda)} \right), \text{дБ}.$$

Если мощности входного и выходного сигналов выражены в логарифмических единицах (дБм), то коэффициент усиления равен разности уровней мощностей выходного $p_{\text{вых}}$ и входного $p_{\text{вх}}$ сигналов:

$$g = p_{\text{вых}} - p_{\text{вх}}. \quad (3.6)$$

Мощность насыщения – определяет максимальную выходную мощность усилителя, при которой выходная мощность равна входной; иными словами,

это мощность, при которой коэффициент усиления ОУ равен 1 (0 дБ) (рисунок 3.9). Точка спада усиления определяет выходную мощность усилителя, при которой коэффициент усиления уменьшается на 3 дБ.

Усиленное спонтанное излучение является основным источником шумов ОУ и связано непосредственно с механизмом усиления.

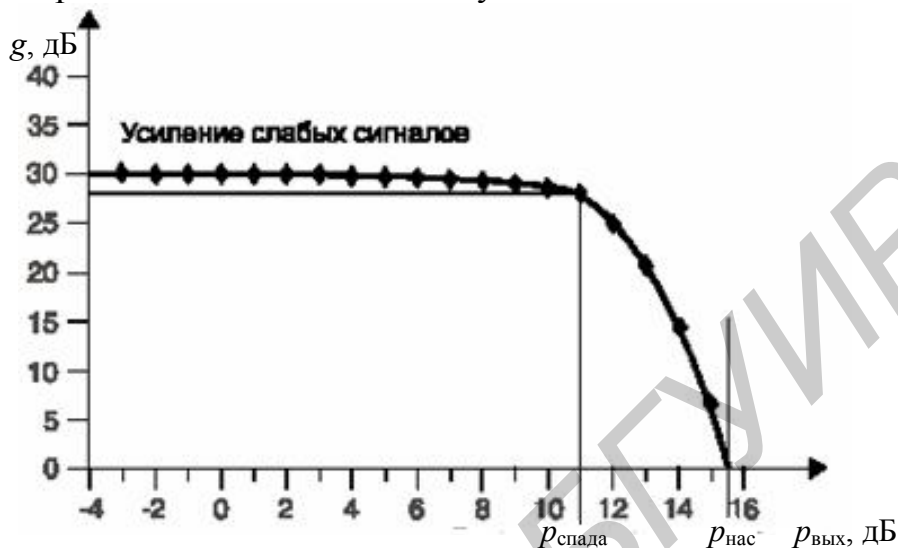


Рисунок 3.9 – Коэффициент усиления ОУ

В отсутствие входного сигнала ОУ является источником спонтанного излучения фотонов, которые, распространяясь по волокну активной зоны ОУ, тиражируются, создавая вторичные фотоны на той же длине волны, с той же фазой, поляризацией и направлением распространения, что и получило название – усиленное спонтанное излучение – ASE. Усиленное спонтанное излучение создает вклад в мощность шума на выходе ОУ величиной

$$P_{ASE} = h\nu\Delta\nu(G - 1)n_{SP}/\eta, \quad (3.7)$$

где h – постоянная Планка ($6,652 \cdot 10^{-34}$ Вт·с²);
 ν – частота сигнала, Гц;
 $\Delta\nu$ – полоса частот оптического сигнала, Гц;
 G – коэффициент усиления оптического усилителя;
 n_{SP} – коэффициент спонтанной эмиссии, зависящий от средних населенностей рабочих уровней, как правило, при $G \gg 1$ $n_{SP} = 1$;
 η – квантовая эффективность.

Отнесенная ко входу мощность усиленного спонтанного излучения идеального квантового усилителя в полосе частот сигнала $\Delta\nu$ при $G \gg 1$ и $n_{SP} \approx \eta \approx 1$ будет равна

$$P_{ASE} = h\nu\Delta\nu. \quad (3.8)$$

Для характеристики качества ОУ используется коэффициент шума nf (Noise Figure – шум-фактор). Коэффициент шума является мерой ухудшения

оптического отношения сигнал/шум (ООШ) входного когерентного сигнала при прохождении через оптический усилитель:

$$nf = OSNR_{\text{вх}} / OSNR_{\text{вых}}, \quad (3.9)$$

где $OSNR_{\text{вх}}$ – собственное ОСШ для оптического сигнала на входе ОУ;
 $OSNR_{\text{вых}}$ – ОСШ для оптического сигнала на выходе ОУ.

При прохождении сигнала через ОУ выполняются соотношения:

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} G; \quad P_{\text{ш вых}} = P_{\text{ш вх}} G \cdot nf.$$

С учетом (3.8) мощность шума на выходе ОУ имеет вид

$$P_{\text{ш вых}} = h\nu\Delta\nu \cdot G \cdot nf.$$

Теоретически минимально возможное значение коэффициента шума ОУ с большим коэффициентом усиления (при $G \gg 1$) и $n_{\text{сп}} = 2$ равно $nf = 2$ (3 дБ).

В качестве примера в таблице 3.3 приведены типовые значения параметров одноканальных мощного и предварительного усилителей.

Таблица 3.3 – Параметры одноканальных оптических усилителей

Параметр	Значение
Бустер (ВОА)	
Диапазон входной мощности, дБм	- 10...+10
Максимальная выходная оптическая мощность (при входной мощности 0 дБм, $\lambda = 1550$ нм), дБм	+22
Коэффициент усиления, дБ	20
Равномерность коэффициента усиления в полосе усиления, дБ	< 1,0
Максимально допустимое отражение на выходе, дБ	- 27
Уровень мощности ASE, дБм	< - 20
Коэффициент шума, дБ	5
Диапазон рабочих длин волн, нм	1530...1565
Предварительный оптический усилитель (РОА)	
Диапазон выходной мощности, дБм	- 16...-9
Максимальная выходная оптическая мощность, дБм	+ 9
Коэффициент усиления в режиме малого сигнала, дБ	≥ 20
Равномерность коэффициента усиления в полосе усиления, дБ	< 0,5
Максимально допустимое отражение на выходе, дБ	- 27
Диапазон рабочих длин волн, нм	1530...1565

4 ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНОГО ТРАКТА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ

4.1 Проектирование одноканальной системы по «худшему случаю»

«Худший случай» при проектировании линейного тракта – это случай, когда оптические системы в транспортных сетях определяются оптическими и

электрическими системными параметрами с их максимальными и минимальными значениями в конце срока службы (см. параметры оптических элементов и оптических интерфейсов: Рекомендации МСЭ-Т G.955, G.957, G.691, G.692, G.959.1).

Бюджеты мощности оптических систем, одноканальных (Рекомендации МСЭ-Т G.957 и G.691) и многоканальных (Рекомендация МСЭ-Т G.959.1), задаются следующими оптическими параметрами при рассмотрении для «худшего случая», определенными в соответствующем оптическом интерфейсе:

- максимальная средняя выходная мощность (канала) – $P_{S \max}$ (Вт) или $p_{S \max}$ (дБм);
- минимальная средняя выходная мощность (канала) – $P_{S \min}$ (Вт) или $p_{S \min}$ (дБм);
- максимальная средняя общая выходная мощность (для многоканальных применений) – $P_{S\Sigma}$ (Вт) или $p_{S\Sigma}$ (дБм);
- максимальное ослабление (затухание);
- минимальное ослабление (затухание);
- максимальная хроматическая дисперсия;
- минимальная хроматическая дисперсия;
- максимальная дифференциальная групповая задержка (DGD);
- максимальная средняя входная мощность (канала) – $P_{R \max}$ (Вт) или $p_{R \max}$ (дБм);
- максимальная средняя общая входная мощность (для многоканальных применений) – $P_{R\Sigma}$ (Вт) или $p_{R\Sigma}$ (дБм);
- минимальная чувствительность приемника (или минимальная эквивалентная чувствительность) – P_{R0} (Вт) или p_{R0} (дБм);
- максимальное ухудшение оптического тракта – ΔA , дБ.

Минимальная чувствительность приемника (для «худшего случая» в конце срока службы) определяется как минимальное допустимое значение средней принимаемой оптической мощности в точке MPI-R при заданном коэффициенте ошибок по битам, например, $BER = 1 \cdot 10^{-12}$. Состояние «худший случай» определяется худшими значениями параметров оптического интерфейса в точке MPI-S, ухудшением соединителя оптического приемника, измерительными допусками и влиянием старения.

Оптические системы, ограниченные по протяженности именно затуханием оптоволокна, могут работать с использованием ОУ (усилителей мощности, линейных и/или предусилителей) (Рек. МСЭ-Т G.661, G.662, G.663).

На рисунке 4.1 показана взаимосвязь оптических параметров для худшего случая.

Для определения длины участка регенерации (между окончательным оборудованием пользователя, в котором осуществляются электрооптическое и оптоэлектронное преобразования) одноканальной ВОСП без оптических усилителей достаточно воспользоваться следующей методикой. При известных для вы-

бранного оптического интерфейса уровне минимальной средней излучаемой оптическим передатчиком мощности $p_{S \min}$ и чувствительности приемника p_{R0} бюджет оптической мощности Π определяется как

$$\Pi = p_{S \min} - p_{R0}, \text{ дБ}, \quad (4.1)$$



Рисунок 4.1 – Взаимосвязь оптических параметров

Суммарные потери участка линейного тракта между точками S и R определяются по формуле

$$A_{\Sigma}(L_{\text{рг1}}) = \alpha_{\text{км}} \cdot L_{\text{рг1}} + n_{\text{р}} \cdot \alpha_{\text{р}} + n_{\text{н}}(L_{\text{рг1}}) \cdot \alpha_{\text{н}} + A_{\text{зап}} + \Delta A, \quad (4.2)$$

где $\alpha_{\text{км}}$ – километрическое затухание в оптическом волокне на заданной длине волны, дБ/км;

$L_{\text{рг1}}$ – общая длина участка регенерации, км;

$\alpha_{\text{р}}$ – затухание в разъемных соединениях, дБ;

$n_{\text{р}}$ – количество разъемных соединений в линейном тракте;

$\alpha_{\text{н}}$ – затухание в неразъемном (сварном) соединении, дБ;

$n_{\text{н}}(L_{\text{рг1}})$ – количество неразъемных соединений, которое связано с протяженностью участка регенерации и строительной длиной ОВ по формуле

$$n_{\text{н}}(L_{\text{рг1}}) = \frac{L_{\text{рг1}}}{L_{\text{стр}}} - 1, \quad (4.3)$$

где $L_{\text{стр}}$ – строительная длина оптического кабеля, км;

$A_{\text{зап}}$ – энергетический запас на ухудшение параметров оптического тракта;

ΔA – штраф по мощности оптического тракта, зависящий от влияющих на прохождение оптического сигнала по линейному тракту явлений: межсимвольных искажений, отражений и т. д.

Протяженность участка регенерации L_{pr1} находится из выражения

$$\Pi = p_{S \min} - p_{R0} = A_{\Sigma}(L_{pr1}). \quad (4.4)$$

В Рекомендации МСЭ-Т G.957 предлагаются следующие эталонные значения максимального коэффициента затухания при расчете систем: 3,5 дБ/км – для внутростанционных приложений, 0,8 дБ/км – для приложений малой дальности, 0,5 дБ/км и 0,3 дБ/км – для приложений большой дальности на длинах волн 1310 нм и 1550 нм соответственно.

4.2 Коэффициент ошибок по битам и Q -фактор

Определим связь между чувствительностью приемника p_{R0} и коэффициентом ошибок по битам (КОБ).

Чувствительность приемника, как уже отмечалось, соответствует минимальной оптической мощности на входе оптического приемника, при которой обеспечивается требуемый КОБ. В кодах применения, указанных в Рекомендациях МСЭ-Т G.691, G.692 и G.959.1, используется расчетная норма для оптического участка на КОБ не более 10^{-12} в конце срока службы. Требования для оборудования SDH взяты из Рекомендации МСЭ-Т G.826 (и более новой Рекомендации МСЭ-Т G.828), а соответствующие требования для применений OTN даются в Рекомендации МСЭ-Т G.8201. Для кодов применения, указанных в Рекомендации МСЭ-Т G.957, КОБ в конце срока службы не должен превышать 10^{-10} , так как во время их разработки предъявлялись менее строгие требования.

Как известно, КОБ непосредственно определяется электрическим отношением сигнал/шум (ЭОСШ) в точке принятия решения (регенерации), которое рассчитывается по формуле

$$Q = \frac{(\mu_1 - \mu_0)}{(\sigma_1 + \sigma_0)}, \quad (4.5)$$

где $\mu_{1,0}$ – среднее значение напряжений (токов) при передаче «1» и «0»,
 $\sigma_{1,0}$ – среднеквадратичные отклонения действующего на соответствующий электрический сигнал шума.

Шум имеет нормальное (гауссовское) распределение с нулевым средним значением. Среднеквадратичное отклонение соответствует действующему значению напряжения (тока) шума. Предполагается, что шум воздействует на оба уровня неодинаково (рисунок 4.2).

В соответствии с общей теорией приема цифровых сигналов КОБ при регенерации сигнала в двухуровневом коде определяется выражением

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right), \quad (4.6)$$

где дополнительная функция ошибок определяется как

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-x^2} dx. \quad (4.7)$$

КОБ, равному $BER = 10^{-12}$, соответствует значение $Q \approx 7,03$. Зависимость BER от значения ЭОСШ в точке принятия решения приведена на рисунке 4.3.

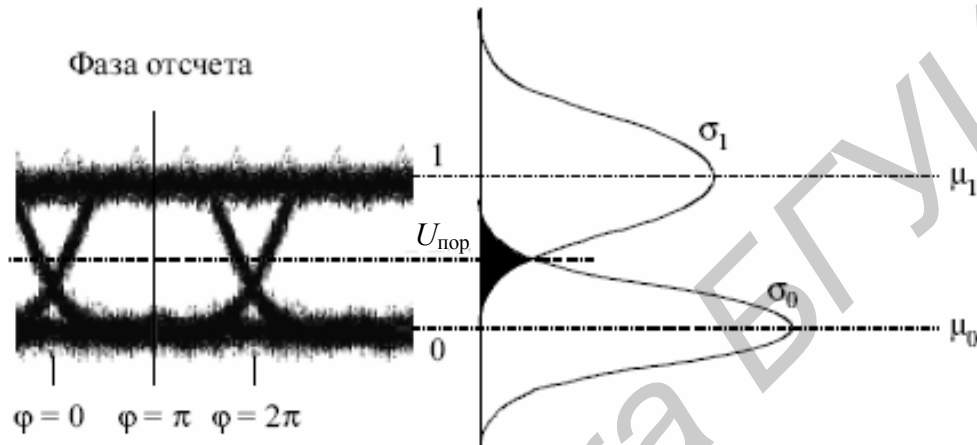


Рисунок 4.2 – Соотношение между функцией плотности вероятности и коэффициентом ошибок по битам

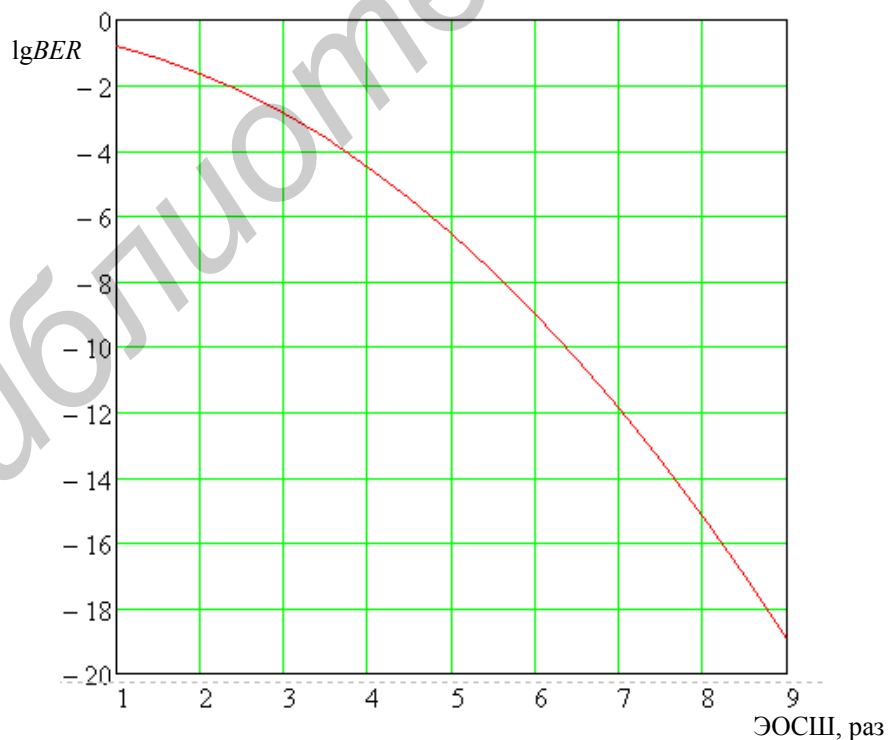


Рисунок 4.3 – Зависимость КОБ от значения ЭОСШ

Для расчета КОБ по известному значению Q могут использоваться приведенные ниже аппроксимационные функции.

Для $Q > 3$:

$$BER = \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-Q^2/2}, \quad (4.8)$$

для всех значений Q :

$$BER = \frac{e^{-Q^2/2}}{\sqrt{2\pi} \left(\left(1 - \frac{1}{\pi}\right)Q + \frac{\sqrt{Q^2 + 2\pi}}{\pi} \right)}. \quad (4.9)$$

Q -фактор можно определить как отношение электрический сигнал–шум (ЭОСШ) на входе решающей схемы приемника. ЭОСШ учитывает все явления, создающие искажения в исследуемой точке внутри оптической сети.

Если при расчете ЭОСШ учитываются только шумы оптического приемника, то чувствительность рассчитывается на основе эквивалентной шумовой схемы, представленной на рисунке 4.4. В этой модели учитываются следующие источники шумов:

- $I_{др}$ – дробовый шум фотодиода;
- $I_{тепл}$ – тепловой шум сопротивления в цепи смещения фотодиода или в цепи обратной связи в случае использования трансимпедансного усилителя;
- I_y – эквивалентный токовый источник шума усилителя, включающий тепловые и дробовые шумы усилителя;
- I_{R0} – сигнальный фототок.

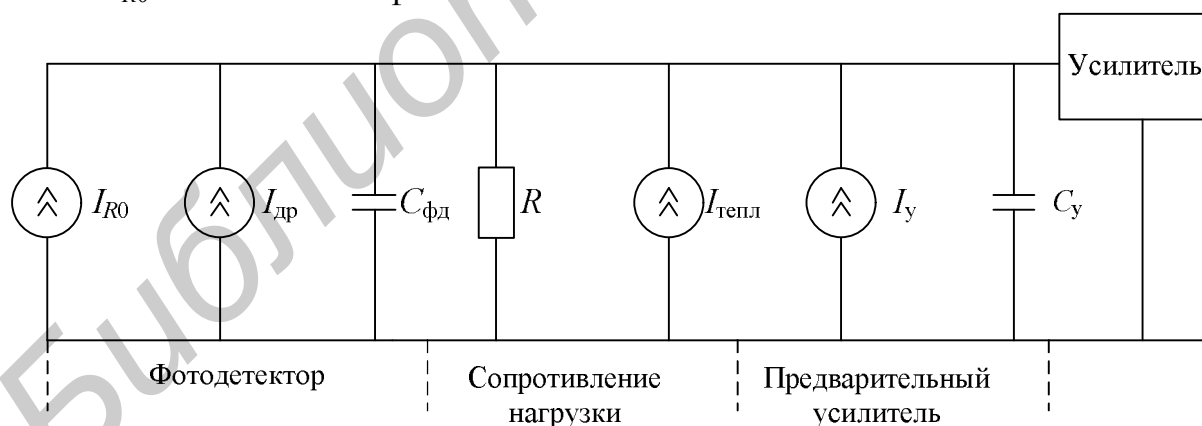


Рисунок 4.4 – Шумовая модель оптического приемника

Токовая чувствительность S оптоэлектронного преобразователя (фотодиода) определяется как отношение [1]:

$$S = I_{R0} / P_{R0}, \quad (4.10)$$

где P_{R0} – среднее значение оптической мощности, падающей на фоточувствительную площадку фотодиода, Вт;

I_{R0} – среднее значение сигнального фототока, А.

Действующее значение шумового тока, связанное с наличием дробовых шумов фотодиода, определяется выражением

$$I_{др} = (2e(I_{R0} M^{2+x} + I_T)B)^{1/2}, \quad (4.11)$$

где e – заряд электрона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

M – коэффициент лавинного умножения лавинного фотодиода (ЛФД), для р-і-n-фотодиода $M = 1$;

x – коэффициент избыточного шума ЛФД;

B – полоса пропускания оптического приемника, Гц;

I_T – темновой ток, А.

Темновой ток протекает при обратном смещении фотодетектора через нагрузку в отсутствие падающего на фотодиод излучения. Его величина зависит от материала полупроводника, температуры окружающей среды, конструкции фотоприемника. Этот ток добавляется к току полезного сигнала, когда на фотодиод поступает свет.

Действующее значение шумового тока, связанного с тепловыми шумами сопротивления нагрузки R , определяется выражением

$$I_{тепл} = (4kTB/R)^{1/2}, \quad (4.12)$$

где k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

T – абсолютная температура, К;

R – сопротивление нагрузки, Ом.

При этом сопротивление нагрузки R и суммарная емкость входной цепи $C_{\Sigma} = C_{фд} + C_y$ выбираются таким образом, чтобы обеспечить требуемую неравномерность в полосе частот сигнала. При допустимой неравномерности в полосе пропускания β дБ сопротивление нагрузки R выбирается из условия

$$R = \frac{\sqrt{10^{0,1\beta} - 1}}{2\pi B C_{\Sigma}}. \quad (4.13)$$

Полный шумовой ток оптического приемника I_{Σ} определяется как среднеквадратичное значение всех источников шумов (дробового, теплового и шумов предварительного усилителя):

$$I_{\Sigma} = (I_{др}^2 + I_{тепл}^2 + I_y^2)^{1/2}. \quad (4.14)$$

Результирующее выражение для расчета ЭОСШ (Q -фактора) будет иметь вид

$$Q = \frac{P_{R0}SM}{I_{\Sigma}}. \quad (4.15)$$

Из этого выражения и определяется та минимальная оптическая мощность P_{R0} на входе оптического приемника (в точке R), при которой и обеспечивается заданный КОБ.

4.3 Влияние дисперсионных свойств оптического волокна на протяженность оптического тракта

Наличие в оптическом линейном тракте дисперсионных явлений учитывается заведомым превышением чувствительности оптического приемника p_R на величину, равную штрафу по мощности ΔA .

$$p_{R \min} = p_{R0} + \Delta A. \quad (4.16)$$

Рассмотрим этот механизм более подробно.

В процессе распространения по ОВ длительность оптических импульсов увеличивается – импульсы уширяются. При достаточно большом уширении импульсы начинают перекрываться – возникают межсимвольные искажения, приводящие к неправильному восстановлению импульсов в процессе регенерации и увеличению коэффициента ошибок по битам.

Явление уширения импульсов – *дисперсия* – имеет размерность времени и определяется как квадратичная разность длительностей импульсов на выходе τ_R и входе τ_S оптического кабеля длиной L :

$$\tau(L) = \sqrt{\tau_R^2 - \tau_S^2}. \quad (4.17)$$

При этом уширение импульса не должно превышать величины, при которой возникающие межсимвольные искажения приводят к ухудшению КОБ, определенного соответствующим оптическим интерфейсом. Для аппроксимации формы импульса как на входе, так и на выходе ОВ удобно воспользоваться гауссовой функцией (рисунок 4.5):

$$P(t, \sigma) = P_m e^{-t^2 / 2t_0}, \quad (4.18)$$

где t_0 – длительность импульса по уровню $1/\sqrt{e}$.

Если предположить, что половина длительности входного импульса по уровню половинной мощности (уровню 0,5) равна τ_1 ($\tau_R = 2\tau_1 = T$), то с параметром t_0 она связана соотношением

$$\tau_1 = t_0 \sqrt{2 \ln 2}. \quad (4.19)$$

Для оценки межсимвольной помехи, связанной с дисперсией в ОВ, используется ε -параметр, численно равный доле тактового интервала, до которого

допускается уширение импульса (по уровню половинной мощности) при допустимом ухудшении оптического тракта из-за хроматической дисперсии. Если предположить, что дисперсия в ОВ приводит к межсимвольным искажениям и мешающее влияние в момент регистрации импульса на соседнем тактовом интервале оценивается как P_{Π} (рисунок 4.5), то это приведет к ухудшению ОСШ в момент регистрации.

В таблице 4.1 приведены значения ε -параметра для некоторых значений штрафа по мощности.

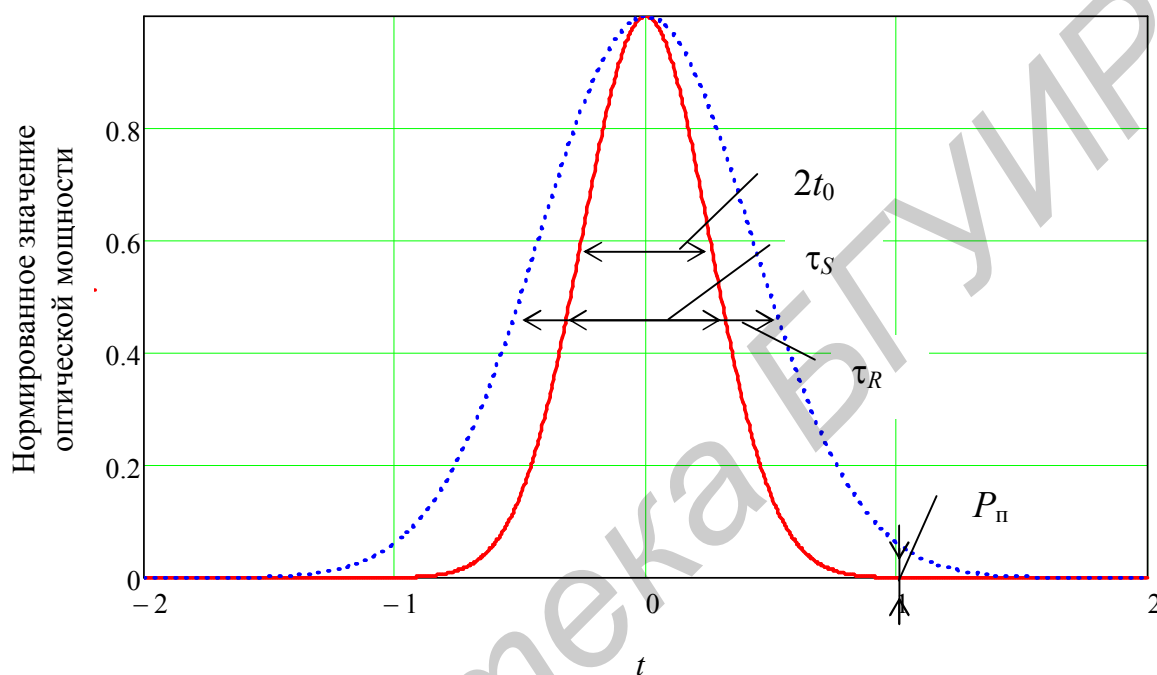


Рисунок 4.5 – К определению хроматической дисперсии

Таблица 4.1 – Ухудшение мощности для некоторых значений ε -параметра

Штраф по мощности ΔA , дБ	ε -параметр
0,5	0,203 \approx 0,2
1	0,305 \approx 0,3
2	0,491 \approx 0,48

При передаче сигнала по одномодовому ОВ уширение импульсов происходит за счет хроматической и поляризационно-модовой дисперсий.

Хроматическая дисперсия D в одномодовом ОВ является комбинацией материальной и волноводной дисперсий. Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления волокна от длины волны. Волноводная дисперсия обусловлена зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны.

С точки зрения передатчика это происходит по двум причинам.

Одна причина – это наличие разных длин волн в оптическом спектре источника (рисунок 2.4). Каждая длина волны имеет отличающиеся фазовую за-

держку и групповую задержку в волокне, поэтому выходной импульс искажается во времени.

Другой причиной является модуляция источника, которая сама имеет два явления. Первое явление заключается в том, что в модулированном сигнале содержатся частоты разложения Фурье. При увеличении битовых скоростей ширина частот модуляции сигнала тоже увеличивается и может стать сравнимой с шириной оптических частот источника или может ее превысить.

Другое явление заключается в частотной модуляции, которая появляется, когда спектр длин волн источника изменяется на протяжении импульса. Принято, что положительный частотно-модулированный импульс в передатчике присутствует тогда, когда во время нарастания/спадания импульса спектр сдвигается в сторону коротких/длинных волн соответственно.

При положительном коэффициенте дисперсии волокна более длинные волны задерживаются по отношению к более коротким длинам волн. Следовательно, если знаком произведения частотной модуляции и дисперсии является плюс, то два процесса объединяются для образования расширения импульса. Если произведение отрицательно, то может появиться сжатие импульса на начальном участке волокна, далее ширина импульса достигнет минимума, а затем будет расширяться снова вместе с возрастанием дисперсии.

Для расчета хроматической дисперсии используется методика, изложенная в [5], где вид линейного кодирования учитывается заполнением тактового интервала f , при этом для кода RZ $f < 1$, для кода NRZ $f = 1$. При битовой скорости передачи B , бит/с, в волокне длиной $L_{\text{пр2}}$ км с коэффициентом дисперсии D пс/(км·нм), на средней длине волны источника λ , м (не в нм) максимальная допустимая для участка оптического тракта хроматическая дисперсия будет равна

$$DL_{\text{пр2}} = \frac{c\varepsilon \cdot 10^3}{\lambda^2 B \left(\left(\frac{B}{\pi f} \right)^2 + \sigma_v^2 \right)^{0,5}}, \text{ пс/нм}, \quad (4.20)$$

где c – скорость света, $c = 299792458$ м/с;

σ_v – среднеквадратичная ширина спектра излучения источника (по уровню $1/e^{1/2}$) в частотной области;

ε – параметр, численно равный доле тактового интервала, до которого допускается уширение импульса (по уровню половинной мощности) при допустимом штрафе оптического тракта из-за хроматической дисперсии.

На практике используется гауссова аппроксимация спектра излучаемой лазерным диодом оптической мощности:

$$P(\lambda) = P_m e^{-\lambda^2 / 2\sigma_\lambda}, \quad (4.21)$$

где σ_λ – среднеквадратичная ширина спектра излучения источника.

Ширина (по уровню минус 20 дБ) спектра длин волн Γ_λ связана со среднеквадратичной шириной спектра соотношением

$$\Gamma_\lambda = 2\sqrt{2 \ln 100} \cdot \sigma_\lambda = 6,0697 \cdot \sigma_\lambda. \quad (4.22)$$

В свою очередь ширина (по уровню минус 20 дБ) спектра длин волн Γ_λ связана с шириной (по уровню минус 20 дБ) спектра источника на оптической частоте Γ_ν формулой

$$\Gamma_\lambda = \frac{\lambda^2}{c} \Gamma_\nu. \quad (4.23)$$

Как видно из формулы 4.20, среднеквадратичная ширина спектра модулированного источника равна сумме ширины спектров модуляции и оптической частоты:

$$\left(\left(\frac{\pi B}{f} \right)^2 + \sigma_\nu^2 \right)^{0,5}. \quad (4.24)$$

Произведение $DL_{\text{пр}2}$ определяет допустимую хроматическую дисперсию в ОВ, которая нормируется в оптическом интерфейсе в расчете на 1 нм ширины спектра излучения источника и измеряется в пс/нм.

К уменьшению хроматической дисперсии ведет использование более когерентных источников излучения (с меньшей шириной спектра излучения) и рабочей длиной волны, близкой к длине волны нулевой дисперсии.

На рисунке 4.5 в качестве примера приведено семейство графиков, рассчитанных по формуле (4.20) при $\varepsilon = 0,3$ (штраф оптической мощности не более 1 дБ) и разных значениях битовой скорости $B = 2,5; 10; 40$ Гбит/с в зависимости от ширины спектра излучения источника. Как видно из рисунка, с увеличением ширины спектра источника уменьшается максимальная допустимая хроматическая дисперсия. Однако с увеличением скорости передачи это уменьшение не так ярко выражено, так как растет влияние ширины спектра модуляции.

Допустимую протяженность участка регенерации можно определить непосредственно из формулы (4.25):

$$L_{\text{пр}2} = \frac{c\varepsilon \cdot 10^3}{D\lambda^2 B \left(\left(\frac{\pi B}{f} \right)^2 + \sigma_\nu^2 \right)^{0,5}}, \text{ км}. \quad (4.25)$$

Можно также воспользоваться графиками рисунка 4.6, разделив соответствующее значение $DL_{\text{пр}2}$ при известной ширине спектра излучения источника на значение километрической хроматической дисперсии D , пс/нм·км.

Итак, при определении протяженности участка регенерации при работе по ОВ с учетом дисперсионных свойств оптического линейного тракта используется условие: максимальное значение хроматической дисперсии в оптическом линейном тракте не должно превышать значений, при которых ухудшение оптического тракта по мощности ΔA превысило бы заданное значение, определяемое ε -параметром (см. таблицу 4.1).

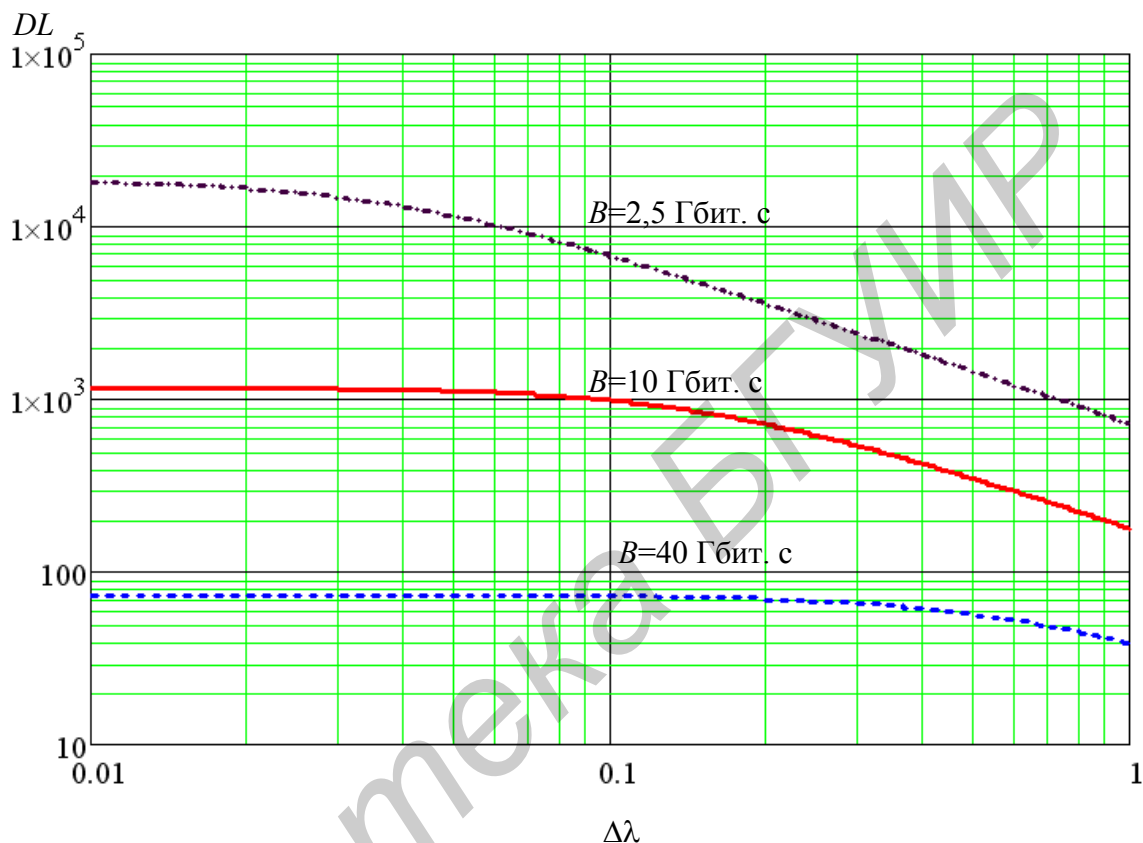


Рисунок 4.6 – Зависимость произведения DL от ширины спектра излучения источника

Из двух величин протяженности участка регенерации при работе по ОВ, рассчитанных с учетом дисперсионных свойств оптического линейного тракта (L_{pr2}) и энергетических свойств (L_{pr1}), выбирается наименьшее значение, которое и будет являться протяженностью участка регенерации волоконно-оптической линии связи.

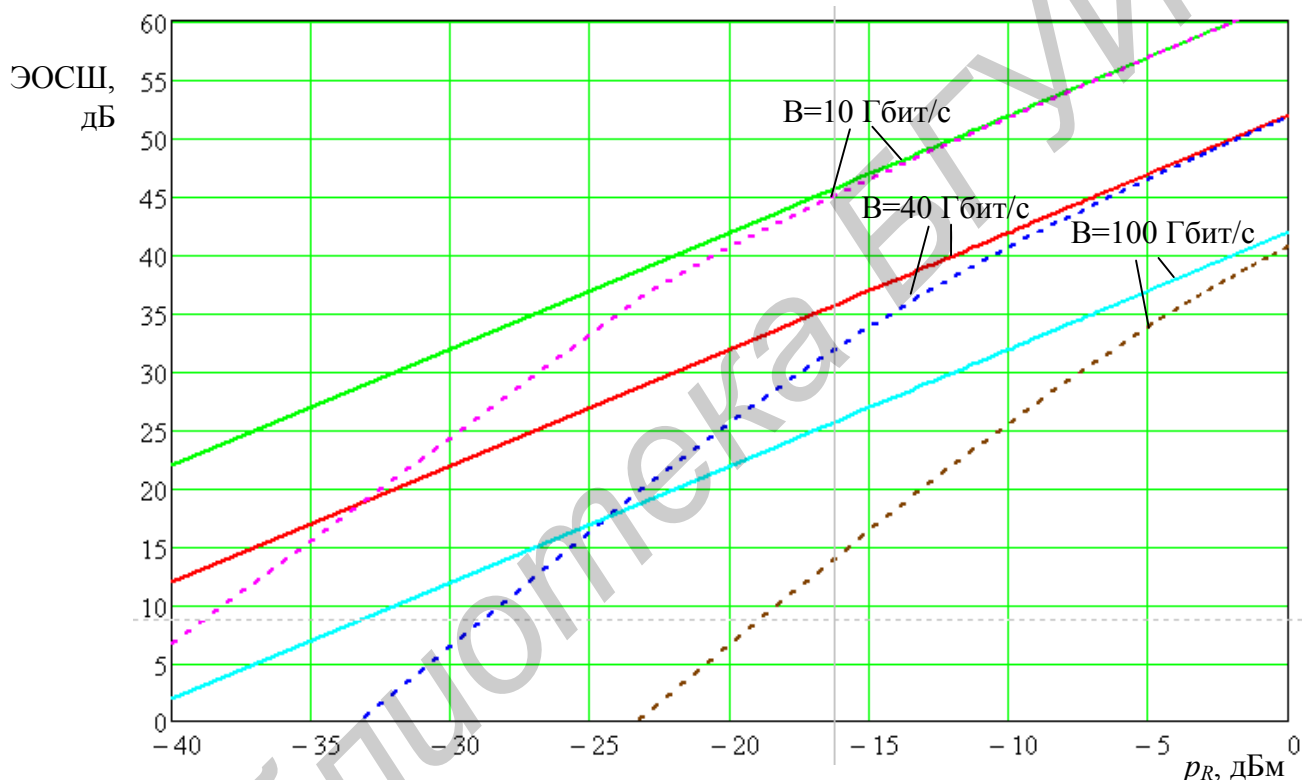
Если в результате расчетов $L_{pr2} > L_{pr1}$, можно сделать вывод, что реальное ухудшение по мощности оптического тракта за счет влияния хроматической дисперсии будет меньше допустимого значения ΔA .

Если же оптические системы ограничены по длине передачи хроматической дисперсией волокна $L_{pr2} < L_{pr1}$, необходимо реализовывать определенные процессы компенсации дисперсии (см. Рекомендацию МСЭ-Т G.691) для преодоления ограничения на протяженность линейного тракта.

Еще раз следует напомнить, что ухудшения по мощности, связанные с оптическим трактом (такие, как хроматическая дисперсия волокна или поляри-

зационно-модовая дисперсия, шумы оптических усилителей и т.п), учитываются в максимальном ухудшении оптического тракта, а не в минимальной чувствительности приемника. При этом минимальная усредненная оптическая мощность на входе приемника должна превышать минимальную чувствительность приемника на величину ухудшения оптического тракта.

На рисунке 4.7 представлены графики, отражающие зависимость электрического ОСШ в точке регенерации от падающей на фотодетектор оптической мощности (чувствительности оптического приемника). Как видно из рисунка, в случае достаточно больших уровней входной мощности или когда преобладают дробовые шумы оптического приемника, изменение чувствительности на 1 дБ приводит к изменению ЭОСШ также на 1 дБ. Для малых уровней входной мощности это условие выполняется с запасом.



Сплошная линия – ОСШ с учетом только дробовых шумов оптического приемника
 Пунктирная линия – ОСШ с учетом дробовых и тепловых шумов оптического приемника

Рисунок 4.7 – Связь между чувствительностью и ОСШ в точке регенерации

Влияние PMD на передачу оптического сигнала в соответствии с [5] учитывается следующим образом. При передаче цифровых сигналов в коде NRZ со скоростями до 40 Гбит/с PMD устанавливается в размере 0,3 длительности тактового интервала, что соответствует ухудшению (штрафу по мощности) оптического тракта $\Delta A = 1$ дБ, и 0,2 длительности тактового интервала для ухудшения оптического тракта $\Delta A = 0,5$ дБ.

4.4 Расчет оптического отношения сигнал/шум цепочки оптических усилителей

В линии связи, использующей разнообразные оптические сетевые элементы, необходим учет и их источников шумов, что учитывается оптическим ОСШ (ООСШ).

В системах, в которых последовательно включены ОУ, шум ASE накапливается от вкладов всех ОУ. Поэтому ООСШ ухудшается после каждого ОУ. Показатель ООСШ полезен для наблюдения и определения рабочей характеристики оптического усилителя. Для оценки ООСШ при проектировании для худшего случая в [5] предлагается следующая методика.

Для многоканальной системы с числом пролетов N , с усилителем мощности, с числом линейных усилителей $N-1$ и с предусилителем предполагается, что:

- все оптические усилители в цепочке, включая усилитель мощности и предусилитель, имеют одну и ту же величину шума;
- потери (для канала) на всех пролетах одинаковы;
- выходные мощности (для канала) усилителя мощности и линейных усилителей одинаковы.

В этом случае ООСШ на входах канальных оптических приемников (в точках R_i на рисунке 1.1 (см. раздел 1), где $i = 1, \dots, n$) можно аппроксимировать так:

$$OSNR = P_{\text{вых}} - L - nf - 10 \lg \left(N + \frac{10^{0,1G_{BA}}}{10^{0,1L}} \right) - 10 \lg \left(\frac{h\nu\Delta\nu}{P_0} \right), \quad (4.26)$$

где $P_{\text{вых}}$ – выходная мощность (для канала) усилителя мощности и линейных усилителей в дБм;

L – потери на пролете усилительного участка в дБ, предполагаются равными усилению линейного усилителя;

G_{BA} – усиление оптического усилителя мощности в дБ (бустера);

nf – коэффициент шума самопроизвольной эмиссии оптического усилителя в дБ;

$N-1$ – общее число линейных усилителей;

ν – оптическая частота передачи канального сигнала;

$\Delta\nu$ – полоса частот, занимаемая оптическим канальным сигналом, обычно $\Delta\nu$ численно равна удвоенному значению скорости передачи канального сигнала B ;

P_0 – эталонная мощность, равная 1 мВт.

Выражение (4.26) показывает, что шум ASE накапливается от $N + 1$ усилителей, а ООСШ от усилителя к усилителю уменьшается. На рисунке 4.8 в качестве примера приведен график изменения ООСШ в линейном тракте, содер-

жащем 10 ОУ с коэффициентом шума 5 дБ и протяженностью усилительного участка 30 км.

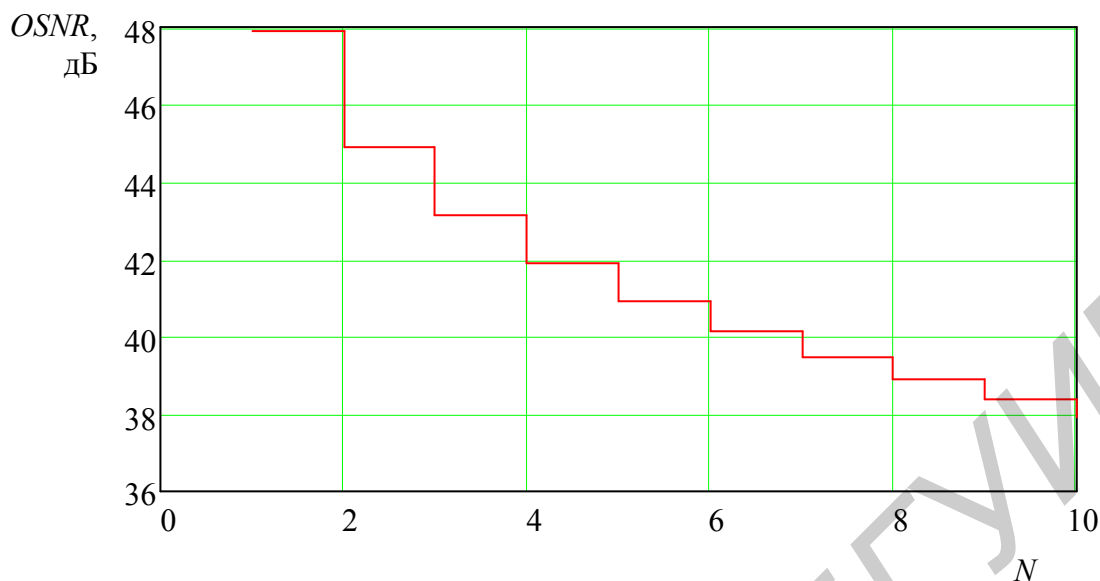


Рисунок 4.8 – Изменение ОСНШ в линейном тракте с ОУ

Если усиление оптического усилителя мощности примерно такое же, как у линейных усилителей, т.е. $G_{BA} \approx L$, то уравнение (4.26) примет вид

$$OSNR = P_{\text{вых}} - L - nf - 10 \lg(N + 1) - 10 \lg \left(\frac{h\nu\Delta\nu}{P_0} \right). \quad (4.27)$$

Если потери на пролете L (соответствующие усилению линейного усилителя) значительно превышают усиление ОУ мощности G_{BA} , шумом ASE усилителя мощности можно пренебречь. В этом случае выражение (4.27) можно упростить:

$$OSNR = P_{\text{вых}} - L - nf - 10 \lg(N) - 10 \lg \left(\frac{h\nu\Delta\nu}{P_0} \right). \quad (4.28)$$

Для однопролетного оптического участка, имеющего только ОУ мощности, ОСНШ определяется выражением

$$OSNR = P_{\text{вых}} - G_{BA} - nf - 10 \lg \left(\frac{h\nu\Delta\nu}{P_0} \right). \quad (4.29)$$

В случае одного пролета, имеющего только предусилитель, выражение (4.27) изменяется так:

$$OSNR = P_{\text{вых}} - L - nf - 10 \lg \left(\frac{h\nu\Delta\nu}{P_0} \right). \quad (4.30)$$

Определим минимальное допустимое значение оптического ОСШ, при котором результирующее ОСШ (с учетом шумов как собственно оптического приемника, так и шумов оптических усилителей) не приводило к увеличению КОБ выше заданного.

Как известно, на выходе оптического приемника в точке принятия решения результирующее ОСШ (Q_{Σ} , раз) должно быть таким, чтобы обеспечить требуемый коэффициент ошибок $BER = 10^{-12}$.

В случае пренебрежения шумами оптического линейного тракта ЭОСШ (учитываются только шумы оптического приемника) в точке принятия решения равно Q_1 , в раз, или $q_1 = 20 \lg Q_1$, дБ.

При наличии шумов в оптическом линейном тракте ООСШ на входе оптического приемника равно Q_0 , в раз, или $q_0 = 10 \lg Q_0$, дБ. Однако на выходе оптического приемника (в предположении, что используется идеальный нешумящий приемник) соответствующее ему электрическое ОСШ при той же падающей оптической мощности будет также равно Q_0 , в раз, или $q_{RO} = 20 \lg Q_{RO}$, дБ, что эквивалентно $q_{RO} = 2q_0$.

Результирующее электрическое отношение сигнал/шум (Q_{Σ} или q_{Σ}) в точке принятия решения при учете шумов оптических усилителей и оптического приемника будет равно

$$\frac{1}{Q_{\Sigma}} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_1}, \text{ раз.} \quad (4.31)$$

Наличие шумов ОУ приводит к уменьшению результирующего ОСШ q_{Σ} на ΔA дБ или уменьшению Q_{Σ} в $da = 10^{0,1\Delta A}$ раз:

$$Q_{\Sigma} = Q_1 / da, \text{ раз,}$$

$$q_{\Sigma} = q_1 - \Delta A, \text{ дБ.}$$

Из которых следует, что оптическое ОСШ Q_0 для заданного Q_{Σ} не может быть меньше

$$Q_0 \geq \frac{da}{da - 1} \cdot Q_{\Sigma}. \quad (4.32)$$

На рисунке 4.9 приведены графики, связывающие оптическое ОСШ на входе оптического приемника с результирующим электрическим ОСШ в точке принятия решения при разных значениях ухудшения ЭОСШ (0,5; 1; 2 дБ). Из выражения (4.6) можно определить, что для обеспечения требуемого коэффициента ошибок $BER = 10^{-12}$ в точке принятия решения ЭОСШ должно быть равно $Q_1 = 7,03$ ($q_1 = 16,94$ дБ). При наличии в линейном тракте оптических усилителей и возможном ухудшении ОСШ в точке принятия решения на 0,5, 1 или 2 дБ, оптическое ОСШ на входе оптического приемника должно быть не хуже соответственно 18,1, 15,3 или 12,8 дБ.

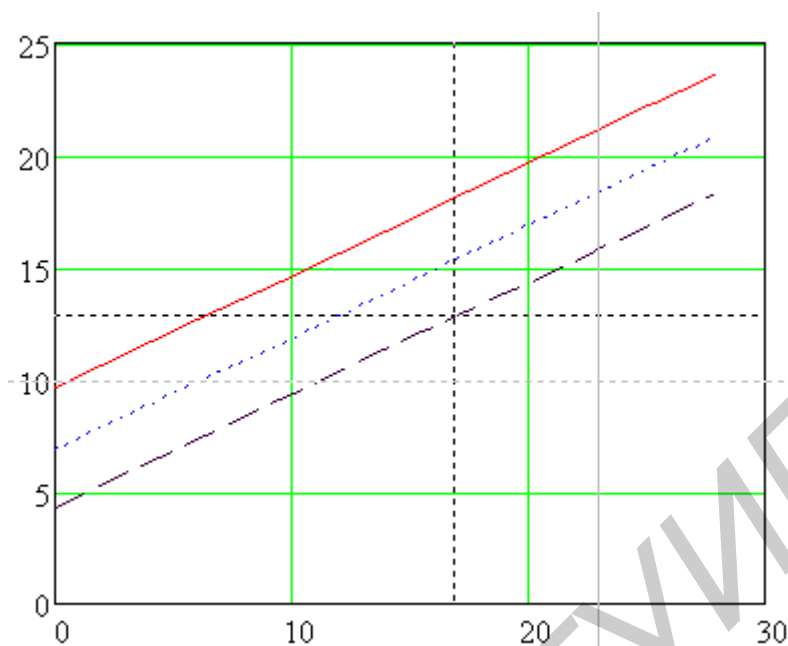


Рисунок 4.9 – Связь ООСШ (Q_o) и ЭОСШ(Q_{Σ})

4.5 Оптическое перекрестное влияние

4.5.1 Основные определения

В силу неустоявшейся терминологии в данной области в таблице 4.2 даны определения терминов, используемых для описания оптических переходных (перекрестных) помех и их влияний. В 15-й Исследовательской комиссии МСЭ-Т согласовано, что термин «перекрестное влияние» (crosstalk) используется для описания влияний на систему, а термин «переходное затухание» (isolation) используется для свойств компонентов.

Перекрестные влияния можно разделить на два вида: межканальное и интерферометрическое.

Таблица 4.2 – Применяемые термины

Параметр, единица измерения	Символ	Рек. МСЭ-Т	Определение
1	2	3	4
Системные параметры			
Межканальное перекрестное влияние, дБ	C_c	G.692	Отношение полной мощности в мешающих каналах к мощности в необходимом канале. Необходимый и мешающие каналы располагаются на разных длинах волн

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4
Интерферометрическое перекрестное влияние, дБ	CI		Отношение мешающей мощности (не включая ASE) к необходимой мощности внутри одного канала (длины волны). Этот параметр известен также как «внутриканальное перекрестное влияние»
Ухудшение по межканальному перекрестному влиянию, дБ	PC		Ухудшение, выделенное в бюджете системы для учета межканального перекрестного влияния
Ухудшение по интерферометрическому перекрестному влиянию, дБ	PI		Ухудшение, выделенное в бюджете системы для учета интерферометрического перекрестного влияния
Разность мощностей каналов, дБ	d	G.959.1	Максимальная допустимая разность мощностей каналов, подаваемых к какому-либо устройству
Коэффициент гашения	r	G.691	Отношение мощности в середине логической «1» к мощности в середине логического «0»
Ухудшение по закрытию «глаз-диаграммы», дБ	E		Ухудшение по чувствительности приемника из-за всех влияний на закрытие «глаза». Это охватывает закрытие «глаза» от передатчика и ухудшение из-за хроматической дисперсии
Компонентные параметры			
Потеря из-за вставки, дБ	I_L	G.671	Снижение мощности от входного порта к выходному на длине волны необходимого канала
Однонаправленное переходное затухание, дБ	I	G.671	Разность между потерей устройства на длине волны мешающего канала и потерей на длине волны необходимого канала
Переходное затухание соседнего канала, дБ	I_A	G.671	Переходное затухание устройства на длинах волн одного канала, расположенного выше или ниже необходимого канала
Переходное затухание несоседних каналов, дБ	I_{NA}	G.671	Переходное затухание устройства на длинах волн всех мешающих каналов, исключая соседние каналы

4.5.2 Межканальное перекрестное влияние

Наиболее общей рассматриваемой причиной этого явления является не совершенное демультиплексирование многоканального сигнала передачи в отдельные каналы до установки одноканальных приемников (рисунок 4.10). В оптическом демультиплексоре системы с DWDM групповой оптический сигнал, состоящий из k канальных оптических сигналов, поступает на общий порт демультиплексора. Худшим случаем для отдельного канала является случай, когда его мощность минимальна, а мощность других каналов – максимальны.

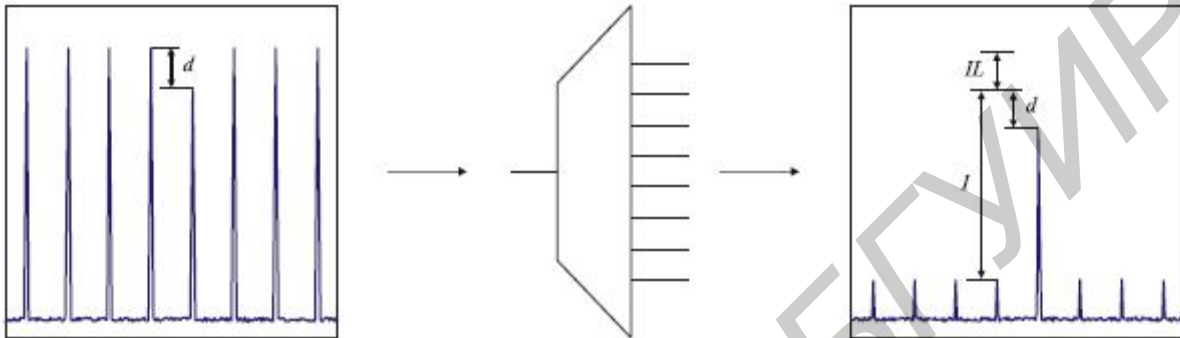


Рисунок 4.10 – Оценка перекрестных влияний демультиплексора

На рисунке 4.10 обозначена максимальная допустимая разность между уровнями мощности канальных сигналов d , дБ. Когда каналы появляются на индивидуальных выходных портах, уровень мощности мешающего канала снижен по сравнению с уровнем мощности информационного канала на величину, равную однонаправленному переходному затуханию I (дБ).

Главным параметром, который определяет максимальный уровень оптического перекрестного влияния, допустимый в рассматриваемой оптической системе, является ухудшение по межканальному перекрестному влиянию P_C . Определим, исходя из этого, необходимые параметры переходного затухания демультиплексора.

Если предположить, что $k \gg 1$ и уровни мощности мешающих сигналов одинаковы, то межканальное перекрестное влияние C_C в k -канальной системе рассчитывается следующим образом:

$$C_C = d - I + 10 \lg(k - 1), \text{ дБ.} \quad (4.33)$$

В реальных демультиплексорах значение переходного затухания I_A для каналов, непосредственно соседних с исследуемым, будет меньше, чем переходное затухание I_{NA} для несоседних мешающих каналов. Соотношение уровней мощностей в каналах на выходе реального демультиплексора изображено на рисунке 4.11. Выражение для расчета межканального перекрестного влияния C_C в этом случае имеет вид

$$C_C = d + 10 \lg(2 \cdot 10^{-0,1I_A} + (k - 3)10^{-0,1I_{NA}}), \text{ дБ.} \quad (4.34)$$

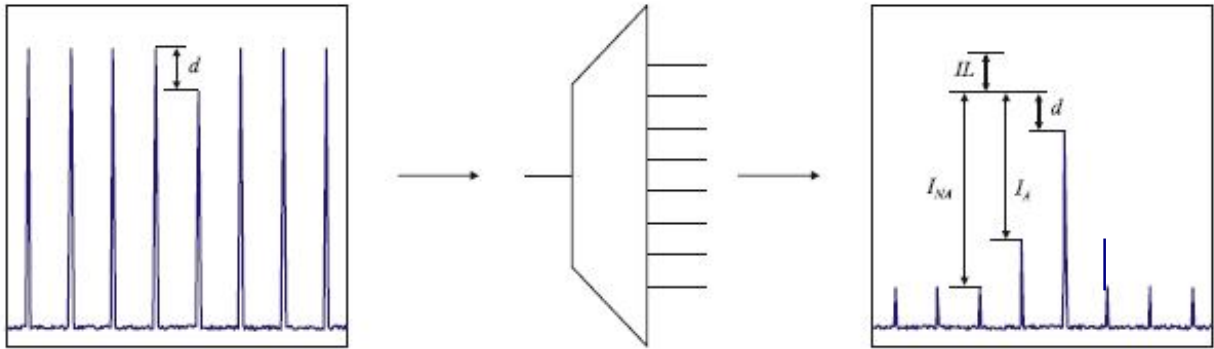


Рисунок 4.11 – Пример реального демультиплексора

В этой ситуации, однако, разные значения I_A и I_{NA} могут образовать системы с различными ухудшениями по межканальному перекрестному влиянию P_C при одном и том же значении полного C_C . Для одного мешающего канала:

$$P_C = 10 \lg \left(1 - 10^{0,1C_C} \frac{r+1}{r-1} \right), \text{ дБ}, \quad (4.35)$$

где r – линейный коэффициент гашения, характеризующий раскрыв глаз-диаграммы.

Для очень большого числа мешающих каналов с одинаковыми амплитудами (с некоррелированными данными) межканальное перекрестное влияние становится похожим на шум, поэтому можно предположить гауссову аппроксимацию. В этом случае для образования действительного ухудшения должна применяться свертка похожего на шум перекрестного влияния с распределением шума приемника (или ASE). Следуя методам из [14] и [15] и используя гауссову аппроксимацию биномиального распределения, получим следующее выражение:

$$P_C = -5 \lg \left(1 - \frac{10^{0,2C_C}}{k-1} Q^2 \left(\frac{r+1}{r-1} \right)^2 \right), \text{ дБ}, \quad (4.36)$$

где Q определяется из выражения (4.6), например, $Q \approx 7,03$ для $BER = 10^{-12}$.

На рисунке 4.12 представлена зависимость ухудшения оптического тракта P_C от межканального перекрестного влияния C_C для разных предположений. Фактическое ухудшение в реальной системе находится ниже самой верхней кривой.

Ухудшение по перекрестному влиянию может также зависеть от линейного кода (RZ или NRZ) и от отношения битовых скоростей исследуемого и мешающих сигналов.

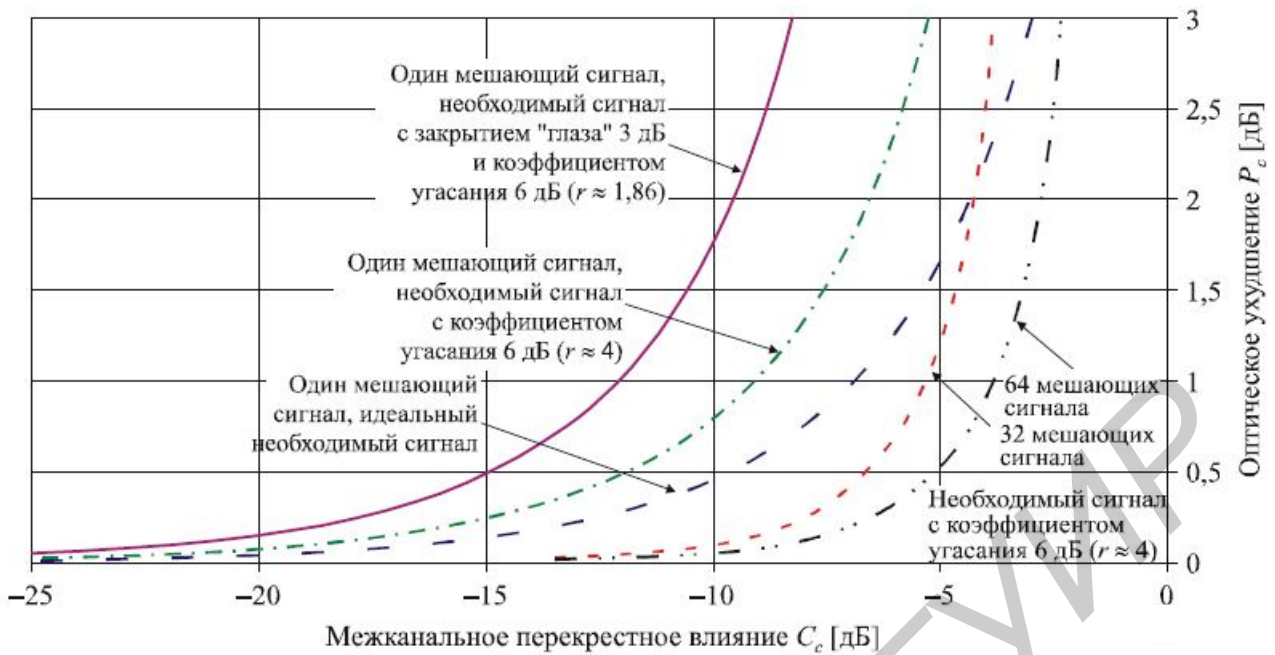


Рисунок 4.12 – График оптического ухудшения в зависимости от межканального перекрестного влияния

Процедура определения требуемого переходного затухания следующая:

1 Из системных параметров определяется значение P_C , которое может различаться для разных систем. Например, в системе с коротким расстоянием можно назначить более высокий проигрыш по перекрестному влиянию, чем в системе с длинным расстоянием. В качестве примера выберем $P_C = 0,5$ дБ.

2 Используя графики рисунка 4.11 или соответствующие формулы, определим значение C_C из P_C . Нужная модель находится где-то между моделью с двумя взаимодействующими сигналами при очень большой разнице между I_A и I_{NA} и гауссовой моделью, в которой I_A равно I_{NA} , а k – велико. Выбирая кривую худшего примера на рисунке 4.11, получаем значение $C_C = -15$ дБ.

3 Из системных параметров устанавливаем значение d . В Рекомендации МСЭ-Т G.959.1, например, применяемый код P16S1-1D2 имеет $d = 6$ дБ, а P16S1-2C2 имеет $d = 2$ дБ. (Это приводит к разнице 4 дБ между необходимыми переходными затуханиями для этих применений). Итак, для P16S1-1D2 выбираем $d = 6$ дБ при $k = 16$.

4 Подставляем эти значения в выражение (4.33), откуда получаем значение переходного затухания не менее $I = 32,8$ дБ.

4.5.3 Интерферометрическое перекрестное влияние

Интерферометрическое перекрестное влияние появляется, когда мешающий и исследуемый каналы располагаются на одной и той же номинальной длине волны. Это происходит по следующим причинам:

– сигнал на длине волны исследуемого канала не полностью ответвлен перед добавлением нового сигнала в оптическом мультиплексоре ввода/вывода;

– при объединении оптических сигналов в оптическом мультиплексоре, когда оптический передатчик одного канала излучает на длине волны другого канала (например из-за недостаточного коэффициента подавления боковой моды); этот случай назван в G.692 перекрестным влиянием на передающей стороне (transmit-side crosstalk);

– из-за недостаточного переходного затухания в оптическом кроссовом соединителе, что приводит к попаданию в приемник света от более чем одного волокна;

– в любом компоненте или группе компонентов, в которых имеется более одного тракта, по которым свет может попасть к приемнику. Это называется многотрактовой интерференцией (MPI).

В отличие от межканального перекрестного влияния интерферометрическое перекрестное влияние проявляется тогда, когда два оптических сигнала достаточно близки друг к другу, так что их частота биения будет в пределах электрической полосы пропускания приемника. В этом случае имеются оптические поля, которые взаимодействуют для образования перекрестного влияния, а не оптические мощности, поэтому уровни перекрестного влияния, необходимые для образования конкретного ухудшения, будут значительно меньшими.

При одном мешающем сигнале перекрестное влияние может моделироваться ограниченной функцией плотности вероятности. Ухудшение по перекрестному влиянию из [5] (включающее в себя влияние неполного коэффициента угасания r) для порога решения по средней мощности равно

$$P_I = 10 \lg \left(\frac{\frac{r-1}{r+1}}{\frac{r-1}{r+1} + 10^{0,1C_I} - 4 \sqrt{\frac{r}{r+1}} 10^{0,1C_I}} \right), \text{ дБ}, \quad (4.37)$$

для оптимизированного порога решения:

$$P_I = -10 \lg \left(1 - 2 \left(\frac{(1 + \sqrt{r}) \sqrt{10^{0,1C_I} (r+1)}}{r-1} \right) \right), \text{ дБ}. \quad (4.38)$$

Ухудшение по интерферометрическому перекрестному влиянию для исследуемого сигнала идеального и с коэффициентом угасания 6 дБ при одном мешающем сигнале показано на рисунке 4.13.

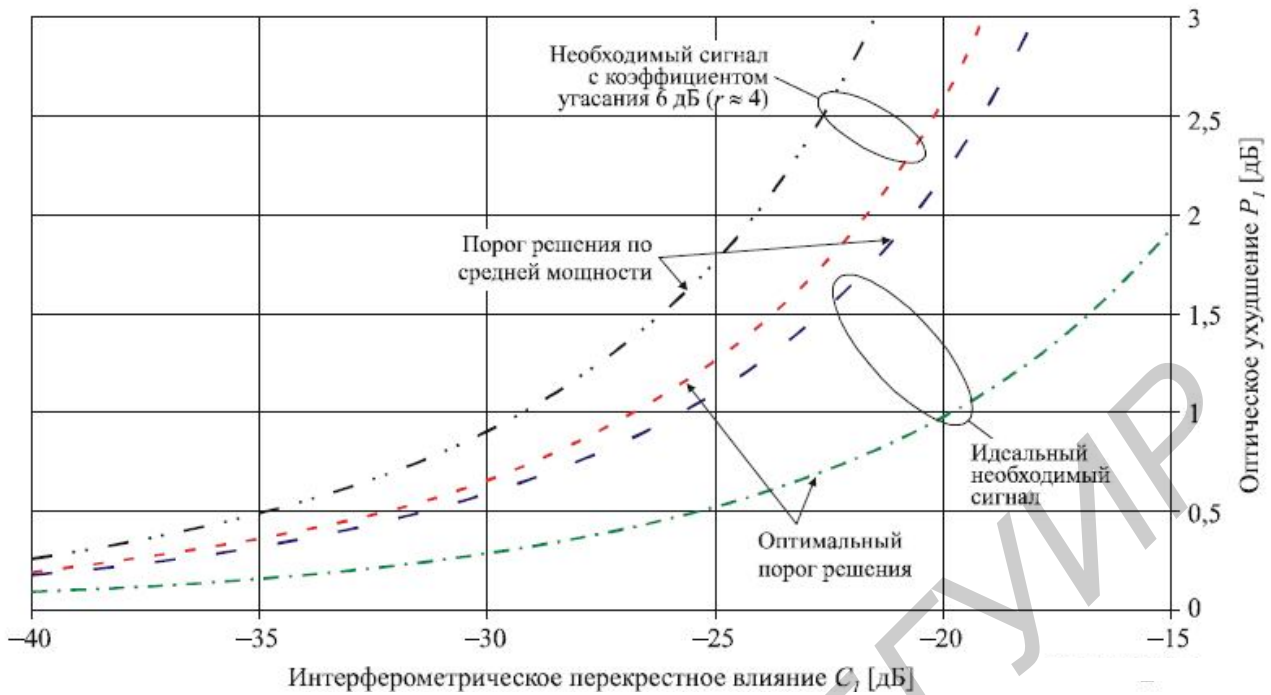


Рисунок 4.13 – График оптического ухудшения в зависимости от интерферометрического перекрестного влияния

При многих мешающих сигналах функция плотности вероятности становится приближенно гауссовой, а ухудшение по оптическому перекрестному влиянию при приемнике с PIN-диодом будет согласно [15] для порога решения по средней мощности равно

$$P_I = -5 \lg \left(1 - 410^{0,1C_I} Q'^2 \left(\frac{1+1/r}{(1-1/r)^2} \right) \right), \text{ дБ}, \quad (4.39)$$

и для оптимизированного порога решения

$$P_I = -5 \lg \left(1 - 2 \cdot 10^{0,1C_I} Q'^2 \left(\frac{r+1}{r-1} \right)^2 + \left(10^{0,1C_I} \right)^2 Q^4 \left(\frac{r+1}{r-1} \right)^2 \right), \text{ дБ}, \quad (4.40)$$

где $Q' = \sqrt{2} \operatorname{erfc}^{-1}(4 \cdot BER)$, $Q = \sqrt{2} \operatorname{erfc}^{-1}(2 \cdot BER)$, $\operatorname{erfc}^{-1}(x)$ – функция, обратная $\operatorname{erfc}(x)$

При $BER = 10^{-12}$ $Q' \approx 6,94$ и $Q \approx 7,03$.

Зависимость значения ухудшения оптического тракта от интерферометрического перекрестного влияния для идеального исследуемого сигнала и сигнала с коэффициентом угасания 6 дБ при многих мешающих сигналах показана на рисунке 4.14.

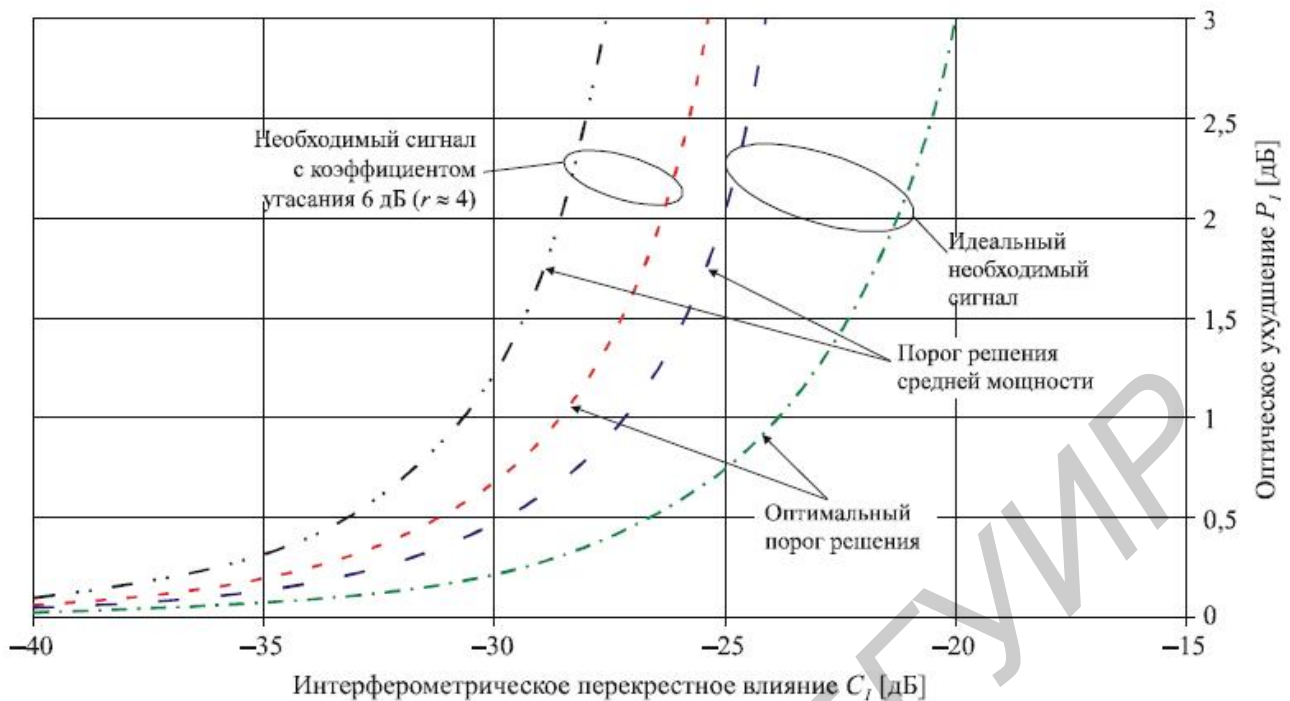


Рисунок 4.14 – График оптического ухудшения в зависимости от интерферометрического перекрестного влияния

4.6 Учет нелинейных явлений

Влияние нелинейных явлений, таких, как самомодуляция фазы (SPM), перекрестная модуляция фазы (XPM) и четырехволновое смешение (FWM), в многоканальной системе оценивается путем моделирования при разных значениях входной усредненной оптической мощности для установления порога мощности, соответствующего определенному ухудшению по рабочей характеристике системы.

В качестве примера проведем моделирование системы при следующих допущениях:

- система содержит N каналов;
- канальная скорость – 40 Гбит/с;
- протяженность – 500...1000 км, что типично для наземных ВОЛС;
- формат передачи RZ с гауссовой формой импульса;
- так как анализируются в данном случае нелинейные явления, рассматривается «идеальный» передатчик;
- используется компенсация дисперсии; интервал компенсации совпадает с длиной усилительного участка, предполагается, что дисперсия и ее наклон точно компенсированы;
- используется идеальный приемник, в состав которого входят: оптический фильтр с полосой пропускания 160 ГГц, идеальный фотодиод и электрический фильтр (Бесселя–Томсона 4-го порядка с полосой пропускания 32 ГГц);
- осуществляется передача псевдослучайной 32-битовой последовательности. Для многоканальных систем битовые последовательности в разных ка-

налах некоррелированы (худшим случаем является случай, когда по всем каналам передается одна и та же последовательность).

В литературе предложены различные схемы компенсации дисперсии (посткомпенсация, предкомпенсация, посткомпенсация с предварительной частотной модуляцией импульса).

Упрощенная схема системы с посткомпенсацией показана на рисунке 4.15.

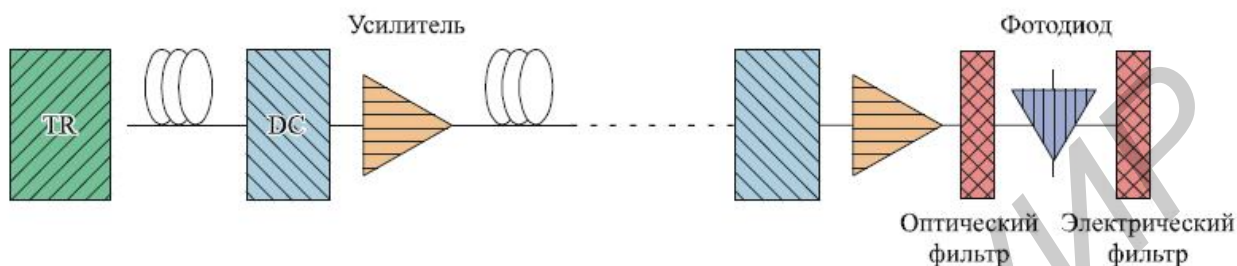


Рисунок 4.15 – Схема системы с повторяющейся посткомпенсацией

Влияние нелинейных явлений

Многопролетная высокоскоростная система передачи, у которой полностью компенсирована дисперсия, подвергается влиянию нелинейных оптических явлений, в частности, SPM – в одноканальных системах, XPM и FWM – в многоканальных системах. Эти нелинейные явления возникают из-за эффекта Керра в волокне, причем его влияние на рабочие характеристики возрастает с ростом оптической входной мощности.

Рабочие характеристики системы при малой оптической мощности на входе волокна ухудшаются из-за низкого отношения оптический сигнал/шум в приемнике. Следовательно, для входной мощности существуют максимальный и минимальный пороги, которые соответствуют ухудшению по определенной рабочей характеристике системы.

При оценке максимального порога по мощности, определяемого нелинейными явлениями, учитываются следующие аспекты:

а) тип волокна, используемого для передачи

Волокна, характеризующиеся разными коэффициентами нелинейности и дисперсии, имеют различные свойства в части влияния нелинейности. Например, волокна с компенсацией дисперсии (DCF) имеют малую эффективную зону и в конечном итоге – большой коэффициент нелинейности. Он проверяется при моделировании на входных оптических мощностях $P_{\Sigma} > 3$ дБм, когда SPM начинает ухудшать системные рабочие характеристики.

Стандартные одномодовые ОВ (Рекомендация МСЭ-Т G.652) имеют малый коэффициент нелинейности, для них SPM обычно пренебрежимо мала, за исключением случаев очень больших входных оптических мощностей (например, при схеме с посткомпенсацией и усилительных участках протяженностью 100 км SPM начинает ухудшать идеальную линейную характеристику при $P_{\Sigma} > 8$ дБм). С другой стороны, большая хроматическая дисперсия, типичная

для волокон в соответствии с Рекомендацией МСЭ-Т G.652, делает влияния XPM и FWM совершенно незначительными в предположении, что дисперсия точно компенсирована.

Волокна в соответствии с Рекомендацией МСЭ-Т G.655 имеют в отношении SPM приблизительно такие же свойства, как и стандартные одномодовые ОВ, но имеют меньший коэффициент дисперсии, поэтому нельзя пренебрегать FWM;

б) схема компенсации дисперсии

Различают три схемы компенсации дисперсии, которые характеризуются разными свойствами в отношении SPM:

– предкомпенсация: устройство компенсации дисперсии располагается в начале каждого пролета перед ОВ. Эта схема весьма чувствительна к SPM. Моделирование при протяженности усилительных участков 100 км, длине участка регенерации 500 км и коэффициенте шума усилителей $nf = 6$ дБ показало, что при $Q \approx 7$ максимальная входная мощность не должна превышать $P_{S\Sigma} < 4$ дБм;

– посткомпенсация: устройство компенсации дисперсии располагается в конце каждого пролета после ОВ. Моделирование при указанных выше значениях показало, что максимальная входная мощность не должна превышать $P_{S\Sigma} < 13$ дБм;

– посткомпенсация и предварительная частотная модуляция импульса. Оптимальное значение предварительной частотной модуляции, рассчитанное путем моделирования, значительно уменьшает влияние SPM;

в) длина пролета

Входная оптическая мощность из-за потерь в волокне при распространении вдоль участка снижается по экспоненциальному закону. В то же время влияние нелинейных явлений зависит от значения оптической мощности. Поэтому максимальный порог для входной мощности из-за нелинейных явлений имеет разные значения для систем, которые отличаются только длиной усилительного участка.

Например, моделирование линейного тракта протяженностью 500 км по ОВ (Рекомендация МСЭ-Т G.652) с посткомпенсацией, усилителями с коэффициентом шума $nf = 6$ дБ и длиной усилительного участка 100 км показало, что при $Q = 7$ максимальная входная мощность $P_{S\Sigma} = 13$ дБм. Если длина усилительного участка равна 50 км, то максимальная входная мощность $P_{S\Sigma} = 8$ дБм.

Следует учитывать, что все сделанные предположения справедливы при использовании формата модуляции RZ и не учитывают число каналов WDM и интервал между частотами.

5 ОБОБЩЕННАЯ МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНОГО ТРАКТА

5.1 Общие положения

Оптический линейный тракт, включающий как направляющую систему (ОВ), так и оконечное и промежуточное коммуникационное оборудование, проектируется для передачи компонентных цифровых сигналов по волоконно-оптической кабельной системе.

На первом этапе проектирования необходимо разработать структурную схему участка и места установки того или иного оптического оборудования.

Далее необходимо определить основные параметры используемых оптических элементов (пассивных и активных компонентов оптического трата), а также параметры используемых оптических интерфейсов.

На следующем этапе производится расчет основных системных параметров оптической линии с целью проверки соответствия установленным требованиям оптических интерфейсов.

В случае несоответствия установленным требованиям инженером принимается решение об изменении или параметров оптических компонентов, или мест их расположения, или их количества. Правильное принятие решения возможно только при полном владении методикой проектирования и понимании причинно-следственных связей, происходящих в многоканальной волоконно-оптической системе. В обобщенном виде алгоритм процесса проектирования представлен на рисунке 5.1. Как видно из этой схемы, проектирование линейного тракта является задачей итерационной, решаемой часто эвристическим методом, основанным на опыте и знаниях проектировщика.

5.2 Методика проектирования

При расчете системных параметров проектируемого линейного тракта основным является бюджет мощности.

Если бюджет мощности рассчитывается для одноканальной или многоканальной многопролетной (с промежуточными оптическими усилителями) ВОСП с устройствами компенсации дисперсии, основным системным параметром является бюджет оптической мощности.

Необходимо, чтобы при расчете бюджета оптической мощности учитывались все ухудшения, приводящие к изменению ОСШ в точке регенерации:

- накопление оптического шума;

ухудшение распространения сигнала ввиду совокупного воздействия хроматической дисперсии и нелинейных эффектов (фазовая автомодуляция, фазовая кросс-модуляция, четырехволновое смешение, вынужденное рамановское рассеяние и т. д.);

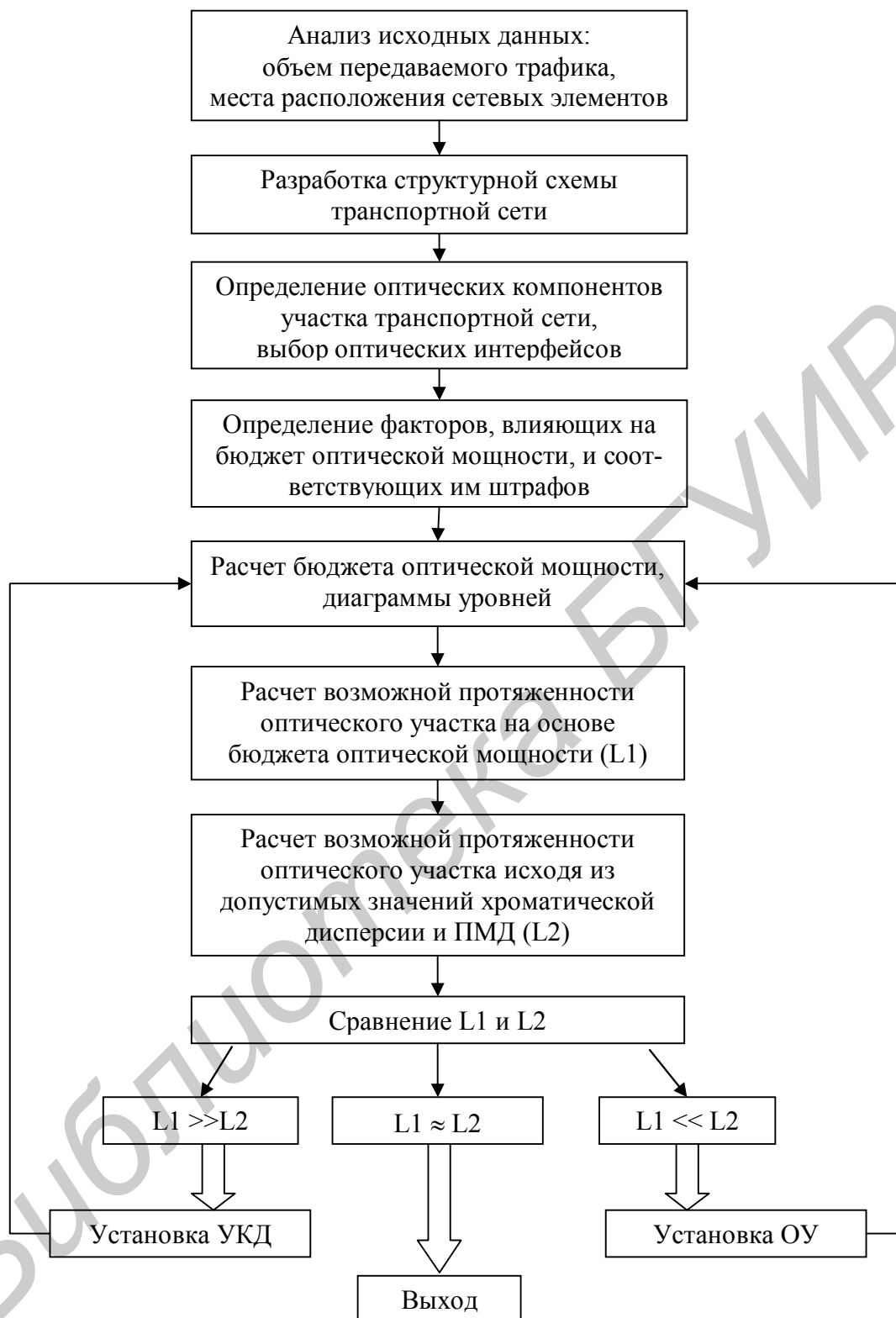


Рисунок 5.1 – Алгоритм проектирования оптического тракта

- ухудшение распространения сигнала ввиду воздействия оптической поляризации, например, дисперсия моды поляризации (PMD), потери, зависящие от поляризации (PDL), усиление, зависящее от поляризации (PDG);
- ухудшения, вызванные неточной настройкой длин волн(ы) несущих;

- ухудшения, вызванные неточной настройкой относительной оптической мощности каналов в WDM. Этот тип ухудшений необходимо учитывать каждый раз, когда выполняется операция спектрального мультиплексирования;
- ухудшения, вызванные несовершенством оконечного оборудования (относятся к показателям типа Q -фактор для соединения в режиме непосредственного переприема – типа «back-to-back»).

Таблица бюджета оптической мощности должна отражать запасы мощности, соответствующие наихудшему случаю на момент окончания срока службы. Пример схемы возможного бюджета мощности приведен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Пример возможной схемы бюджета мощности

	Параметр	Q , дБ
1	Значение бюджета оптической мощности на основе параметров оптического интерфейса	22
1.1	Ухудшение распространения ввиду совокупного влияния хроматической дисперсии, нелинейных эффектов, четырехволнового смешения, вынужденного рамановского рассеяния и т. д.	1
1.2	Ухудшение равномерности усиления	1
1.3	Ухудшение, вызванное неоптимальной оптической предварительной коррекцией	1
1.4	Ухудшение за счет допуска на длину волны	1
1.5	Средние дополнительные потери, вызванные PMD	1
1.6	Ухудшения, связанные с разбросом параметров и влиянием окружающей среды	2
2	Допустимое значение бюджета	15

Таблица 5.1 заполняется следующим образом:

Строка 1 – Разность между излучаемой оптической мощностью и чувствительностью оптического приемника для заданного КОБ при регенерации оптического канального сигнала.

В строках 1.1–1.6 приведен неполный, в качестве примера, список источников ухудшения, которые оказывают воздействие на показатели системы (список ухудшений может корректироваться и дополняться). Учитываемые ухудшения следует вычесть из значения строки 1.

Строка 2 – Допустимое значение бюджета. Значение в этой строке является результатом следующей операции:

$$\text{Строка 2} = \text{Строка 1} - (\text{строки } 1.1 + \dots + 1.6).$$

После расчета бюджета оптической мощности проводится оценка протяженности участка регенерации.

В качестве примера рассмотрим расчет многопролетного участка оптической транспортной сети многоканальной ВОСП со спектральным разделением каналов.

На рисунке 5.2 представлена схема многопролетного участка транспортной сети с применением оконечных мультиплексора (ОМ) и демультимплексора (ОДМ), мультиплексоров вывода/ввода (ОАДМ), оптического кросс-коммутатора (ОХС), оптических усилителей и волоконно-оптического кабеля с волокном в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т G.652.

Общая протяженность участка составляет 125 км, количество оптических каналов – не менее 16, битовая скорость в канале – 10 Гбит/с. Интервал между оптическими каналами 100 ГГц, полоса длин волн каждого канала 0,1 нм (12,48 ГГц). Предполагается наличие двух оптических сетевых элементов: ОАДМ и ОХС. Протяженности оптических пролетов соответственно равны: $L_1 = 42$ км, $L_2 = 38$ км, $L_3 = 45$ км.

Для организации оптического тракта выберем оптические интерфейсы (см. таблицу 2.1): 16S1-2B2 – для первого пролета, 16S1-2C2 – для второго и третьего. В соответствии с Рекомендацией МСЭ-Т G.959.1 на пролете может использоваться только один ОУ (не предполагается использование линейных усилителей).

Оптические усилители представлены усилителем мощности (ВОА) на первом пролете и двумя предварительными усилителями (РОА) на втором и третьем пролетах.

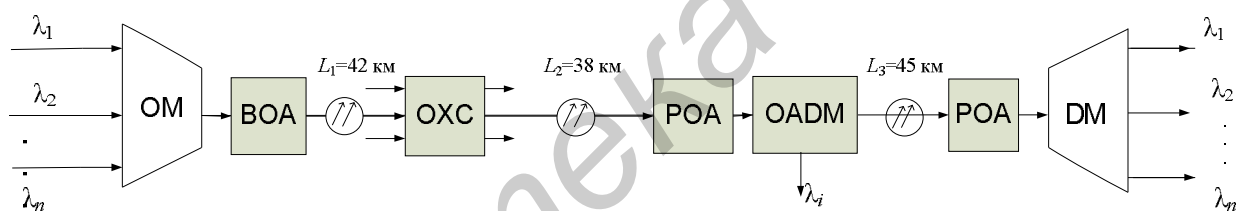


Рисунок 5.2 – Схема участка оптической транспортной сети

В качестве исходных данных при проектировании используются следующие значения параметров оптических элементов:

- коэффициент шума оптических усилителей $nf = 7$ дБ;
- уровень мощности на выходах ОУ для каждого из 16 оптических каналов составляет +1 дБм;
- совокупный уровень мощности многоканального сигнала составляет +14 дБм;
- ОУ полностью компенсируют потери оптической мощности, вносимые ОВ, оптическими мультиплексорами и коммутаторами;
- величина потерь оптической мощности с учетом потерь на стыках строительных длин кабеля и при подключении к оборудованию – 0,23 дБ/км;
- хроматическая километрическая дисперсия – 18 пс/нм·км;
- коэффициент ПМД – 0,2 пс/км^{1/2};
- диапазон рабочих волн 1531,12 – 1562,23 нм;
- коэффициент шума ОАДМ – 22 дБ;
- коэффициент шума РХС – 20 дБ;

- уровень мощности на входе ВОА – 9 дБм;
- коэффициент усиления ВОА – 10 дБ.

В каждом оптическом канале снижается ООСШ, происходит накопление дисперсионных искажений. Проведем расчет этих параметров и сравним их допустимыми значениями для отдельных канальных интерфейсов.

Определим ООСШ при каскадировании различных оптических сетевых элементов.

В каждом оптическом сетевом элементе происходит уменьшение величины ООСШ, вызванное добавлением собственных помех. По этой причине при каскадировании различных сетевых элементов (оптических усилителей, оптических коммутаторов, оптических мультиплексоров вывода/ввода и т.д.) происходит снижение помехоустойчивости в каждом из оптических каналов, что может привести к увеличению числа ошибок цифровой передачи при регенерации сигналов. При проектировании протяженных оптических каналов с коммутацией и усилением необходимо точно определить ООСШ и сравнить с допустимыми значениями, которые приводятся в технической документации. Изменение величины ООСШ в одном оптическом сетевом элементе ONE можно рассчитать по формуле

$$OSNR_{out} = -10 \lg \left(10^{-0,1(OSNR_{in})} + 10^{-0,1(P_{in} - nf - 10 \lg(hf\Delta f))} \right),$$

- 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.

При каскадировании N -го числа ONE результирующее значение $OSNR_{out}$ можно рассчитать:

$$OSNR_{out} = -10 \lg \left(\sum_{j=1}^N 10^{-0,1(P_{inj} - nf_j - 10 \lg(hf\Delta f))} \right), \text{ дБ,}$$

- где P_{inj} – уровни мощности оптического канала на входах различных оптических сетевых элементов, $j=1 \dots N$;
 nf_j – коэффициент шума j -го оптического сетевого элемента.

При определении ООСШ также могут учитываться оптические шумы нелинейного происхождения в ОБ, ОУ, оптических коммутаторах и т.д.

В случае несоответствия величины ООСШ на выходе оптического канала требуемому значению по документации необходимо использовать возможности предварительной коррекции ошибок FEC.

Расчет диаграммы уровней оптического канала и ООСШ приведены ниже в виде таблиц.

Таблица 5.1 – Расчет диаграммы уровней

Рассчитываемые параметры	Участки и длины оптического кабеля, км		
	$L_1, 42$	$L_2, 38$	$L_3, 45$
Затухание участка, дБ	9,7	8,74	10,35
Уровень мощности на входе участка, дБм	+1	-10	-10
Уровень мощности на выходе участка, дБм	-8,7	-18,74	-19,35

Таблица 5.2 – Результаты расчета ООСШ

	ВОА	DXC	POA2	OADM	POA4
Уровень мощности на входе P_{in} , дБм	-9	-8,7	-18,74	-10	-19,35
Коэффициент шума nf , дБ	7	20	7	22	7
$OSNR_{out}$ на выходе, дБ	43	30	28,3	24,55	23,9

Как видно из рисунка 4.8, при таком ООСШ штраф по мощности для оконечного сетевого элемента, в котором будет производиться регенерация электрического сигнала, не будет превышать 0,5 дБ.

Для оценки допустимой хроматической дисперсии воспользуемся графиками рисунка 4.5. При допустимом штрафе оптической мощности 1 дБ ($\varepsilon = 0,3$) и ширине спектра излучения источника $\Delta\lambda < 0,1$ нм значение DL для битовой канальной скорости 10 Гбит/с составляет 1000 пс/нм. При $D = 18$ пс/нм·км протяженность участка регенерации составляет $L = 1000/18 \approx 55,5$ км, что требует установки устройств компенсации дисперсии на участках усиления.

Типовой модуль компенсации дисперсии на 40 км DCM40 имеет следующие фиксированные характеристики:

- вносимое значение дисперсии – минус $(680 \pm 2\%)$ пс/нм;
- вносимое затухание – не более 2,8 дБ;
- значение ПМД – не более 0,8 пс.

С учетом этого необходимо пересчитать параметры линейного тракта с учетом дополнительных элементов (диаграмма уровней – таблица 5.3 и оптическое ОСШ – таблица 5.4). Структурная схема тракта представлена на рисунке 5.3.

Как видно из таблицы 5.4, результирующее ООСШ на входе последнего элемента уменьшится незначительно.

Остаточная хроматическая дисперсия оптического линейного тракта равна

$$18 \cdot 145 + (-680 \cdot 3) + 2 \cdot 30 = 630 \text{ пс/нм,}$$

что меньше значения в 1000 пс/нм, при котором штраф оптической мощности превышает 1 дБ.

Таблица 5.3 – Расчет диаграммы уровней

Рассчитываемые параметры	Участки и длины оптического кабеля, км		
	L1, 42	L2, 38	L3, 45
Затухание участка, дБ	9,7	8,74	10,35
Затухание участка с учетом компенсатора дисперсии, дБ	12,5	11,54	13,15
Уровень мощности на входе участка, дБм	+1	-10	-10
Уровень мощности на выходе участка и компенсатора, дБм	-11,5	-21,54	-23,15

Таблица 5.4 – Результаты расчета ООСШ при использовании DCM

	ВОА	DXC	POA2	OADM	POA4
Уровень мощности на входе P_{in} , дБм	-9	-11,5	-18,74	-10	-19,35
Коэффициент шума nf , дБ	7	20	7	22	7
$OSNR_{out}$ на выходе, дБ	43	27,32	26,32	23,6	23,1

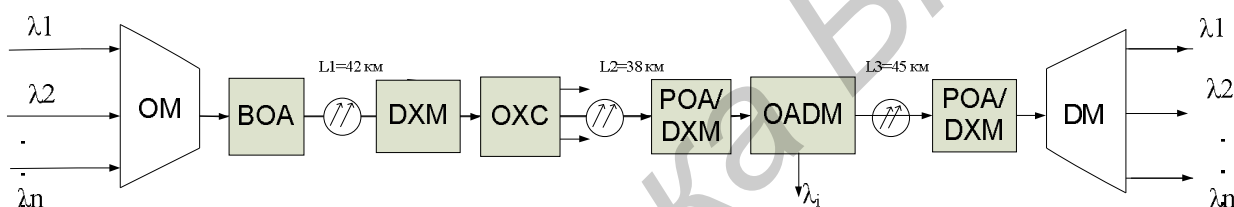


Рисунок 5.3 – Схема участка оптической транспортной сети с устройствами компенсации дисперсии

Как отмечено в подразделе 4.3, при штрафе оптической мощности не более 0,5 дБ значение ПМД не должно превышать 0,2 тактового интервала. В данном примере длительность тактового интервала равна

$$\frac{0.2}{10 \cdot 10^9} = 20 \cdot 10^{-12}, \text{ с,}$$

а ПМД на участке протяженностью 145 км

$$0.2 \cdot 10^{-12} \cdot \sqrt{145} = 2.4 \cdot 10^{-12}, \text{ с,}$$

что соответствует выполнению неравенства

$$20 \cdot 10^{-12} > 2.4 \cdot 10^{-12}, \text{ с.}$$

Для предложенной структурной схемы оптического линейного тракта КОБ не будет превышать требуемого значения $BER = 10^{-12}$.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Фокин, В. Г. Оптические системы передачи и транспортные сети / В. Г. Фокин. – М. : Эко-Трендз, 2008. – 288 с.
- 2 Портнов, Э. Л. Принципы построения первичных сетей и оптических кабельных линий связи / Э. Л. Портнов. – М. : Горячая линия–Телеком, 2009. – 544 с.
- 3 Слепов, Н. Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи / Н. Н. Слепов. – М. : Радио и связь, 2000. – 468 с.
- 4 Фриман, Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М. : Техносфера, 2006. – 496 с.
- 5 Добавление 39 к Рекомендациям МСЭ-Т серии G (2006). Рассмотрение вопросов расчета и проектирования оптических систем.
- 6 ITU-T Recommendation G.650.1 (2004). Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable.
- 7 Рекомендация МСЭ-Т G.652 (2005). Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля.
- 8 ITU-T Recommendation G.653 (2003). Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.
- 9 Рекомендация МСЭ-Т G.654 (2004). Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля со смещенной дисперсией и отсечкой.
- 10 Рекомендация МСЭ-Т G.655 (2006). Характеристики одномодового волоконно-оптического волокна и кабеля с ненулевым дисперсионным смещением.
- 11 ITU-T Recommendation G.661 (2006). Definition and test methods for the relevant generic parameters of optical amplifier devices and subsystems.
- 12 Рекомендация МСЭ-Т G.662 (2005). Типовые характеристики приборов и подсистем на базе оптических усилителей.
- 13 ITU-T Recommendation G.663 (2000). Application-related aspects of optical amplifier devices and subsystems.
- 14 ITU-T Recommendation G.691 (2006). Optical interfaces for single-channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers.
- 15 ITU-T Recommendation G.692 (1998). Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers.
- 16 Рекомендация МСЭ-Т G.957 (2006). Оптические интерфейсы для оборудования и систем, относящихся к синхронной цифровой иерархии.
- 17 ITU-T Recommendation G.959.1 (2006). Optical transport network physical layer interfaces.
- 18 ITU-T Recommendation G.982 (1996). Optical access networks to support services up to the ISDN primary rate or equivalent bit rates.
- 19 Рекомендация МСЭ-Т G.983.1 (2005). Оптические системы широкополосного доступа, базирующиеся на пассивной оптической сети (PON).

20 ITU-T Recommendation L.40 (2000). Optical fibre outside plant maintenance support, monitoring, and testing system.

21 ITU-T Recommendation L.41 (2000). Maintenance wavelength on fibres carrying signals.

22 IEC/TR 61292-3:2003, Optical amplifiers – Part 3: Classification, characteristics, and applications.

23 Zitelli M., Matera F., Settembre M.: Single-channel transmission in dispersion management links in conditions of very strong pulse broadening: application to 40 Gb/s signals on step-index fibers, J. Lightwave Technol., Vol. 17, pp. 2498-2505, 1999.

Библиотека БГУИР

Учебное издание

Бунас Виталий Юрьевич
Тарченко Надежда Владимировна
Урядов Владимир Николаевич

***ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО ТРАКТА
ЦИФРОВОЙ ВОСП***

Учебно-методическое пособие

Редактор Т. П. Андрейченко
Корректор Е. Н. Батурчик
Компьютерная верстка Ю. Ч. Клочкевич

Подписано в печать 18.09.2012. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,3. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 100 экз. Заказ 303.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровка, 6