



МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОЮЗ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

МСЭ-Т

СЕКТОР СТАНДАРТИЗАЦИИ
ЭЛЕКТРОСВЯЗИ МСЭ

Серия G
Добавление 41
(05/2005)

СЕРИЯ G: СИСТЕМЫ И СРЕДА ПЕРЕДАЧИ,
ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

**Руководящие указания по проектированию
подводных волоконно-оптических
кабельных систем**

Рекомендации МСЭ-Т серии G – Добавление 41

РЕКОМЕНДАЦИИ МСЭ-Т СЕРИИ G

СИСТЕМЫ И СРЕДА ПЕРЕДАЧИ, ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

МЕЖДУНАРОДНЫЕ ТЕЛЕФОННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ И ЦЕПИ	G.100–G.199
ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ОБЩИЕ ДЛЯ ВСЕХ АНАЛОГОВЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ	G.200–G.299
ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЖДУНАРОДНЫХ ВЧ-СИСТЕМ ТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ ПО МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ЛИНИЯМ	G.300–G.399
ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЖДУНАРОДНЫХ СИСТЕМ ТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ИЛИ СПУТНИКОВЫХ ЛИНИЙ И ИХ СОЕДИНЕНИЕ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПРОВОДНЫМИ ЛИНИЯМИ	G.400–G.449
КООРДИНАЦИЯ РАДИОТЕЛЕФОНИИ И ПРОВОДНОЙ ТЕЛЕФОНИИ	G.450–G.499
ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДЫ ПЕРЕДАЧИ	G.600–G.699
ЦИФРОВОЕ ОКОНЕЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	G.700–G.799
ЦИФРОВЫЕ СЕТИ	G.800–G.899
ЦИФРОВЫЕ УЧАСТКИ И СИСТЕМА ЦИФРОВЫХ ЛИНИЙ	G.900–G.999
КАЧЕСТВО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ – ОБЩИЕ И СВЯЗАННЫЕ С ПОЛЬЗОВАТЕЛЕМ АСПЕКТЫ	G.1000–G.1999
ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДЫ ПЕРЕДАЧИ	G.6000–G.6999
ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ ПО ТРАНСПОРТНЫМ СЕТЯМ – ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	G.7000–G.7999
ETHERNET И АСПЕКТЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ СООБЩЕНИЙ	G.8000–G.8999
СЕТИ ДОСТУПА	G.9000–G.9999

Для получения более подробной информации просьба обращаться к перечню Рекомендаций МСЭ-Т.

Добавление 41 к Рекомендациям МСЭ-Т серии G

Руководящие указания по проектированию подводных волоконно-оптических кабельных систем

Резюме

В настоящем Добавлении приведено описание вопросов проектирования систем с повторителями, систем без повторителей и систем с оптическими усилителями, поддерживающих сигналы СЦИ и OTN, в подводных оптических кабельных системах. В частности, в настоящем Добавлении основное внимание уделено специальным вопросам, относящимся к подводным волоконно-оптическим кабельным системам.

Кроме того, в настоящем Добавлении излагается общепринятое представление о требованиях по проектированию подводных волоконно-оптических кабельных систем, и его целью является объединение и расширение материалов, связанных с несколькими рекомендациями, включая Рекомендации G.971, G.972, G.973, G.974, G.975, G.975.1, G.976 и G.977.

Источник

Добавление 41 к Рекомендациям МСЭ-Т серии G принято 27 мая 2005 года 15-й Исследовательской комиссией МСЭ-Т (2005–2008 гг.).

ПРЕДИСЛОВИЕ

Международный союз электросвязи (МСЭ) является специализированным учреждением Организации Объединенных Наций в области электросвязи. Сектор стандартизации электросвязи МСЭ (МСЭ-Т) – постоянный орган МСЭ. МСЭ-Т отвечает за изучение технических, эксплуатационных и тарифных вопросов и за выпуск Рекомендаций по ним с целью стандартизации электросвязи на всемирной основе.

На Всемирной ассамблее по стандартизации электросвязи (ВАСЭ), которая проводится каждые четыре года, определяются темы для изучения Исследовательскими комиссиями МСЭ-Т, которые, в свою очередь, вырабатывают Рекомендации по этим темам.

Утверждение Рекомендаций МСЭ-Т осуществляется в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции 1 ВАСЭ.

В некоторых областях информационных технологий, которые входят в компетенцию МСЭ-Т, необходимые стандарты разрабатываются на основе сотрудничества с ИСО и МЭК.

ПРИМЕЧАНИЕ

В настоящей Рекомендации термин "администрация" используется для краткости и обозначает как администрацию электросвязи, так и признанную эксплуатационную организацию.

Соблюдение положений данной Рекомендации носит добровольный характер. Однако в Рекомендации могут содержаться определенные обязательные положения (например, для обеспечения возможности взаимодействия или применимости), и соблюдение положений данной Рекомендации достигается в случае выполнения всех этих обязательных положений. Для выражения необходимости выполнения требований используется синтаксис долженствования и соответствующие слова (такие, как "должен" и т. п.), а также их отрицательные эквиваленты. Использование этих слов не предполагает, что соблюдение положений данной Рекомендации является обязательным для какой-либо из сторон.

ПРАВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

МСЭ обращает внимание на вероятность того, что практическое применение или реализация этой Рекомендации может включать использование заявленного права интеллектуальной собственности. МСЭ не занимает какую бы то ни было позицию относительно подтверждения, обоснованности или применимости заявленных прав интеллектуальной собственности, независимо от того, отстаиваются ли они членами МСЭ или другими сторонами вне процесса подготовки Рекомендации.

На момент утверждения настоящей Рекомендации МСЭ не получил извещения об интеллектуальной собственности, защищенной патентами, которые могут потребоваться для выполнения этой Рекомендации. Однако те, кто будет применять Рекомендацию, должны иметь в виду, что это может не отражать самую последнюю информацию, и поэтому им настоятельно рекомендуется обращаться к патентной базе данных БСЭ.

© ITU 2005

Все права сохранены. Никакая часть данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких-либо средств без письменного разрешения МСЭ.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1	Область применения 1
2	Ссылки 1
2.1	Общие ссылки 1
2.2	Ссылки в пп. 6, 7 и 9 2
3	Термины и определения 3
4	Сокращения и акронимы 3
5	Параметры элементов системы 5
5.1	Параметры передатчиков 5
5.2	Параметры подводного кабеля 6
5.3	Параметры подводных повторителей 10
5.4	Параметры кабельных муфт 12
5.5	Параметры приемников 13
6	Топология оптической сети 14
6.1	Пункт-пункт 14
6.2	Звезда 14
6.3	Звезда с ответвлениями 15
6.4	Магистраль с ответвлениями 15
6.5	Гирлянда 16
6.6	Кольцо 16
6.7	Кольцо с ответвлениями 16
7	Соображения по проектированию системы 17
7.1	Бюджет оптической мощности 17
7.2	Соображения по дисперсии 32
8	Упреждающее исправление ошибок 33
9	Рассмотрение надежности 34
9.1	Требование по надежности 34
9.2	Внутренняя неисправность 34
9.3	Внешняя неисправность 37
9.4	Локализация отказов 38
10	Соображения по модернизации 38

Добавление 41 к Рекомендациям МСЭ-Т серии G

Руководящие указания по проектированию подводных волоконно-оптических кабельных систем

1 Область применения

В настоящем Добавлении приведено описание вопросов проектирования систем с повторителями, систем без повторителей и систем с оптическими усилителями, поддерживающих сигналы СЦИ и OTN, в подводных оптических кабельных системах. В частности, в настоящем Добавлении основное внимание уделено специальным вопросам, относящимся к подводным волоконно-оптическим кабельным системам.

Кроме того, в настоящем Добавлении излагается общепринятое представление о требованиях по проектированию подводных волоконно-оптических кабельных систем, и его целью является объединение и расширение материалов, связанных с несколькими Рекомендациями, включая Рекомендации G.971, G.972, G.973, G.974, G.975, G.975.1, G.976 и G.977.

Настоящее Добавление должно также позволить читателю лучше понять технические требования к оптическим волокнам и их компонентам, а также Рекомендации по интерфейсам систем, которые в настоящее время разрабатываются соответственно по Вопросам 5, 7 и 8 15-й Исследовательской комиссии МСЭ-Т. Настоящее Добавление не должно препятствовать техническому развитию, связанному с технологиями волоконно-оптических кабельных систем.

2 Ссылки

2.1 Общие ссылки

В настоящем Добавлении приводятся ссылки на следующие Рекомендации МСЭ-Т и другие источники.

- ITU-T Recommendation G.650.1 (2004), *Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable.*
- ITU-T Recommendation G.650.2 (2005), *Definitions and test methods for statistical and non-linear related attributes of single-mode fibre and cable.*
- Рекомендация МСЭ-Т G.652 (2005 г.), *Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля.*
- ITU-T Recommendation G.653 (2003), *Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.*
- Рекомендация МСЭ-Т G.654 (2004 г.), *Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля со смещенной дисперсией и отсечкой.*
- ITU-T Recommendation G.655 (2003), *Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.*
- Рекомендация МСЭ-Т G.656 (2004 г.), *Характеристики волокна и кабеля с ненулевой дисперсией для широкополосной оптической передачи.*
- ITU-T Recommendation G.661 (1998), *Definition and test methods for the relevant generic parameters of optical amplifier devices and subsystems.*
- ITU-T Recommendation G.663 (2000), *Application related aspects of optical amplifier devices and subsystems.*
- Рекомендация МСЭ-Т G.671 (2005 г.), *Характеристики передачи оптических компонентов и подсистем.*
- ITU-T Recommendation G.691 (2003), *Optical interfaces for single channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers.*

- ITU-T Recommendation G.692 (1998), *Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers.*
- Рекомендация МСЭ-Т G.693 (2005 г.), *Оптические интерфейсы для внутриучрежденческих систем.*
- ITU-T Recommendation G.694.1 (2002), *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.*
- Рекомендация МСЭ-Т G.694.2 (2003 г.), *Спектральные сетки для применения технологий WDM: сетка длин волн технологии CWDM.*
- ITU-T Recommendation G.826 (2002), *End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections.*
- ITU-T Recommendation G.828 (2000), *Error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate synchronous digital paths.*
- ITU-T Recommendation G.911 (1997), *Parameters and calculation methodologies for reliability and availability of fibre optic systems.*
- ITU-T Recommendation G.957 (1999), *Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy.*
- Рекомендация МСЭ-Т G.959.1 (2003 г.), *Интерфейсы физического уровня оптической транспортной сети.*
- ITU-T Recommendation G.971 (2004), *General features of optical fibre submarine cable systems.*
- Рекомендация МСЭ-Т G.972 (2004 г.), *Определение терминов, относящихся к подводным волоконно-оптическим кабельным системам.*
- Рекомендация МСЭ-Т G.973 (2003 г.), *Характеристики подводных волоконно-оптических кабельных систем без повторителей.*
- ITU-T Recommendation G.974 (2004), *Characteristics of regenerative optical fibre submarine cable systems.*
- ITU-T Recommendation G.975 (2000), *Forward error correction for submarine systems.*
- ITU-T Recommendation G.975.1 (2004), *Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems.*
- ITU-T Recommendation G.976 (2004), *Test methods applicable to optical fibre submarine cable systems.*
- Рекомендация МСЭ-Т G.977 (2004 г.), *Характеристики оптически усиленных подводных волоконно-оптических кабельных систем.*
- Рекомендации МСЭ-Т серии G – Дополнение 39 (2003 г.), *Рассмотрение вопросов расчета и проектирования оптических систем.*
- IEC/TR 61282-3 (2002), *Fibre optic communication system design guides – Part 3: Calculation of polarization mode dispersion.*
- IEC/TR 62380 (2004), *Reliability data handbook – Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment.*

2.2 Ссылки в пп. 6, 7 и 9

- [1] ZSAKANY (J.C.), MARSHALL (N.W.), ROBERTS (J.M.), ROSS (D.G.): The Application of Undersea Cable Systems in Globe Networking, *AT&T Technical Journal*, Vol. 74, No.1, pp.8–15, January/February 1995.

- [2] O'MAHONY (M.J.), SPIRIT (D.M.): High Capacity Optical Transmission Explained, *John Wiley & Sons*, 1995.
- [3] WINZER (P.J.), KALMÁR (A.): Sensitivity Enhancement of Optical Receivers by Impulse Coding, *JLT*, Vol. 17, No. 2, February 1999.
- [4] AGRAWAL (G.P.): Nonlinear Fiber Optics, *Academic Press*, Edition 1989.
- [5] TKACH (R.W.), CHAPLYVY (A.R.), FORGHIERI (F.), GNAUCK (A.H.), DEROSIER (R.M.): Four Photon Mixing and High-Speed WDM Systems, *JLT*, Vol. 13, No. 5, May 1995.
- [6] BERGANO (N.S.), ASPELL (J.), DAVIDSON (C.R.), TRISCHITTA (P.R.), NYMAN (B.M.), KERFOOT (F.W.): Bit Error Rate Measurements of 14000 km 5 Gbit/s Fibre-Amplifier Transmission System using Recirculating Loop, *Elec. Letters*, Vol. 27, No. 21, October 1991.
- [7] Military Handbook MIL-HDBK-217, *Reliability prediction of electronic component* (1995).
- [8] Telcordia Technologies Special Report SR-332, *Reliability procedure for electronic equipment*, Issue No. 1 (May 2001).

3 Термины и определения

Формальные определения приведены в основных Рекомендациях.

4 Сокращения и акронимы

В настоящем Добавлении используются следующие сокращения:

3R	Восстановление мощности, формы и синхронизации
ASE	Усиленное спонтанное излучение
КОБ	Коэффициент ошибок по битам
BOL	Начало срока службы
BU	Разветвитель
COTDR	Когерентная оптическая рефлектометрия во временной области
CSF	Одномодовое оптическое волокно со смещенной длиной волны отсечки
CWDM	Грубое мультиплексирование с разделением по длине волны
DGD	Дифференциальная групповая задержка
DLS	Участок цифровой линии
DPSK	Дифференциальная фазовая манипуляция
DSF	Одномодовое волокно со смещенной дисперсией
DWDM	Плотное мультиплексирование с разделением по длине волны
DWDMS	Система плотного мультиплексирования с разделением по длине волны
EDF	Легированное эрбием оптическое волокно
EOL	Конец срока службы
ER	Коэффициент затухания
FEC	Упреждающее исправление ошибок

FIT	Число отказов за время
FWM	Четырехволновое смешение
IrDI	Междоменный интерфейс
LOC	Линейный оптический канал
MPI-R	Многолучевой интерфейс в приемнике
MPI-S	Многолучевой интерфейс в источнике
MTBF	Средняя наработка на отказ
MTTR	Среднее время ремонта (восстановления)
NDSF	Одномодовое оптическое волокно с несмещенной дисперсией
NF	Коэффициент шума
NRZ	Без возвращения к нулю
NZDSF	Одномодовое оптическое волокно с ненулевой смещенной дисперсией
OA	Оптический усилитель
OD	Оптический демультиплексор
OFA	Волоконно-оптический усилитель
OM	Оптический мультиплексор
OOK	Амплитудная манипуляция
OSNR	Отношение оптический сигнал/шум
OSR	Оптический подводный повторитель
OTDR	Оптическая рефлектометрия во временной области
OTN	Оптическая транспортная сеть
PDG	Усиление, зависящее от поляризации
PDL	Потери, зависящие от поляризации
PFE	Оборудование электропитания
PHB	"Выжигание поляризационных провалов"
PMD	Дисперсия поляризованной моды
R	Точка одноканального оптического интерфейса в приемнике
RX	(Оптический) приемник
RZ	С возвращением к нулю
S	Точка одноканального оптического интерфейса в источнике
СЦИ	Синхронная цифровая иерархия
SOP	Состояние поляризации
SPM	Фазовая автомодуляция
SRS	Вынужденное комбинационное рассеяние
SWS	Система с одной длиной волны
TS	Оконечная станция
TTE	Оконечное передающее оборудование

TX	(Оптический) передатчик
WDM	Мультиплексирование с разделением по длине волны
WDMS	Система мультиплексирования с разделением по длине волны
XPM	Перекрестная фазовая модуляция

5 Параметры элементов системы

5.1 Параметры передатчиков

Эти параметры определены в эталонных точках выхода передатчика S или MPI-S, как указано в Рекомендациях МСЭ-Т G.957, G.691, G.692 и G.959.1.

5.1.1 Рабочий диапазон длин волн системы

Рабочие диапазоны длин волн для одноканальных систем СЦИ до 10 Гбит/с приведены в Рекомендациях МСЭ-Т G.691 и G.957. Рабочие диапазоны длин волн для одноканальных и многоканальных интерфейсов IrDI до 40 Гбит/с определены в Рекомендации МСЭ-Т G.959.1. В других приложениях могут использоваться другие полосы и диапазоны длин волн в пределах диапазонов, определенных в настоящем Добавлении.

5.1.2 Спектральные характеристики

Спектральные характеристики одноканальных интерфейсов СЦИ при скорости передачи до 10 Гбит/с приведены в Рекомендациях МСЭ-Т G.957 и G.691. Для более высоких скоростей передачи и больших расстояний, особенно в среде WDM, могут потребоваться дополнительные технические условия.

5.1.3 Максимальная спектральная ширина SLM-источников

Этот параметр для одноканальных систем СЦИ определен в Рекомендации МСЭ-Т G.691.

5.1.4 Максимальная спектральная ширина MLM-источников

Этот параметр для одноканальных систем СЦИ определен в Рекомендации МСЭ-Т G.691.

5.1.5 Импульсы с линейной частотной модуляцией

Этот параметр определен в Рекомендации МСЭ-Т G.691. Для систем с более высокой скоростью передачи или систем для больших расстояний, возможно также работающих с другими линейными кодами, вероятно, может потребоваться дополнительное описание изменчивости динамического поведения во времени. Этот параметр, а также его измерение подлежат дальнейшему изучению.

5.1.6 Коэффициент подавления боковых волн

Коэффициент подавления боковых волн для оптического источника с одиночной продольной волной определен в Рекомендациях МСЭ-Т G.957, G.691 и G.959.1. Значения приведены для систем IrDI СЦИ и OTN до 40 Гбит/с.

5.1.7 Максимальная спектральная плотность мощности

Максимальная спектральная плотность мощности определена в Рекомендации МСЭ-Т G.691.

5.1.8 Максимальная средняя выходная мощность канала

Максимальная средняя выходная мощность канала многоканального оптического сигнала описана и определена в Рекомендации МСЭ-Т G.959.1.

5.1.9 Минимальная средняя выходная мощность канала

Эта характеристика многоканального оптического сигнала описана и определена в Рекомендации МСЭ-Т G.959.1.

5.1.10 Центральная частота

Центральные частоты сигналов WDM приведены в Рекомендации МСЭ-Т G.694.1. В настоящей Рекомендации частоты приводятся вплоть до разноса 12,5 ГГц.

5.1.11 Разнос каналов

Разнос каналов определен в Рекомендации МСЭ-Т G.694.1 для DWDM, а также в Рекомендации МСЭ-Т G.694.2 для CWDM. Полная классификация систем WDM приведена в Рекомендации МСЭ-Т G.671.

5.1.12 Максимальное отклонение центральной частоты

Максимальное отклонение центральной частоты для NRZ-кодированных оптических каналов определено в Рекомендациях МСЭ-Т G.692 и G.959.1. Для других возможностей, в которых используется асимметричная фильтрация, может потребоваться другое определение, которое подлежит дальнейшему изучению.

5.1.13 Минимальный коэффициент затухания

Минимальный коэффициент затухания в расчете на один канал для систем WDM с NRZ-кодированием определен в Рекомендации МСЭ-Т G.959.1. Для сигналов с RZ-кодированием применяется тот же самый метод. Для других линейных кодов это определение подлежит дальнейшему изучению.

5.1.14 Маска глазковой диаграммы

Маски глазковой диаграммы одноканальных систем СЦИ приведены в Рекомендациях МСЭ-Т G.957, G.691, G.693 и в других Рекомендациях. Маска глазковой диаграммы для NRZ-кодированных многоканальных и одноканальных интерфейсов IrDI определена в Рекомендации МСЭ-Т G.959.1.

5.1.15 Поляризация

Этот параметр показывает распределение поляризации сигнала оптического источника. Данный параметр может влиять на допуск PMD, и он важен в случае поляризационного мультиплексирования.

5.1.16 Отношение оптический сигнал/шум оптического источника

Это значение показывает отношение оптической мощности сигнала к оптической мощности шумов оптического передатчика в данной полосе пропускания, связанного с трактом передачи.

5.2 Параметры подводного кабеля

Подводный кабель предназначен для обеспечения защиты оптических волокон от давления воды, продольного распространения воды, химического воздействия и влияния загрязнения водородом в течение всего расчетного срока службы кабеля.

Кабель служит также для того, чтобы не допустить ухудшения рабочих характеристик волокон при укладке, закапывании, восстановлении и эксплуатации кабеля с использованием стандартной практики выполнения подводных работ.

Соответствующие технические условия, а также связанные с реализацией аспекты подводных волоконно-оптических кабелей приведены в Рекомендациях МСЭ-Т G.973, G.974, а также G.977, соответственно.

5.2.1 Классификация подводных кабелей

5.2.1.1 Классификация, основанная на применении

Подводный волоконно-оптический кабель может быть:

- подводным кабелем с повторителями;
- подводным кабелем без повторителей;
- адаптированным для подводного применения наземным кабелем.

Подводные кабели с повторителями могут использоваться во всех подводных приложениях, главным образом для глубоководных проектов.

Подводный кабель без повторителей пригоден для использования в мелких и глубоких водах. Адаптированные для подводного применения наземные кабели (МТС) обычно используются для пересечения озер и рек. Все подводные кабели обычно тщательно тестируются с целью показать, что их можно укладывать и ремонтировать на месте даже в самых неблагоприятных метеорологических условиях без ухудшения оптических, электрических или механических свойств или надежности.

5.2.1.2 Классификация, основанная на защите кабеля

Подводный волоконно-оптический кабель должен обеспечивать защиту от вредных воздействий окружающей среды на глубине его использования: защиту от морской флоры и фауны, укусов рыб и истирания, а также защиту от агрессивного воздействия воды и движения судов. В Рекомендации МСЭ-Т G.972 определены различные типы защищенного кабеля, в частности:

- одножильный армированный кабель;
- двойной армированный кабель;
- армированный кабель для укладки на скальный грунт.

5.2.1.3 Классификация, основанная на защите волокна с помощью структуры кабеля

Прочность конструкции кабеля вместе с прочностью оптического волокна определяет общее механическое поведение кабеля. Эти параметры должны быть спроектированы так, чтобы гарантировать расчетный срок службы системы, принимая во внимание общее воздействие нагрузки, приложенной к кабелю во время укладки, восстановления и ремонта, так же как любой постоянной нагрузки или остаточного растяжения, приложенного к уложенному кабелю.

Для защиты оптического волокна обычно используются два основных типа конструкции кабеля:

- жесткая конструкция кабеля, в которой волокна прочно удерживаются в кабеле так, чтобы растяжение волокон в основном равнялось растяжению кабеля;
- свободная конструкция кабеля, в которой волокна свободно двигаются в кабеле так, чтобы растяжение волокон было ниже, чем в кабеле, оставаясь нулевым до тех пор, пока растяжение кабеля не достигнет заданной величины.

5.2.2 Параметры передачи оптического волокна в подводном кабеле

В целом характеристики передачи волокон перед каблированием (установкой в кабеле) подобны или совпадают с характеристиками передачи, определенными в Рекомендациях МСЭ-Т G.652, G.653, G.654, G.655 и G.656. Типы волокна выбираются так, чтобы оптимизировать общую стоимость и эксплуатационные характеристики системы.

Характеристики передачи волокон в элементарном кабельном участке должны находиться в указанных пределах изменения характеристик оптического волокна перед каблированием; в частности, конструкция кабеля, соединения кабелей и волокна должны быть такими, чтобы изгиб и микроизгиб волокна приводили к незначительному увеличению коэффициента затухания. Этот фактор должен учитываться при определении минимального радиуса изгиба оптического волокна в кабеле и в оборудовании (сростки оптических кабелей, их заделка, повторители и т. д.).

Ослабление в волокне, хроматическая дисперсия и PMD должны оставаться стабильными в указанных пределах для расчетного срока службы системы; в частности, конструкция кабеля должна снижать до приемлемых уровней проникновение водорода извне и формирование водорода внутри кабеля даже после разрыва кабеля на глубине его использования; также должна учитываться чувствительность оптического волокна к гамма-излучению.

Ниже перечислены основные параметры, которые характеризуют оптическое волокно:

- коэффициент ослабления на всех рабочих длинах волн, выраженный в дБ/км;
- коэффициент хроматической дисперсии на всех рабочих длинах волны в пс/нм.км;
- длина волны λ_0 с нулевой дисперсией в нм;
- наклон коэффициента дисперсии около рабочих длин волн в пс/нм².км;
- нелинейный показатель преломления n_2 в м²/Вт;

- эффективная площадь сечения A_{eff} в мкм^2 ;
- коэффициент нелинейности n_2/A_{eff} в Вт^{-1} ;
- усредненная по ансамблю дисперсия поляризованной моды (PMD) в $\text{пс}/(\text{км})^{1/2}$.

Используя эти параметры, проектировщики подводных систем могут различать несколько типов оптических волокон. Среди них:

- Одномодовое оптическое волокно с несмещенной дисперсией (NDSF), определенное в Рекомендации МСЭ Т G.652.
- Одномодовое оптическое волокно со смещенной дисперсией (DSF), определенное в Рекомендации МСЭ-Т G.653.
- Одномодовое оптическое волокно со смещенной длиной волны отсечки (CSF), определенное в Рекомендации МСЭ-Т G.654.
- Одномодовое оптическое волокно с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF), определенное в Рекомендациях МСЭ-Т G.655 и G.656.
- Одномодовое оптическое волокно с компенсированной дисперсией (DCF).
- Оптическое волокно с отрицательным наклоном дисперсии.
- Оптическое волокно с очень большой эффективной площадью сечения.

В зависимости от технических требований к системе (скорость передачи данных и кодирование, количество длин волн, промежутки между усилителями, выходная мощность усилителя, длина линии и т. д.) для обеспечения эксплуатационных характеристик могут использоваться различные комбинации этих типов оптического волокна. В таком случае говорят, что эта система является системой с управляемой дисперсией.

5.2.2.1 Потери в оптическом волокне

Потери в оптическом волокне характеризуются коэффициентом ослабления, выраженным в $\text{дБ}/\text{км}$ (логарифмическое значение) или в км^{-1} (линейное значение).

5.2.2.2 Нелинейность оптического волокна

Нелинейные эффекты нужно учитывать, когда длинные оптические участки проектируются для OFA с большой выходной мощностью. Эти эффекты накапливаются вдоль оптической линии связи и могут значительно ухудшить распространение сигналов. В SWS преобладающим нелинейным эффектом является фазовая автомодуляция сигнала, пропорциональная коэффициенту нелинейности (отношению n_2/A_{eff}), умноженному на квадрат его нормированной амплитуды. При наличии хроматической дисперсии такая нелинейность вызывает уширение импульса во временной области с последующим ухудшением эксплуатационных характеристик системы. В WDMS или DWDMS преобладающим эффектом обычно является перекрестная фазовая модуляция, обусловленная наличием смежных длин волн. Такая нелинейность вызывает ухудшение эксплуатационных характеристик.

5.2.2.3 Дисперсия поляризованной моды (PMD)

Небольшие отклонения от идеальной цилиндрической симметрии в сердцевине волокна приводят к двойному лучепреломлению из-за различных индексов мод, связанных с ортогональными поляризованными компонентами основной моды. Дисперсия PMD вызывает уширение импульса и должна иметь ограниченное максимальное значение. Это значение можно указать для всей линии связи, обычно оно постоянно до определенного отношения "время передачи бита/интервал". PMD выражают в $\text{пс}/(\text{км})^{1/2}$.

5.2.2.4 Хроматическая дисперсия

Хроматическая дисперсия – это зависимость групповой скорости от длины волны, при этом все спектральные компоненты оптического сигнала распространяются с различными скоростями. Она вызывает уширение импульса и может быть одной из основных причин ухудшений. В зависимости от конструкции системы и особенно в зависимости от количества длин волн (в системах WDM) интерес может представлять абсолютно разное управление хроматической дисперсией с целью ограничения явлений уширения импульса и других явлений распространения. В целом такое управление приводит к карте дисперсии, которая показывает степень управления дисперсией по всей линии связи.

5.2.3 Механические параметры оптического волокна

Механические свойства оптического волокна в значительной степени зависят от применения проверочного испытания ко всей длине оптического волокна. Проверочное испытание оптического волокна характеризуется нагрузкой, прикладываемой к оптическому волокну, или растяжением оптического волокна и длительностью приложения нагрузки. Уровень проверочного испытания должен определяться в зависимости от конструкции кабеля. Аналогичным проверочным испытаниям должны подвергаться и сростки волокон. Рекомендуется, по возможности, сокращать продолжительность проверочных испытаний.

Механическая прочность оптического волокна и сростков должна учитываться при определении минимального радиуса изгиба оптического волокна в кабеле и в оборудовании (повторители, разветвители, кабельные соединительные муфты или концевые заделки кабеля).

5.2.4 Механические параметры кабеля

Кабель с кабельными соединительными муфтами, кабельными соединителями и кабельными переходами должен подвергаться безопасной обработке на кабельных судах в ходе проведения работ по укладке и ремонту; он должен выдерживать неоднократные проходы по барабану кабельного судна.

Кабель должен быть ремонтпригодным, причем время выполнения кабельного сростка на борту в ходе ремонта при благоприятных условиях работы должно быть достаточно малым.

Если кабель зацеплен крюком, якорем или рыбацкими снастями, он обычно ломается при нагрузке, которая приблизительно равна части (зависящей от типа кабеля и характеристик крюка) нагрузки, разрывающей кабель в условиях прямой линии связи; поэтому существует риск сокращения срока службы и надежности оптического волокна и кабеля вблизи точки разрыва, в частности, вследствие напряжения, приложенного к оптическому волокну, или проникновения воды; поврежденная часть кабеля должна быть заменена; ее длина не должна превышать заданное значение.

Несколько параметров определены в Рекомендации МСЭ-Т G.972 в целях описания механических характеристик кабеля и возможности укладки, восстановления и ремонта кабеля и должны использоваться в качестве общего руководства для работы с кабелем:

- разрывающая нагрузка кабеля, измеренная в ходе квалификационного испытания;
- нагрузка кабеля, разрушающая оптическое волокно, измеренная в ходе квалификационного испытания;
- номинальная кратковременная прочность на растяжение, которая может быть случайно достигнута, особенно в ходе восстановительных работ;
- номинальная рабочая прочность на растяжение, которая может быть достигнута в ходе выполнения ремонтных работ;
- номинальная постоянная прочность на растяжение, которая характеризует состояние кабеля после укладки;
- минимальный радиус изгиба кабеля, что является руководящим принципом при проведении работ с кабелем.

5.2.5 Электрические параметры кабеля

Кабель должен допускать дистанционную подачу питания на повторители или разветвители, а также должен включать проводник с низким линейным сопротивлением и высоковольтный изолятор.

5.2.6 Строительная длина подводного кабеля

Строительная длина подводного кабеля должна быть максимально большой. Обычно строительная длина должна превышать 25 км.

5.2.7 Физические параметры подводного кабеля

Физические параметры подводного кабеля включают внешний диаметр, вес на воздухе, вес в воде.

5.2.8 Ремонтный кабель

Ремонтный кабель используется при поломке или повреждении подводного кабеля. Ремонтный кабель должен соответствовать восстанавливаемому кабелю в отношении оптических, электрических и механических характеристик.

5.3 Параметры подводных повторителей

Параметры подводных повторителей приведены в Рекомендациях МСЭ-Т G.974 и G.977.

5.3.1 Типы повторителей

Существуют повторители трех типов:

- оптический повторитель с электрической регенерацией 3R;
- оптический повторитель с усилителем EDF;
- оптический повторитель с комбинационным (рамановским) усилением.

ПРИМЕЧАНИЕ. – В других пунктах настоящего Добавления используется усилитель OFA, который включает усилители EDF и рамановские усилители.

5.3.2 Параметры оптического повторителя с электрической регенерацией 3R

5.3.2.1 Оптические параметры

Сигнал на оптическом интерфейсе должен соответствовать бюджету мощности оптического участка. В частности, во время сборки системы должны соблюдаться некоторые пределы:

- Минимальная средняя входная мощность повторителя (дБм): средняя оптическая мощность оптического линейного сигнала, которая должна присутствовать во время сборки линии связи на входном оптическом интерфейсе повторителя, чтобы бюджет оптической мощности участка кабеля обеспечивал требуемый запас.
- Минимальная средняя выходная мощность повторителя (дБм): средняя оптическая мощность оптического линейного сигнала, которая должна присутствовать во время сборки линии связи на выходном оптическом интерфейсе повторителя, чтобы бюджет оптической мощности участка кабеля обеспечивал требуемый запас.

Для интегрированных систем аналогичные параметры должны быть определены как часть технических требований по интеграции к оптическому интерфейсу интегрированной линии.

5.3.2.2 Параметры дрожания

Характеристики дрожания повторителя (допуск на дрожание, максимальное дрожание на выходе, характеристики передачи дрожания) на оптическом интерфейсе должны быть совместимы с техническими требованиями к системе.

Для интегрированных систем те же самые параметры (спектральная плотность дрожания на выходе повторителя и регулировка дрожания) должны быть определены как часть технических требований по интеграции к оптическому интерфейсу интегрированной линии.

5.3.3 Параметры оптического повторителя с усилением EDF

5.3.3.1 Оптические параметры

В Рекомендации МСЭ-Т G.661 приведены определение и методы испытаний соответствующих обобщенных параметров усилителей EDF. Для усилителей EDF в повторителях необходимо учитывать следующие параметры:

- коэффициент усиления слабого сигнала (SSG);
- номинальный коэффициент усиления (NG);
- коэффициент шума (NF);
- номинальная выходная мощность сигнала (NSOP);
- номинальная входная мощность сигнала (NSIP);
- коэффициент сжатия (CF);

- минимальная средняя входная мощность повторителя (дБм);
- минимальная средняя выходная мощность повторителя (дБм);
- характеристики дрожания;
- характеристики фазовращателя.

Кроме того, необходимо учитывать (особенно для WDMS) следующий параметр:

- равномерность усиления (GF).

5.3.3.2 Эффекты поляризации

Отдельные оптические компоненты усилителя EDF могут быть выбраны для обеспечения того, чтобы его характеристики были достаточно нечувствительны к эффектам поляризации, таким как PDL и PMD, в зависимости от требований к системе. Некоторые другие эффекты поляризации, такие как PDG и PNB, являются внутренними, и их можно избежать или ограничить только с помощью внешних средств (например, путем скремблирования поляризации сигнала в передатчике TTE).

5.3.4 Параметры оптического повторителя с рамановским усилением

Подлежат дальнейшему изучению.

5.3.5 Механические параметры повторителя

5.3.5.1 Корпус повторителя

Корпус повторителя должен иметь конструкцию, которая допускает работу, установку, восстановление и повторную установку оптических повторителей на больших глубинах без ухудшения механических, электрических и оптических характеристик.

Технические соображения в отношении конструкции корпуса приведены ниже:

- При определении базовой конструкции и распределения компонентов необходимо учитывать характеристики, надежность и простоту производства.
- Требуется конструкция корпуса повторителя с эффективными амортизационными и теплорассеивающими свойствами.
- Требуются высоконадежные, стойкие к сжатию, газонепроницаемые провода с низкими потерями, для того чтобы оптические волокна и электрическая шина питания могли войти в корпус повторителя.
- Требуется высоконадежное соединение кабелей с низкими потерями, стойкое к сжатию и имеющее соответствующую прочность на растяжение.
- Конструкция соединения кабеля с повторителем.

5.3.5.2 Внутренний блок

Установленный внутри корпуса повторителя внутренний блок может содержать несколько модулей ввода мощности и несколько пар OFA для усиления оптического сигнала от одной или нескольких пар оптических волокон в обоих направлениях.

5.3.5.3 Защита от коррозии

Внешний корпус OSR должен быть сконструирован так, чтобы обеспечивалась защита от коррозии в морской воде.

5.3.5.4 Сопrotивление давлению воды

OSR должен быть сконструирован так, чтобы выдерживать значительные уровни давления морской воды на больших глубинах.

5.3.5.5 Высоковольтная изоляция

Для обеспечения работы повторителя требуется высоковольтная изоляция между корпусом повторителя и внутренним блоком.

5.3.5.6 Теплорегулирование

Тепло, выделяемое электронными компонентами внутри OSR, может достаточно хорошо рассеиваться благодаря теплопроводности корпуса повторителя.

5.3.5.7 Герметизация корпуса повторителя

Повторитель должен быть обеспечен защитой от проникновения воды и газов непосредственно из окружающего моря и от утечки вдоль оси кабеля вследствие разрыва кабеля вблизи повторителя.

5.3.5.8 Контроль окружающей атмосферы

Надежность и правильная работа компонентов могут потребовать управляемой внутренней атмосферы в том, что касается относительной влажности или любого вероятного газа, который может образоваться внутри повторителя.

5.3.6 Электрические параметры повторителя

5.3.6.1 Модули питания

OSR питаются постоянным током от оконечной станции через электрический проводник в кабеле. Силовые модули подают питание на пары OFA, чтобы обеспечить оптическое усиление. OSR способен принимать обе полярности электропитания.

5.3.6.2 Защита от перенапряжения

OSR должен быть защищен от скачков напряжения, которые могут сформироваться в результате внезапного прерывания подачи высокого напряжения по кабелю (разрыв кабеля или короткое замыкание в PFE).

5.4 Параметры кабельных муфт

Кабельные муфты позволяют соединять два сегмента кабеля, они обеспечивают оптическую, электрическую и механическую непрерывность между смежными кабельными участками. Кабельные муфты обеспечивают возможность:

- сращивания подучастков кабелей с образованием участков;
- соединения кабеля с повторителями в ходе сборки системы;
- заделки концов кабелей для последующего преобразования в межкабельные соединения в ходе установки системы;
- соединения подводного кабеля с наземным кабелем при их стыковке на берегу.

Муфта подводного кабеля предназначена для обеспечения надежных соединений между кабелями или повторителем и кабелем, способных выдержать неблагоприятные воздействия при погрузке на судно, при укладке, восстановлении, ремонте и повторной укладке на глубинах до 7500 метров. Существуют соответствующие конструкции кабельных муфт, которые удовлетворяют различным требованиям к армированному подводному кабелю.

5.4.1 Оптические параметры

5.4.1.1 Потери в месте сращивания

Потери в месте сращивания означают повышенные потери из-за сращивания оптического волокна и дополнительного оптического волокна при соединении кабелей. Весьма желательно уменьшить потери в месте сращивания. Методы испытания этих потерь должны соответствовать Рекомендации МСЭ-Т G.650.1, если она применима.

5.4.2 Механические параметры

5.4.2.1 Прочность

Несущие элементы кабеля заделываются в съемную втулку, прочность на разрыв которой превышает 90 процентов от требуемой минимальной прочности на разрыв кабеля.

5.4.2.2 Предел прочности на разрыв

Предел прочности на разрыв определен в Рекомендации МСЭ-Т G.972. Другие возможности подлежат дальнейшему изучению.

5.4.2.3 Защита от коррозии

Муфта должна быть защищена от коррозии из-за воздействия морской воды.

5.4.2.4 Сопrotивление давлению воды

Муфта должна быть сконструирована так, чтобы выдерживать большие уровни давления.

5.4.2.5 Герметизация муфты

Муфта должна иметь защиту от проникновения воды и газов из окружающего моря.

5.4.2.6 Характеристики изгиба

Ограничивающие изгиб защитные кожухи обеспечивают постепенный переход к жесткости при изгибах в муфте и предназначены для прохождения кабеля через оборудование для укладки кабеля на борту кабельных судов.

5.4.3 Электрические параметры

С помощью этого соединения осуществляется заделка электрического проводника в кабеле и обеспечивается непрерывность электрической цепи в муфте.

5.4.3.1 Высоковольтная изоляция

Для обеспечения работы муфты требуется высоковольтная изоляция между проводом электропитания кабеля и окружающей морской средой.

5.4.4 Физические параметры

Физические параметры кабельной муфты включают длину, внешний диаметр, вес на воздухе и вес в воде.

5.5 Параметры приемников

Эти параметры определены в опорных точках R или MPI-R приемника согласно Рекомендациям МСЭ-Т G.957, G.691, G.692 и G.959.1.

5.5.1 Чувствительность

Показатели чувствительности приемников для одноканальных систем СЦИ при скорости передачи до 10 Гбит/с определены в Рекомендациях МСЭ-Т G.957 и G.691. Показатели чувствительности приемников IrDI СЦИ и OTN определены в Рекомендации МСЭ-Т G.959.1.

Чувствительность приемника определяется как значение в конце срока службы, причем для наихудшего случая учитываются данные старения и температурные допуски, а также маска глазковой диаграммы и потери в виде коэффициента затухания в результате несовершенства передатчика, определяемого техническими требованиями передатчика в отношении конкретного интерфейса.

Однако потери, вызванные влиянием тракта, учитываются отдельно от базового значения чувствительности.

5.5.2 Перегрузка

Определение перегрузки приемника и значения этой перегрузки для одноканальных систем СЦИ при скорости передачи до 10 Гбит/с определены в Рекомендациях МСЭ-Т G.957 и G.691. Определение перегрузки и значения для приемников IrDI СЦИ и OTN при скорости передачи до 40 Гбит/с определены в Рекомендации МСЭ-Т G.959.1.

5.5.3 Минимальная средняя входная мощность канала

Минимальная средняя входная мощность канала оптически мультиплексированных интерфейсов IrDI при скорости передачи до 10 Гбит/с для многоканальных приемников определена в Рекомендации МСЭ-Т G.959.1

5.5.4 Максимальная средняя входная мощность канала

Максимальная средняя входная мощность канала оптически мультиплексированных интерфейсов IrDI при скорости передачи до 10 Гбит/с для многоканальных приемников определена в Рекомендации МСЭ-Т G.959.1.

5.5.5 Потери в оптическом тракте

Определение потерь в оптическом тракте и их значения для одноканальных систем СЦИ при скорости передачи до 10 Гбит/с определены в Рекомендациях МСЭ-Т G.957 и G.691. Определение потерь в оптическом тракте и их значения для одноканального и многоканального приемников IrDI OTN при скорости передачи до 10 Гбит/с определены в Рекомендации МСЭ-Т G.959.1. Определения потерь в оптическом тракте и их значения для одноканальных приемников IrDI СЦИ и OTN при скорости передачи до 40 Гбит/с также определены в Рекомендации МСЭ-Т G.959.1.

5.5.6 Максимальная разность уровней входной мощности каналов

Этот параметр указывает максимальную разность между каналами оптически мультиплексированного сигнала, и его определение дано в Рекомендации МСЭ-Т G.959.1.

5.5.7 Минимальное отношение OSNR на входе приемника

Это значение определяет минимальное отношение оптический сигнал/шум, которое требуется для достижения требуемой величины КОБ в опорной точке приемника при заданном уровне мощности в системах с ограниченным отношением OSNR (с линейным усилением). Следует отметить, что это расчетный параметр.

6 Топология оптической сети

В подводных волоконно-оптических кабельных системах используются следующие типы топологии оптической сети: пункт-пункт, звезда, звезда с ответвлениями, магистраль с ответвлениями, гирлянда, кольцо и кольцо с ответвлениями. Этот раздел основан на информации, приведенной в [1].

6.1 Пункт-пункт

Эта конфигурация (рисунок 6-1) состоит из прямой подводной линии связи между двумя оконечными передающими установками (ТТЕ), расположенными на двух различных оконечных станциях (TS).

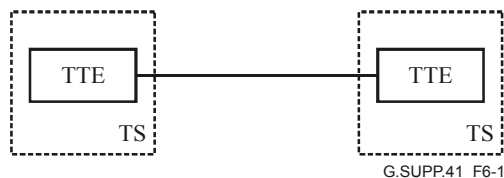


Рисунок 6-1 – Топология типа "пункт-пункт"

6.2 Звезда

Эта конфигурация (рисунок 6-2) состоит из основной оконечной станции (TS), с которой с помощью отдельных кабелей соединены несколько других TS. В базовой конфигурации типа "звезда" трафик непосредственно независимо передается от установок ТТЕ основной TS в ТТЕ других TS. Поэтому сеть со звездообразной структурой требует отдельного кабеля для каждой TS, что приводит к относительно дорогостоящей конфигурации, особенно если TS географически удалены.

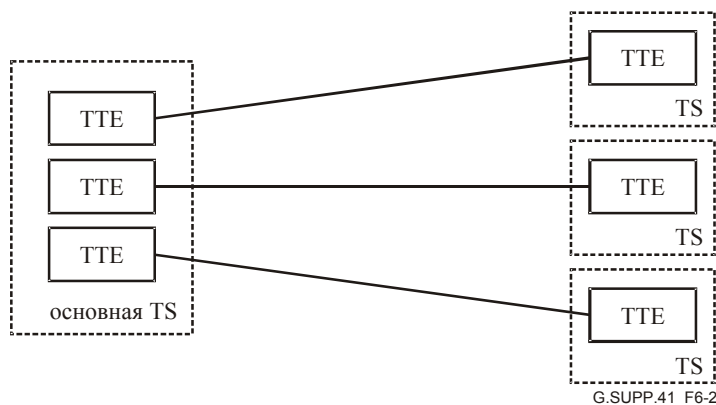


Рисунок 6-2 – Топология типа "звезда"

6.3 Звезда с ответвлениями

Эта конфигурация (рисунок 6-3) обеспечивает ту же пропускную способность, что и базовая конфигурация типа "звезда", за исключением того, что разделение трафика происходит под водой, что снижает до минимума стоимость отдельного кабеля между удаленными TS. Разделение трафика достигается с помощью разветвителя (BU), который связывает оптические волокна одного магистрального кабеля с отдельными оптическими волокнами в двух или нескольких ветвях.

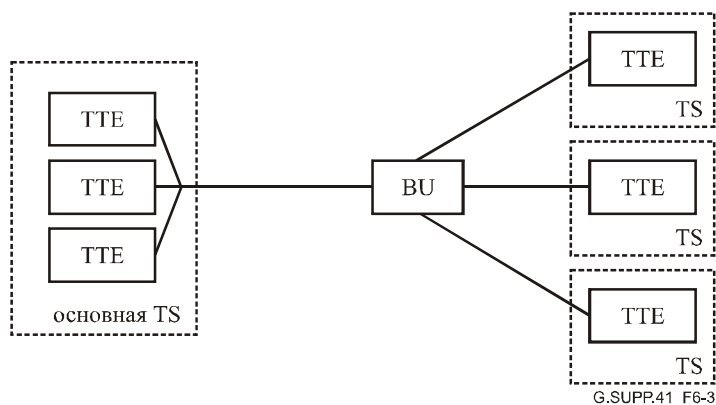


Рисунок 6-3 – Топология типа "звезда с ответвлениями"

6.4 Магистраль с ответвлениями

В этой конфигурации (рисунок 6-4) несколько TS с TTE подключаются к одному магистральному кабелю с помощью разветвителей, которые позволяют извлечь часть трафика в направлении TS ветвей.

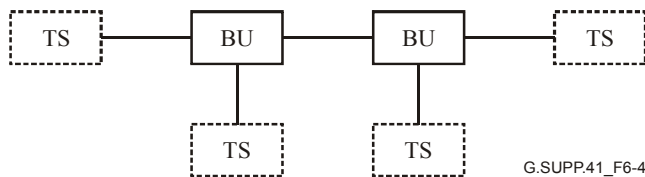


Рисунок 6-4 – Топология типа "магистраль с ответвлениями"

6.5 Гирлянда

Гирлянда (рисунок 6-5) в основном состоит из ряда шлейфов между основными прибрежными точками, и зачастую (хотя и не всегда) она развертывается как система без повторителей. В ожидании будущего роста требований к пропускной способности эти применения без повторителей обычно проектируются с использованием кабелей, состоящих из большего количества волокон, чем требуется для первоначального обслуживания. Таким образом, в случае возникновения потребности в дополнительной пропускной способности требуются дополнительные инвестиции только в окончательное оборудование. Архитектура гирлянды нередко отражает архитектуру типичной наземной инсталляции. Такая архитектура часто может использоваться как дополнительный обходной маршрут к существующей наземной системе. Эта конфигурация становится все более популярной альтернативой наземной системе, особенно когда континентальный рельеф затрудняет инсталляцию и создает проблемы обслуживания.

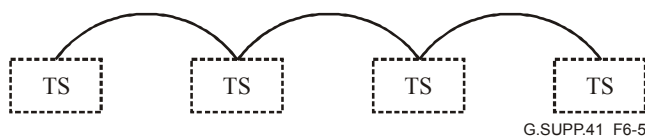


Рисунок 6-5 – Топология типа "гирлянда"

6.6 Кольцо

Конфигурация типа "кольцо" (рисунок 6-6) по существу представляет собой набор соединенных кабелей типа "пункт-пункт", имеющих пропускную способность, которая вдвое превышает необходимую пропускную способность при передаче. В случае, когда любой одиночный отказ происходит в пределах кольца (например, при обрыве кабеля), трафик направляется вокруг кольца – обходя нерабочий сегмент – до первоначального адресата. Установленное на берегу передающее оборудование обеспечивает автоматическое обнаружение отказа и управление переключением всего кольца без потери вызова.

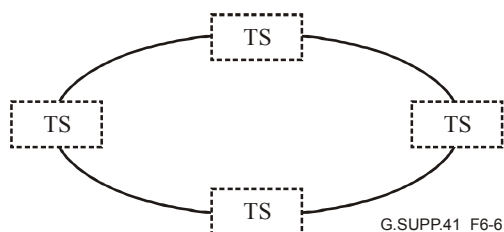


Рисунок 6-6 – Топология типа "кольцо"

6.7 Кольцо с ответвлениями

Эта конфигурация (рисунок 6-7) расширяет базовые возможности кольца эффективным с точки зрения затрат способом путем добавления разветвителя. Структура "кольцо с ответвлениями" сохраняет самовосстанавливающуюся природу кольца. К тому же кольцо с ответвлениями можно рассматривать как объединение магистрали с ответвлениями и кольца, сохраняющее большую часть преимуществ обеих конфигураций. Эта конфигурация может быть создана различными способами, включая соединение через другие сети. При соответствующем планировании сеть может быть установлена как магистраль с ответвлениями, а затем усовершенствована до кольца с ответвлениями.

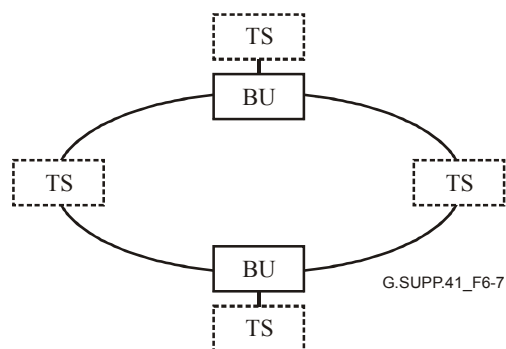


Рисунок 6-7 – Топология типа "кольцо с ответвлениями"

7 Соображения по проектированию системы

7.1 Бюджет оптической мощности

Бюджет оптической мощности, определенный в Рекомендации МСЭ-Т G.976, является договорной функциональной сметой, которая гарантирует, что характеристики системы превзойдут минимально требуемые данные КОБ, определенные в Рекомендациях МСЭ-Т G.826 и/или G.828.

Бюджет оптической мощности начинается с простого линейного показателя добротности (коэффициента Q), в котором учитывается только ухудшение из-за шума излучения ASE усилителей (*среднее значение Q*). Затем бюджет оптической мощности распределяет данные потерь/ухудшений для всех типов ухудшения (из-за передачи, из-за оконечного оборудования и т. д.). Ухудшение оценивается с использованием сочетания теоретического анализа, компьютерного моделирования и прямых измерений на экспериментальных испытательных стендах.

Для каждого подводного участка цифровой линии рекомендуется устанавливать два различных бюджета мощности, один в начале срока службы (BOL), а другой – в конце срока службы (EOL):

- Бюджет мощности BOL обеспечивает характеристики на участке цифровой линии для наихудшего случая, которые будут измерены во время запуска.
- Бюджет мощности EOL обеспечивает расчетные характеристики на участке цифровой линии для наихудшего случая в конце срока службы системы и включает уровни запаса на старение, внутренние отказы и заданные запасы на ремонтные работы.

Запас для EOL – это разность между наихудшим коэффициентом Q , рассчитанным в конце срока службы системы, и минимальным коэффициентом Q , необходимым для удовлетворения требуемых характеристик передачи. Кроме того, бюджет оптической мощности должен ясно определить минимальный коэффициент Q , необходимый для получения заданного показателя ошибок в системе, и включить увеличение запаса, обеспечиваемое при использовании FEC (если применяется). (См. рисунок 7-1.)

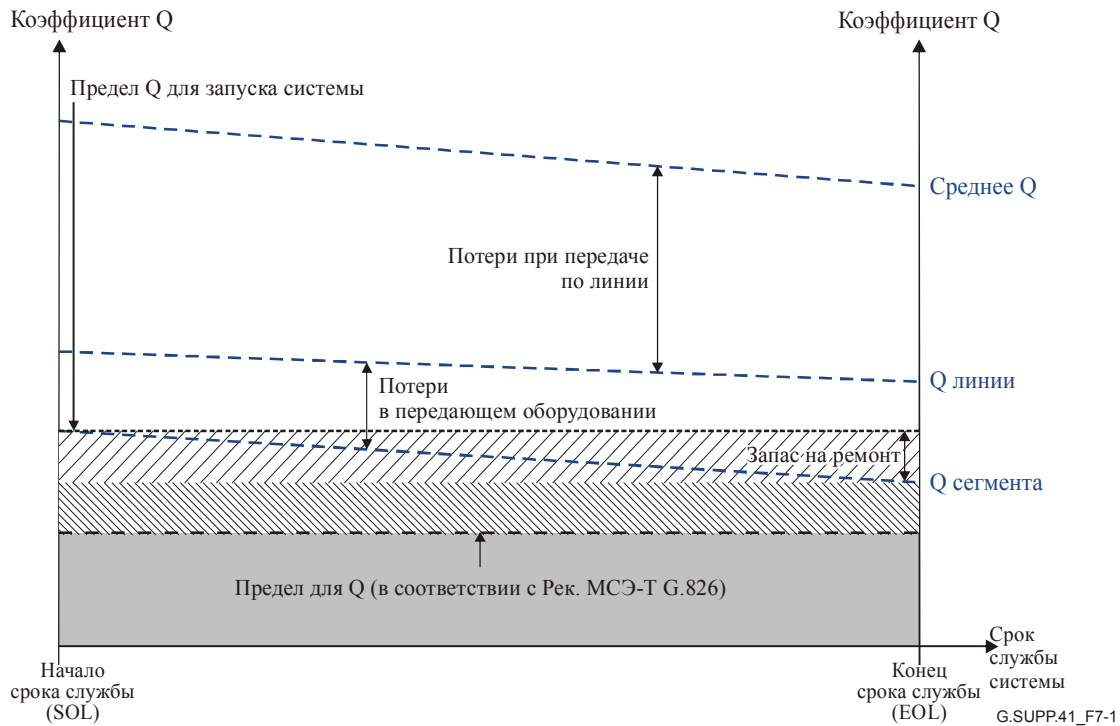


Рисунок 7-1 – Пример структуры бюджета мощности

7.1.1 Добротность (коэффициент Q)

В таблице бюджета оптической мощности подводного участка цифровой линии используются коэффициенты Q, описанные в Приложении A/G.977, и все значения выражены в децибелах. Следующий текст основан на Добавлении 39 к Рекомендациям МСЭ-Т серии G и воспроизводится здесь для удобства читателя.

Коэффициент Q – это отношение сигнал/шум в схеме принятия решений в единицах напряжения или тока, определяемое выражением:

$$Q = \frac{(\mu_1 - \mu_0)}{(\sigma_1 + \sigma_0)}, \quad (7-1)$$

где $\mu_{1,0}$ – среднее значение напряжений или токов в посылке/паузах, а $\sigma_{1,0}$ – среднеквадратичное отклонение. Например, КОБ 10^{-12} соответствует $Q \approx 7,03$.

Поскольку в практически используемых методах оценки коэффициента Q измерения проводятся в верхних и нижних областях полученного "глазка", чтобы сделать вывод о качестве сигнала на оптимальном пороге принятия решения, значение Q можно рассматривать как качественный индикатор фактической величины КОБ.

Ниже приведено аналитическое математическое соотношение с КОБ (в случае работы без FEC), когда установлено оптимальное значение порога:

$$КОБ = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right), \quad (7-2)$$

где:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{\beta^2}{2}} d\beta. \quad (7-3)$$

Обычно используемое приближение для этой функции равно:

$$КОБ \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \quad (7-4)$$

для $Q > 3$ (допущение Гаусса).

Альтернативное выражение, которое дает точные значения по всему диапазону значений Q [2], приведено ниже:

$$КОБ \approx \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{\sqrt{2\pi} \left(\left(1 - \frac{1}{\pi}\right)Q + \frac{\sqrt{Q^2 + 2\pi}}{\pi} \right)} \quad (7-5)$$

График, на котором показаны эти два приближения для значений Q не более 5, приведен на рисунке 7-2.

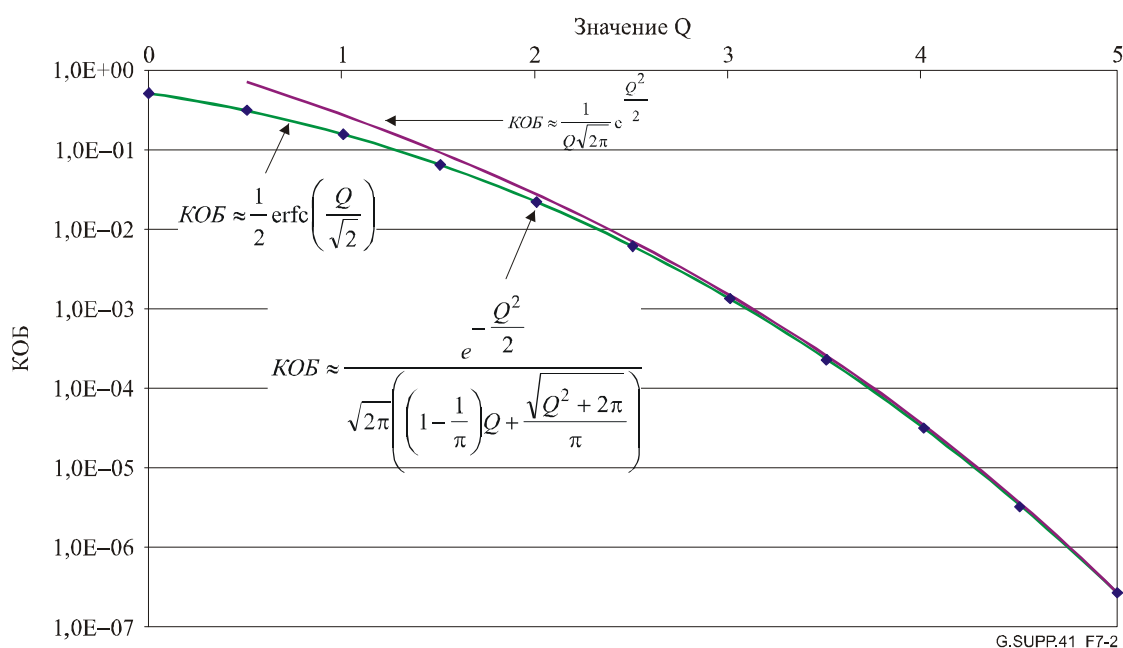


Рисунок 7-2 – Приближения, связывающие КОБ и Q

Коэффициент Q указывается в децибелах, а не в линейных значениях:

$$Q(\text{децибелы}) = 20 \times \log_{10} Q(\text{линейный}) \quad (7-6)$$

Показатели качества подводного участка цифровой линии должны характеризоваться посредством измерения его коэффициента Q или прямого измерения КОБ, которое должно удовлетворять договорным пусковым предельным значениям коэффициента Q, указанным в бюджете оптической мощности.

Обращается внимание на то, что уравнения с 7-2 по 7-5 справедливы только в случае гауссовского распределения шума. Это приближение принято для видов модуляции, основанных на методе ООК, который широко используется в подводных системах. Виды модуляции, основанные на фазовой модуляции, такие как манипуляция DPSK, которая заново изучалась в течение нескольких последних лет для подводных применений, требуют дальнейшего изучения.

7.1.2 Подходящие параметры для бюджета оптической мощности

Согласно Рекомендации МСЭ-Т G.977 рекомендуется, чтобы бюджет оптической мощности как минимум принимал во внимание ухудшения, появившиеся в результате следующих явлений и соображений:

- Накопление оптических шумов (см. п. 7.1.3) → Вычисление среднего коэффициента Q.
- Ухудшения распространения (см. п. 7.1.4) → Вычисление коэффициента Q линии.
 - Ухудшение распространения из-за объединенных эффектов хроматической дисперсии и нелинейных эффектов (фазовая автомодуляция, перекрестная фазовая модуляция, явления четырехволнового смешения между линейными оптическими каналами, вынужденное комбинационное рассеяние и т. д.) (см. п. 7.1.4.1).
 - Ухудшение распространения из-за оптических эффектов поляризации, таких как дисперсия поляризованной моды (PMD), потери, зависящие от поляризации (PDL), усиление, зависящее от поляризации (PDG). Поскольку эти ухудшения флуктуируют во времени, отдельное условие должно быть принято для изменений характеристик во времени (см. п. 7.1.4.2).
 - Ухудшения из-за неравномерности кумулятивной кривой усиления по всему сегменту (см. п. 7.1.4.3).
 - Неоптимальное ухудшение из-за предскажений (см. п. 7.1.4.4).
 - Ухудшения из-за рассогласования длины волны (длин волн) подводного участка цифровой линии (см. п. 7.1.4.5).
 - Ухудшения из-за проведения контроля (см. п. 7.1.4.6).
 - Ухудшения, вызванные процессом производства и влиянием окружающей среды (см. п. 7.1.4.7).
- Ухудшения, учитывающие неидеальные характеристики оконечного передающего оборудования (связанные с характеристиками коэффициента Q оконечного передающего оборудования при каскадном включении) (см. п. 7.1.5) → Вычисление коэффициента Q сегмента.
- Специально для бюджета мощности EOL необходимо добавить некоторые дополнительные уровни запаса (см. п. 7.1.6) → Запас сегмента.
 - Запас для учета определенных операций ремонта (ремонтные сростки, дополнительная потеря и изменение карты дисперсии из-за дополнительной длины кабеля после ремонта и т. д.) (см. п. 7.1.6.1).
 - Запас для учета старения кабеля и компонентов (см. п. 7.1.6.2).
 - Запас для учета предсказанных отказов некоторых компонентов, таких как отказы схем накачки лазера (см. п. 7.1.6.3).

Перекрестная фазовая модуляция и четырехволновое смешение между оптическими каналами, вынужденное комбинационное рассеяние, неравномерность кумулятивной кривой усиления и неоптимальные относительные мощности оптических каналов – это ухудшения, которые особенно применимы для систем WDM и DWDM, поскольку они связаны с одновременным распространением нескольких оптических сигналов в одном оптическом волокне.

7.1.3 Накопление оптических шумов

7.1.3.1 Вычисление отношения оптический сигнал/шум

В системе, включающей каскадную цепочку оптических усилителей, шум ASE накапливается от вклада каждого оптического усилителя. Отношение оптический сигнал/шум (OSNR) уменьшается после прохождения через каждый оптический усилитель. Таким образом, OSNR – это полезный параметр для контроля и описания характеристик оптического усилителя. На рисунке 7-3 показана многоканальная система, которая используется в качестве эталонного теста (N участков, N – 1 линейных усилителей).

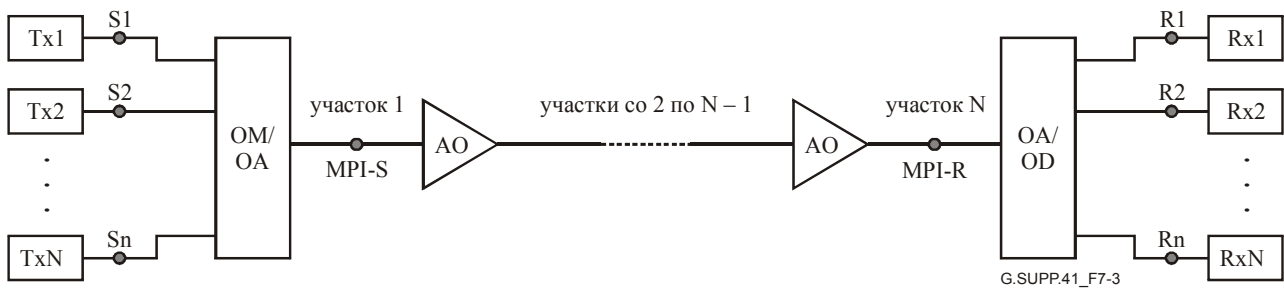


Рисунок 7-3 – Представление оптических интерфейсов линейной системы (многоканальная система с N участками)

Существуют два различных способа вычисления OSNR:

- i) простое накопление шумов при постоянной мощности сигнала; или
- ii) накопление шумов при постоянной общей выходной мощности.

Хотя наиболее реалистичным предположением является пункт ii), формула, полученная при использовании гипотезы i), является хорошим приближением случая ii) и поэтому широко используется.

В этом разделе мы будем разрабатывать пункт i): мощность сигнала остается неизменной.

Для системы, изображенной на рисунке 7-3, делаются следующие основные допущения:

- Все оптические усилители, содержащиеся в цепочке, имеют одинаковый коэффициент шума (NF).
- Потери на всех участках равны.
- Уровни общей выходной мощности всех линейных усилителей одинаковы.

В этом случае OSNR на входах приемников (точка R_i на рисунке 7-3, $i = 1, \dots, n$) может быть приблизительно выражено как:

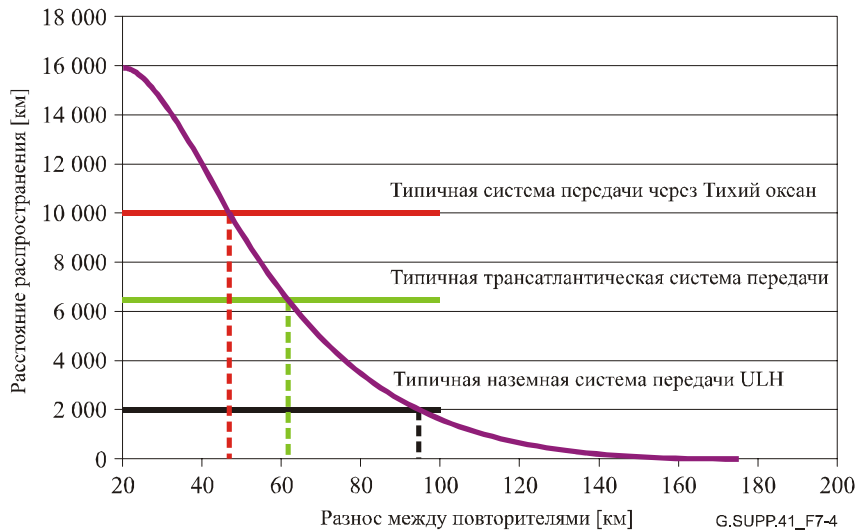
$$OSNR = \frac{P_{out}}{N_\lambda \cdot N_{amp} \cdot NF - \frac{1}{G} \cdot G \cdot h\nu \cdot B_r}, \quad (7-7)$$

где P_{out} – общая выходная мощность усилителя в Вт, G – коэффициент усиления усилителя (который принят равным общим потерям на участке), NF – коэффициент шума оптического усилителя, h – постоянная Планка в Дж·с, ν – оптическая частота в Гц, B_r – оптическая эталонная полоса пропускания в Гц, N_λ – общее количество длин волн, а N_{amp} – общее количество усилителей. Уравнение 7-7 указывает, что шум ASE накапливается от всех N_{amp} усилителей.

Если коэффициент усиления линейных усилителей является очень высоким, т. е. $G \gg 1$, то уравнение 7-7 может быть упрощено до вида:

$$OSNR = \frac{P_{out}}{N_\lambda \cdot N_{amp} \cdot NF \cdot G \cdot h\nu \cdot B_r}, \quad (7-8)$$

где коэффициент усиления G равняется $e^{\alpha L}$, где L – длина участка. Поэтому для данного OSNR полная достижимая длина является функцией длины участка. На рисунке 7-4 приведен пример типичных длин участков для обычных подводных и наземных систем.



ПРИМЕЧАНИЕ. – Используются следующие параметры: $OSNR = 16$ дБ при эталонной полосе пропускания $B_r = 0,1$ нм, $NF = 4,7$ дБ, $N_\lambda = 64$ канала, $P_{out} = 14$ дБм и затухание в оптическом волокне = $0,21$ дБ/км.

Рисунок 7-4 – Пример расстояния между повторителями, требуемого для получения типичной дальности передачи для подводных и наземных систем

В случае, когда система не содержит повторители и включает только предварительный усилитель, уравнение 7-8 можно преобразовать к следующему виду:

$$OSNR = \frac{P_{out}}{N_\lambda \cdot NF \cdot G_{pre-amplifier} \cdot h\nu \cdot B_r}, \quad (7-9)$$

где L – длина кабеля в км, а α – суммарные потери в кабеле в км^{-1} .

В случае систем без повторителей с удаленным усилением и единственным добавочным усилителем в передатчике уравнение 7-7 можно преобразовать к следующему виду:

$$OSNR = \frac{P_{Trans} \cdot e^{-\alpha L}}{N_\lambda \cdot h\nu \cdot B_r \cdot \left(NF_1 + \frac{NF_2}{G_1} \right)}, \quad (7-10)$$

где L – общая длина кабеля в км, α – суммарные потери в кабеле в км^{-1} , P_{Trans} – выходная мощность передатчика (точка MPI-S на рисунке 7-3), NF_1 и NF_2 – коэффициенты шума удаленного усилителя и добавочного усилителя, а G_1 – коэффициент усиления удаленного усилителя.

Случай подводных систем без повторителей с рамановским усилением подлежит дальнейшему изучению.

7.1.3.2 Вычисление коэффициента Q

Если пренебречь тепловым шумом и дробовым шумом приемника и применить приближения, приведенные в п. 7.1.1, то теоретический линейный коэффициент Q можно приблизительно определить следующим отношением:

$$Q_{lin} = \frac{\frac{2M \cdot OSNR \cdot (1 - ER)}{1 + ER} \sqrt{\frac{B_r}{B_e}}}{\sqrt{1 + \frac{4M \cdot ER \cdot OSNR}{1 + ER}} + \sqrt{1 + \frac{4M \cdot OSNR}{1 + ER}}}, \quad (7-11)$$

где $OSNR$ – отношение оптической сигнал/шум, выраженное в оптической полосе пропускания B_r , ER – коэффициент затухания передатчика, выраженный в линейных единицах, B_e – электрическая

полоса пропускания приемника в Гц, B_r – оптическая полоса пропускания приемника в Гц, а M – коэффициент, учитывающий вид модуляции ($M = 1$ для NRZ, $M \sim 1,4$ для RZ [3]). Обращается внимание на то, что коэффициент M также зависит от коэффициента затухания.

7.1.4 Ухудшения распространения

Ухудшения распространения вызывают некоторые дополнительные потери по сравнению со значением *среднего коэффициента Q* , рассчитанного при использовании простых соображений по накоплению шума при излучении ASE. Эти потери должны вычитаться из *среднего коэффициента Q* , чтобы получить значение *Q линии* (см. рисунок 7-1).

7.1.4.1 Ухудшения распространения из-за нелинейных эффектов

Нелинейные взаимодействия между сигналом и средой передачи начинают появляться, когда оптическая плотность мощности сигнала становится высокой. Следует отметить, что высокая оптическая мощность сигнала необходима для получения приемлемого значения OSNR без уменьшения длины участка. Следовательно, нелинейность оптического волокна является важным фактором в системах с высокой пропускной способностью и для протяженных трасс без электронной регенерации, особенно в случае протяженных подводных линий с оптическими усилителями. Обычно выделяют нелинейности двух типов: нелинейности, которые связаны с зависимостью индекса рефракции оптического волокна от интенсивности, известной как эффект Керра (фазовая автомодуляция, перекрестная фазовая модуляция и четырехволновое смещение), и нелинейности, которые связаны с явлениями рассеяния (главным образом с вынужденным комбинационным рассеянием). На степень воздействия этих нелинейных эффектов влияют несколько параметров, включая дисперсионные характеристики оптического волокна, эффективную площадь сечения и нелинейный показатель преломления оптических волокон, количество каналов в системах WDM и разнос между ними, а также интенсивность сигнала и скорость передачи данных. Эти нелинейные эффекты описаны в Дополнении II/G.663. Обзор основных нелинейных эффектов представлен в пп. 7.1.4.1.1, 7.1.4.1.2, 7.1.4.1.3 и 7.1.4.1.4.

7.1.4.1.1 Фазовая автомодуляция (SPM)

Нижеследующий текст основан на п. II.3.1/G.663 и воспроизводится здесь для удобства читателя. Поскольку показатель преломления оптического волокна зависит от интенсивности оптического сигнала, изменение во времени интенсивности оптического сигнала вызывает модуляцию его собственной фазы. Этот эффект называют фазовой автомодуляцией (SPM).

В оптических передающих системах фазовая автомодуляция постепенно уширяет спектр сигнала вследствие изменения фазы из-за изменения оптической интенсивности (см. рисунок 7-5). В присутствии вызванного SPM уширения спектра сигнал испытывает более сильное временное уширение при распространении по оптическому волокну из-за влияния хроматической дисперсии в области нормальной дисперсии оптического волокна (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. Известная картина распространения солитона основана на этом явлении.

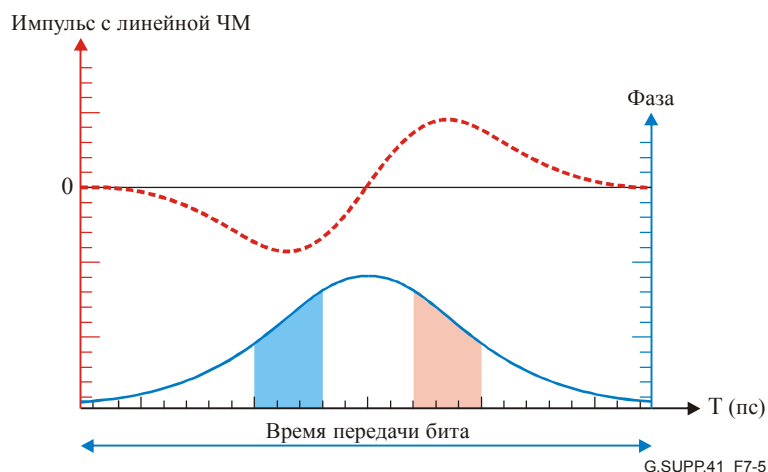


Рисунок 7-5 – Изменение во времени фазового сдвига и импульсов с линейной ЧМ, вызванное SPM [4]

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.

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.

7.1.4.1.2 Перекрестная фазовая модуляция (XPM)

Нижеследующий текст основан на п. П.3.3/G.663 и воспроизводится здесь для удобства читателя. В многоканальных системах перекрестная фазовая модуляция (XPM) постепенно уширяет спектр сигнала, когда изменение оптической интенсивности во времени приводит к изменениям фазы из-за взаимодействия между соседними каналами. Обусловленная XPM степень уширения спектра связана с разносом каналов и хроматической дисперсией оптического волокна, так как вызванное дисперсией различие групповых скоростей приводит к разделению взаимодействующих импульсов по мере их распространения по оптическому волокну. Если XPM вызывает уширение спектра, то сигнал подвергается более значительному временному уширению при распространении по оптическому волокну из-за действия хроматической дисперсии.

Ухудшение работы системы из-за XPM проявляется в большей степени при уменьшении разноса каналов. Как отмечено в случае SPM, изменение фазы сигнала связано с изменением показателя преломления оптического волокна, 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.

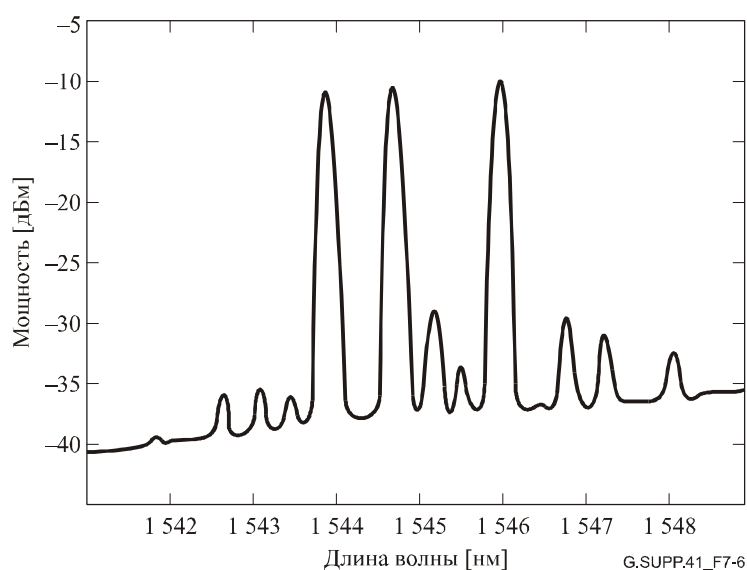
Ухудшения от XPM более существенны в волоконно-оптических системах по Рекомендации МСЭ-Т G.652, чем для аналогичных систем по Рекомендациям МСЭ-Т G.653 и G.655. Уширение из-за XPM может привести к интерференции между соседними каналами в WDM-системах.

При любой конструкции оптического волокна влияние XPM может быть уменьшено при снижении вводимой в канал мощности, однако тенденции при проектировании систем требуют повышения мощности для обеспечения более протяженных участков.

7.1.4.1.3 Четырехволновое смещение (FWM)

Нижеследующий текст основан на п. II.3.5/G.663 и воспроизводится здесь для удобства читателя. Четырехволновое смещение (FWM), которое также называют четырехфотонным смещением, возникает, когда взаимодействие двух или трех оптических волн с различными длинами волн формирует новые оптические волны, называемые продуктами смещения 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 оптического волокна 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 смещения (см. рисунок 7-6), которые попадают непосредственно в соседние каналы передачи сигналов, если разнос каналов совпадает с частотой. Две оптические волны, распространяющиеся по оптическому волокну, эффективно формируют FWM, если выполняется условие согласования фаз между боковыми полосами и исходными сигналами.



ПРИМЕЧАНИЕ. — $D = -0,2$ пс/нм.км в центральном канале при использовании каналов 3 мВт [5].

Рисунок 7-6 – Оптический энергетический спектр, измеренный на выходе волоконно-оптической линии длиной 25 км со смещенной дисперсией

Формирование боковых полос FWM может привести к существенному снижению мощности сигнала. Кроме того, если продукты смещения 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 схождение глазковой диаграммы на выходе приемника, что ухудшает показатели коэффициента ошибок по битам (КОБ). Многоканальные системы развиваются в направлении увеличения количества каналов, что повышает количество возможных продуктов смещения, попадающих в каналы передачи сигналов.

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, эффективность FWM (а следовательно, ухудшение работы систем) также возрастает.

7.1.4.1.4 Вынужденное комбинационное рассеяние (SRS)

Нижеследующий текст основан на п. II.3.7/G.663 и воспроизводится здесь для удобства читателя. Вынужденное комбинационное рассеяние – это широкополосное явление, при котором свет взаимодействует с модами колебаний молекул кварца. SRS приводит к тому, что длина волны сигнала ведет себя как рамановский генератор накачки для волн с большей длиной волны – либо других каналов передачи сигналов, либо самопроизвольно рассеянного света с рамановским сдвигом. В любом случае этот процесс ослабляет сигнал с меньшей длиной волны и усиливает сигнал с большей длиной волны.

Вынужденное комбинационное рассеяние (SRS) воздействует главным образом на системы WDM с большой полосой пропускания. Сигналы с меньшей длиной волны в системах WDM могут испытывать ухудшение из-за снижения отношения сигнал/шум, потому что часть их мощности передается в более длинноволновые каналы через SRS. Это приводит к ограничениям общей пропускной способности системы, которая определяется общим количеством каналов, разнесом каналов, средней входной мощностью и общей длиной системы.

Отсутствуют сообщения о каких-либо практических методах устранения влияния SRS в системах WDM. Для коррекции наведенного наклона OSNR может использоваться фильтр усиления. Влияние SRS также может быть уменьшено при снижении входной оптической мощности.

7.1.4.1.5 Влияние нелинейных эффектов

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 такими нелинейными эффектами, если входная оптическая мощность волокна становится очень большой.

Обычно влияние нелинейных эффектов на системы WDM оценивают с использованием инструментов численного моделирования, основанных на пошаговом методе разделения Фурье (Split Step Fourier) [4]. Результаты в основном подтверждаются экспериментально при использовании петли рециркуляции [6] или испытательного стенда.

Очевидно, что характеристики системы ухудшаются при низкой входной оптической мощности из-за малого отношения оптический сигнал/шум, получаемого на конце линии передачи (см. п. 7.1.3).

Поэтому следует найти 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 учитывались следующие аспекты:

- тип оптического волокна, используемого для передачи;
- схема компенсации дисперсии;
- длина участка;
- оптическая выходная мощность в линии;
- разнос каналов.

7.1.4.1.6 Выводы

Для достижения заданного коэффициента Q , например более 7, невозможно выбрать единственное значение минимальной входной оптической мощности. Между этим минимальным значением и максимальным значением мощности, достижимой перед резким ухудшением из-за нелинейных эффектов, можно найти область с наилучшими характеристиками системы посредством предварительного моделирования с требуемыми параметрами системы (тип оптического волокна, компенсация дисперсии, разнос между усилителями, разнос каналов и т. д.).

7.1.4.2 Ухудшения распространения из-за оптических эффектов поляризации

Нижеследующий текст основан на п. II.4.1/G.663 и воспроизводится здесь для удобства читателя. Хорошо известно, что оптические компоненты и подсистемы более или менее чувствительны к состоянию поляризации оптического сигнала. Эти эффекты поляризации можно разделить на 3 части:

- PMD: Дисперсия поляризованной моды;
- PDL: Потери, зависящие от поляризации;
- PDG: Усиление, зависящее от поляризации.

Они подробно описаны в Рекомендациях МСЭ-Т G.663, G.671, G.650.2 и в стандарте МЭК 61282-3.

Все эти эффекты приводят к некоторому ухудшению оптического сигнала, они должны учитываться при проектировании линий подводных оптических передающих систем. В частности, они зависят от внешних условий, таких как температура, что приводит к флуктуации характеристик во времени. Для расчета степени ухудшения работы рекомендуется использовать статистический подход.

7.1.4.2.1 Дисперсия поляризованной моды (PMD)

Двойное лучепреломление в оптическом волокне из-за неоднородности геометрических свойств, обусловленных процессом изготовления, вызывает изменение времени распространения, которое зависит от состояния поляризации (SOP). Значение дисперсии поляризованной моды – это среднее время дифференциальной групповой задержки (DGD) между двумя ортогонально поляризованными модами, которое вызывает уширение импульса в оптических передающих системах. Нижеследующий текст основан на Добавлении 39 к Рекомендациям МСЭ-Т серии G и воспроизводится здесь для удобства читателя.

Значение DGD изменяется во времени случайным образом и описывается распределением Максвелла, характерным для PMD. PMD волоконно-оптического кабеля также связана со статистическими свойствами и может быть объединена с PMD других элементов, составляющих линию связи, для нахождения максимальной DGD, которая определена как вероятностный предел. С одной стороны, см. Дополнение I/G.650.2 и Дополнение II/G.663 для описания статистической спецификации PMD для волоконно-оптического кабеля. С другой стороны, в Рекомендации МСЭ-Т G.671 содержится описание способа объединения спецификаций PMD других элементов линии связи со спецификациями по PMD волоконно-оптического кабеля с целью определения суммарной максимальной DGD для линии связи.

$$DGD_{max_{link}} = \left[DGD_{max_F}^2 + S^2 \sum_i PMD_{Ci}^2 \right]^{1/2}, \quad (7-12)$$

где:

$DGD_{max_{link}}$ – максимальная DGD линии связи (пс);

DGD_{max_F} – максимальная DGD, полученная после наращенного волоконно-оптического кабеля (пс);

S – поправочный коэффициент Максвелла (см. таблицу 7-1);

PMD_{Ci} – значение PMD для i -й компоненты (пс).

Уравнение 7-12 предполагает, что статистика мгновенной DGD может быть аппроксимирована с помощью распределения Максвелла, причем вероятность мгновенной DGD, превышающей $DGD_{max_{link}}$, определяется значением поправочного коэффициента Максвелла, взятым из таблицы 7-1.

Таблица 7-1 – Средние значения DGD и вероятности, упомянутые в Рекомендации МСЭ-Т G.959.1

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

Поэтому, если мы знаем максимальную DGD, которая допустима в системе, то можем получить эквивалентную среднюю DGD путем деления DGD_{\max} на отношение максимального значения к среднему значению, которое соответствует приемлемой вероятности.

Более подробное изложение, включая вычисление максимальной DGD, составляющей 30 пс для применения NRZ при скорости 10 Гбит/с с вероятностью 1×10^{-5} , см. в Добавлении 39 к Рекомендациям МСЭ-Т серии G и в Рекомендации G.959.1.

Потеря мощности из-за PMD

Как объяснено в Добавлении 39 к Рекомендациям МСЭ-Т серии G, потеря мощности, вызванная DGD в точке приема R (см. рисунок 7-3), зависит от относительной мощности двух ортогонально поляризованных мод. Этот интервал изменяется во времени, потому что относительное положение основных состояний поляризации в волоконно-оптическом кабеле и поляризация источника изменяются. Максимальная DGD в линии устанавливается такой, чтобы допустить уровень потерь, не превышающих заданной потери мощности первого порядка при наихудшем отношении разделения мощностей между модами (одинаковая мощность обеих мод). В наихудшем случае на потери мощности первого порядка также влияет вид передачи – NRZ или RZ.

Для применений NRZ со скоростью передачи 10 Гбит/с (упомянутых в Дополнении I/G.691 и в Рекомендации МСЭ-Т G.959.1) потеря мощности первого порядка в 1 дБ соответствует пределу в 30 пс для DGD в точке R.

Случай использования RZ подлежит дальнейшему изучению.

7.1.4.2.2 Потери, зависящие от поляризации (PDL)

Потери, зависящие от поляризации, определены в Рекомендации МСЭ-Т G.671 как максимальное изменение вносимых потерь из-за изменения состояния поляризации (SOP) по всем SOP. В системах с усилителями один из режимов управления усилителем заключается в работе при постоянной мощности сигнала. Потери, зависящие от поляризации, оказывают влияние и на сигнал, и на шум. Однако поскольку шум не имеет поляризации, воздействие на сигнал и шум различно. Шум может быть разложен на компоненту, параллельную сигналу, и компоненту, ортогональную сигналу. Можно показать, что общее влияние PDL и оптического усиления всегда должно увеличивать компоненту шума, ортогональную сигналу. Кроме того, величина ортогональной компоненты шума изменяется во времени, поскольку поляризация сигнала изменяется из-за дисперсии поляризованной моды. Это приводит к уменьшению OSNR и значения Q в приемнике. Более того, время флуктуаций приводит к замиранию OSNR и значения Q в приемнике, причем оба этих эффекта приводят к ухудшению характеристик системы.

Ухудшение работы системы, вызванное накоплением PDL каждого оптического компонента, может быть уменьшено путем снижения PDL каждого компонента. Следует отметить, что воздействие PDL на характеристики системы увеличивается по мере роста количества усилителей. Для протяженных подводных систем требования являются чрезвычайно высокими, потому что количество усилителей может составлять несколько сотен. Было показано, что модуляция поляризации или скремблирование улучшают характеристики системы из-за снижения флуктуаций и повышения среднего коэффициента Q.

7.1.4.2.3 Усиление, зависящее от поляризации (PDG)

Усиление, зависящее от поляризации, определено в Рекомендации МСЭ-Т G.661 как максимальное изменение коэффициента усиления из-за изменения состояния поляризации входного сигнала при номинальных рабочих условиях. Ухудшения работы системы, вызванные зависящим от поляризации усилением, подлежат дальнейшему изучению.

7.1.4.3 Ухудшения из-за неравномерности кумулятивной кривой усиления

Ухудшения из-за неравномерности кумулятивной кривой усиления связаны с неоптимальным ухудшением, вызванным предискажениями (см. п. 7.1.4.4).

7.1.4.4 Неоптимальное ухудшение из-за предскажений

Предварительная коррекция или предскажения могут использоваться на интерфейсе MPI-S для снижения влияния величины изменчивости коэффициента усиления встроенного усилителя и наклона кривой усиления, которые могут иметь место при распространения в системе.

Предскажения частично компенсируют изменчивость коэффициента усиления усилителя и наклон кривой усиления при использовании следующей схемы:

Максимальная оптическая мощность в MPI-S распределяется каналу, который имеет самый малый коэффициент усиления встроенного усилителя, а минимальная оптическая мощность в MPI-S распределяется каналу, который имеет наибольший коэффициент усиления встроенного усилителя. Разность между максимальным и минимальным значениями оптической мощности является величиной предскажений для каждой длины волны.

Таким образом, предскажения мощности канала позволяют уравнивать характеристики передачи системы на всех каналах. Однако, поскольку уровни мощности в каждом канале различаются, распространение по оптическому волокну вызовет дополнительные потери (см. рисунок 7-7).

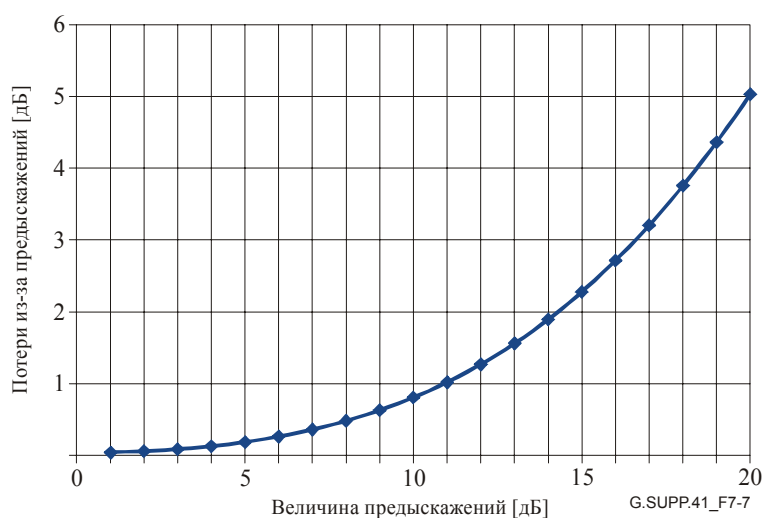


Рисунок 7-7 – Пример потерь, вызванных регулировкой предскажений

7.1.4.5 Ухудшения из-за неточной настройки длины волны (длин волн)

Некоторое дополнительное ухудшение может быть следствием неточной настройки длин волн сигнала или всех оптических компонентов, ответственных за функцию фильтрации (оптические фильтры, мультиплексоры и демultipлексоры). Например, сдвиг длины волны между лазером и серединой соответствующей полосы пропускания мультиплексора может привести к дополнительным потерям, ответственным за снижение коэффициента Q.

7.1.4.6 Ухудшения из-за проведения контроля

Эти ухудшения связаны с использованием оптических команд, передаваемых по линии для контроля определенного подводного оборудования. Например, большинство повторителей, используемых в подводных системах, могут опрашиваться и отправлять ответ путем модуляции оптического сигнала на низкой частоте. Амплитуда такой модуляции невелика по сравнению с амплитудой модуляции данных, чтобы в минимально возможной степени влиять на характеристики сигналов. Ухудшения из-за такой дополнительной модуляции определяются и учитываются при оценке коэффициента Q линии.

7.1.4.7 Ухудшения, вызванные процессом производства и влиянием окружающей среды

В процессе производства нельзя гарантировать, что все изготовленное оборудование ведет себя абсолютно одинаково, т. е., другими словами, имеет одни и те же характеристики. Поэтому некоторое ухудшение должно быть предусмотрено для учета изменчивости характеристик передачи,

вытекающей из этих различий. Этот элемент также касается изменения условий окружающей среды, которые могут наблюдаться в системе (например, температура и давление).

7.1.5 Ухудшения из-за несовершенства оконечного передающего оборудования

Ухудшения из-за оконечного передающего оборудования обычно выражаются коэффициентом Q , измеренным, когда передатчик и приемник включены согласно каскадной конфигурации. Чтобы вычислить реальный коэффициент Q всего участка, необходимо учитывать реальные характеристики передатчика и приемника. Используется следующая формула:

$$\frac{1}{Q_{Segment}^2} = \frac{1}{Q_{Line}^2} + \frac{1}{Q_{TTE\ back\ to\ back}^2} . \quad (7-13)$$

7.1.6 Запасы на работу системы

Подводная система имеет расчетный срок службы 25 лет. Этот расчетный срок службы требует, чтобы удовлетворились некоторые дополнительные запасы.

7.1.6.1 Ухудшения в результате ремонтных операций

После укладки подводной линии связи ремонт кабеля требуется каждый раз при добавлении некоторого дополнительного кабеля. Этот дополнительный кабель приводит к увеличению потерь на участке и, следовательно, к снижению коэффициента Q .

Запас на ремонтные операции оценивается путем определения общего количества ремонтов, требуемых в течение срока службы системы. Обычно используется следующий сценарий:

- Ремонт наземного кабеля: 1 ремонт через каждые 4 км при минимуме в 2 ремонта;
- Ремонт на небольшой глубине: 1 ремонт через каждые 15 км при минимуме в 5 ремонтов;
- Глубоководный ремонт: 1 ремонт через каждые 1000 км.

При каждом ремонте добавляется участок кабеля, длина которого пропорциональна глубине в месте ремонта. Обычно увеличение длины равно глубине, умноженной на коэффициент от 1,5 до 2,5.

Чтобы вычислить запас, требуемый для проведения ремонтных работ, общая дополнительная длина кабеля оценивается для наихудшего случая, когда произведены все запланированные ремонты. Другое значение коэффициента Q рассчитывается для суммы общей первоначальной длины линии и максимального дополнительного кабеля, который добавляется при ремонте. Разность между этим коэффициентом Q и средним коэффициентом Q соответствует запасу, предусмотренному на ремонт.

7.1.6.2 Ухудшения из-за старения оборудования

Ухудшение из-за старения оборудования происходит главным образом из-за оптического волокна. Фактически ослабление будет медленно увеличиваться из-за физических явлений, связанных с окружающей средой. Обычно учитываются два явления:

- Влияние водорода в оптическом волокне: Ухудшение обычно аппроксимируют в виде дополнительной потери, составляющей приблизительно 0,003 дБ/км по истечении 25 лет.
- Влияние излучения: Потери в оптических волокнах зависят от излучения с высокой энергией (гамма-лучей), причины которого могут быть связаны с отложениями, морской водой или искусственными источниками (захоронение отходов). Согласно оценкам, увеличение потерь составляет менее 0,002 дБ/км по истечении 25 лет.

Тем же самым способом, как для ремонта (см. п. 7.1.6.1), коэффициент Q рассчитывается с этими дополнительными потерями и сравнивается со средним значением коэффициента Q , чтобы получить значение запаса, требуемого для старения оборудования.

7.1.6.3 Ухудшение из-за предвиденных неисправностей в некоторых компонентах

Из-за высокой стоимости и сложности морских операций по замене или ремонту подводного оборудования наиболее уязвимые компоненты дублируются, чтобы в максимально возможной степени избежать вмешательства. Основными неисправностями, которые необходимо учитывать, являются отказы схем накачки повторителя. Дублирование схемы накачки позволяет избежать

недостаточной выходной мощности в случае отказа схемы накачки, но такое решение всегда будет вызывать снижение выходной мощности и увеличение коэффициента шума, что приводит к уменьшению коэффициента Q .

Дополнительный запас, требуемый для учета этого фактора, зависит от надежности схемы накачки и установленной избыточности.

7.1.6.4 Нераспределенный запас

Временные запасы – это остаточные запасы после учета всех запасов на ремонт в состоянии конца срока службы. Эти запасы могут потребоваться в большей части случаев покупателям для большей уверенности в системе или для возможного непредвиденного обновления системы.

7.1.7 Заключение

В таблицах бюджета оптической мощности описывается способ удовлетворения характеристик системы. Шаблон рекомендованной таблицы бюджета оптической мощности приведен в Приложении A/G.977.

В подводных системах с оптическими усилителями (Рекомендации МСЭ-Т G.973 и G.977) восстановление производится только в оконечном передающем оборудовании на подводном электронно-оптическом интерфейсе. Между излучением и приемом каналы будут испытывать ухудшения, например, из-за накопления оптических шумов, распространения (нелинейности оптического волокна, хроматическая дисперсия и т. д.). Поэтому рекомендуется устанавливать бюджет оптической мощности на уровне подводного участка цифровой линии. Поскольку некоторые системы могут иметь несколько подводных участков цифровой линии с различной степенью ухудшений, дополнительно рекомендуется, чтобы бюджет оптической мощности устанавливался для каждого подводного участка цифровой линии.

Следующее рассуждение заключается в том, что в некоторых случаях (например, в случае использования WDM-BU) два маршрута (магистральный канал и ответвление) могут испытывать различные ухудшения: в этом случае отдельный бюджет мощности должен быть установлен для каждого маршрута, и необходимо рассматривать наихудший случай.

Дополнительно в том случае, когда конструкция системы с несколькими наземными точками была оптимизирована для самого протяженного подводного участка цифровой линии с точки зрения снижения отношения оптический сигнал/шум и разноса между повторителями, для более коротких участков могут быть доступны дополнительные запасы. Эти дополнительные запасы, которые обычно называют нераспределенными запасами поставщика/сегмента, следует четко указывать в таблицах бюджета мощности.

Поставщик должен обеспечить достаточный объем информации для поддержки обоснованности таблиц бюджета мощности, особенно по следующим пунктам, но не ограничиваясь ими:

- общее расстояние передачи и длины участков;
- количество передаваемых длин волн;
- коэффициент затухания в передатчике;
- номинальное значение выходной мощности повторителя;
- номинальное значение коэффициента шума;
- значения ширины оптической и электрической полос пропускания в приемнике;
- значения коэффициента Q для терминала при каскадном включении;
- характеристики кода упреждающего исправления ошибок (включая кривые КОБ перед FEC и КОБ после FEC).

Поставщик должен также пояснить, используются ли для улучшения характеристик передачи какие-либо устройства, расположенные либо на конце передатчика/приемника (такие как скремблеры поляризации и/или фиктивные каналы), либо в подводном оборудовании (такие как фильтры уравнивания усиления, корректоры наклона).

7.2 Соображения по дисперсии

Хроматическая дисперсия представляет собой такую зависимость групповой скорости от длины волны, при которой все спектральные компоненты оптического сигнала распространяются с разной скоростью. Она вызывает уширение импульса и может быть одной из основных причин ухудшения работы. В зависимости от проекта системы и особенно от числа длин волн (в системе WDW) интерес может представлять абсолютно разное управление хроматической дисперсией с целью ограничения уширения импульса и других эффектов распространения. Обычно такое управление приводит к карте дисперсии, которая показывает, как осуществляется управление дисперсией по всей линии связи.

7.2.1 Уширение импульса из-за хроматической дисперсии

Хроматическая дисперсия в одномодовом оптическом волокне – это сочетание материальной и волноводной дисперсии, она способствует уширению импульса и искажению цифрового сигнала. Основной причиной этого является наличие различных длин волн в оптическом спектре источника. Каждая длина волны имеет свою задержку фазы и групповое время задержки в оптическом волокне, поэтому выходной импульс искажается во времени.

7.2.2 Построение карты хроматической дисперсии

Как объясняется в Рекомендации МСЭ-Т G.973 в случае одноканальной системы и в Рекомендации МСЭ-Т G.977 в отношении системы WDM, карта дисперсии – это основной инструмент для описания характеристик хроматической дисперсии системы. Общая дисперсия определяется как дисперсия, измеренная между выходом оконечного передатчика и любой другой точкой на оптическом тракте. Карта дисперсии – это график зависимости локальной хроматической дисперсии для данной рабочей длины волны от расстояния между оптическим передатчиком и оптическим приемником. Карта дисперсии главным образом зависит от типа системы (SWS или WDMS).

В системах SWS оптические волокна, как правило, с низкой отрицательной хроматической дисперсией, близкой к нулю, но ненулевой, используются в линиях, соответствующих основным участкам, а оптические волокна с более высокой положительной хроматической дисперсией используются в линии, соответствующей нескольким участкам компенсации дисперсии. Цель такого управления дисперсией заключается в том, чтобы поддерживать общую дисперсию близкой к нулю во всей линии связи при сохранении ненулевой локальной хроматической дисперсии.

В системах WDMS со скоростью передачи 10 Гбит/с оптические волокна, как правило, с низкой отрицательной хроматической дисперсией, но далекой от нуля (около -2 пс/(нм.км)), используются на большинстве участков (иногда могут использоваться два типа оптических волокон: в начале участка используется оптическое волокно с большой эффективной площадью сечения, а в конце участка – оптическое волокно с малым наклоном), в то время как оптические волокна с более высокой положительной хроматической дисперсией обычно используются на участках компенсации дисперсии. Цель такого управления дисперсией заключается в том, чтобы поддерживать общую дисперсию близкой к нулю во всей линии связи при сохранении более высокой и отличной от нуля локальной хроматической дисперсии для ограничения четырехволнового смешения и перекрестной фазовой модуляции.

В системах WDMS со скоростью передачи 10 Гбит/с с большим количеством LOC (рисунок 7-8) оптические волокна, как правило, с большой хроматической дисперсией используются на всех участках вдоль линии. Одна часть участка, как правило, имеет положительную дисперсию с положительным наклоном (обычно с очень большой эффективной площадью сечения), а остальная его часть – отрицательную дисперсию с отрицательным наклоном (обычно с очень малой эффективной площадью сечения).

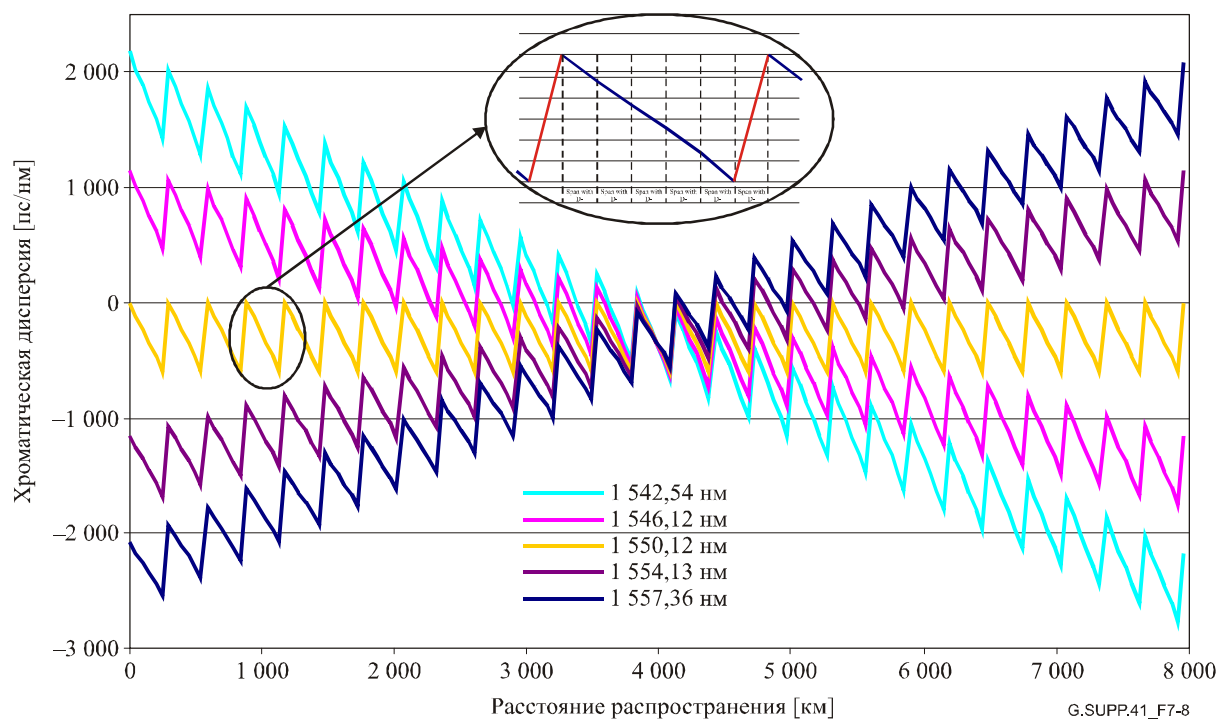


Рисунок 7-8 – Типичная карта хроматической дисперсии для подводной системы WDM с 163 участками, предназначенной для использования 40 длин волн, центральная длина волны системы WDM составляет 1550,12 нм

7.2.3 Реализация управления дисперсией

Построение карты дисперсии для каждого оптического участка должно соответствовать требованиям передачи (ограничение нелинейных эффектов, уширения импульса и т. д.).

Остаточную общую дисперсию для каждой длины волны можно компенсировать, используя участок корректирующего оптического волокна или другие пассивные устройства компенсации дисперсии на стороне передатчика (предварительная компенсация) и/или на стороне приемника (посткомпенсация) в подводном оконечном передающем оборудовании. Как правило, компенсация в одноканальной системе производится только на приемном конце, а в системах WDM – как на передающем, так и на приемном конце.

При проектировании систем следует учитывать все случайные и систематические причины отклонения от запланированной карты дисперсии, включая следующие, но не ограничиваясь ими:

- неопределенность измерений длины волны, на которой наблюдается нулевая дисперсия, дисперсии и наклона дисперсии составляющих DSF, NDSF, DCF, NZDSF, CSF, оптических волокон с отрицательным наклоном, EDF и т. д.;
- неопределенность, вызванная изменением порядка и "случайным" выбором блоков из оптических волокон в наборе элементарных кабельных участков;
- неопределенность температуры, давления и коэффициентов деформации этих оптических волокон в кабеле и сосудах, находящихся под высоким давлением;
- неопределенность точной температуры и напряжения этих оптических волокон при измерениях дисперсии;
- неопределенность температуры уложенного оптического волокна;
- старение;
- ремонтные операции.

8 Упреждающее исправление ошибок

Этот пункт подлежит дальнейшему изучению.

9 Рассмотрение надежности

Подводные сети требуют использования надежных и устойчивых волоконно-оптических систем во избежание дорогостоящего ремонта подводной части системы. Кроме того, учитывая, что в течение срока службы системы могут измениться технологии, в начале эксплуатации системы должна быть разработана схема технического обслуживания, чтобы гарантировать ремонт в течение всего установленного контрактом срока службы системы, если он потребуется.

Отказы, возникающие в течение срока службы системы, могут произойти из-за внутренних неисправностей (отказ шунта, увеличение потерь в волокне, отказы повторителя, отказы платы и т. д.) или внешних воздействий (например, воздействие якоря и связанной с рыболовством деятельности на подводную часть системы и неправильная работа наземной части системы).

9.1 Требование по надежности

Надежность определяется как вероятность выполнения компонентом или подсистемой какой-либо требуемой функции при определенных условиях в течение заданного периода времени. Ее можно выразить с помощью различных показателей:

- Число отказов за время (FIT): Число отказов в час для 10^9 устройств. Это значение зависит от температуры и должно регистрироваться при рабочей температуре. С точки зрения статистики это определение эквивалентно числу отказов в устройстве в течение 10^9 часов.
- Средняя наработка на отказ (MTBF): Ожидаемое время между двумя последовательными отказами.

Следует отметить, что эти статистические показатели не имеют никакого смысла для отдельного устройства и указывают только вероятностные характеристики, а не абсолютные ожидания.

Вначале общее ограничение надежности используется для оценки надежности, допустимой для каждой подсистемы, а затем – для каждого компонента. После этого требуемая надежность компонента для данного срока службы системы преобразуется в интенсивность отказов (FIT) или MTBF.

Для системы или подсистемы определяются следующие показатели:

- Средний срок ремонта (MTTR): Ожидаемое время, требуемое для устранения отказа.
- Простой = $MTTR/MTBF$: Время, обычно выражаемое в минутах в год, в течение которого сеть не может выполнять свою функцию.
- Коэффициент готовности сети (%) = $(\text{Общее время} - \text{Простой})/\text{Общее время} * 100\%$.

9.2 Внутренняя неисправность

Для достижения требуемой надежности подводных систем (сведение к минимуму внутренних неисправностей) и формирования политики технического обслуживания, применимой в течение всего срока службы системы, первопричины отказов должны выявляться на уровнях компонента, подсистемы и системы. Поэтому все компоненты, используемые в системе, должны демонстрировать надежность в течение установленного контрактом срока службы системы (обычно 25 лет). Прогнозируемая надежность часто основывается на Рекомендации МСЭ-Т G.911, стандартах МЭК 62380, MIL-HDBK-217 [7], отчете Telcordia SR 332 [8] и данных поставщиков компонентов.

9.2.1 Анализ интенсивности отказов

9.2.1.1 Ранний отказ

В начале режима эксплуатации системы блоки или компоненты, используемые в подводных системах, имеют высокую интенсивность отказов, которая уменьшается с течением времени. Этот короткий период называют периодом ранних отказов (ранний отказ: обычно в течение одного года или двух лет). Такие отказы происходят главным образом из-за неидеального процесса производства (дефектное сырье, неправильная работа, загрязнение окружающей среды, скачок напряжения, неэффективный контроль или неправильная отгрузка и обработка). Следует отметить, что ранний отказ связан со всей партией устройств и не может отражать поведение отдельного устройства. В этом конкретном случае отдельное устройство либо отказывает, либо успешно проходит испытание, тогда как интенсивность отказов ряда блоков описывается убывающей кривой.

9.2.1.2 Случайный отказ

Для периода, следующего за периодом ранних отказов, характерна более низкая интенсивность отказов. Этот период называют периодом нормальной эксплуатации, потому что интенсивность отказов является почти постоянной до начала последней стадии (периода износа). Постоянные отказы описываются случайными процессами, и обычно их нельзя обнаружить даже при тщательно управляемом процессе.

9.2.1.3 Старение

Последний период наступает, когда системы и соответствующие компоненты начинают изнашиваться в ходе использования. Отказы могут быть следствием старения, усталости материала, чрезмерного износа, коррозии из-за воздействия окружающей среды, неблагоприятных внешних условий или накопленного повреждения.

Характер изменения интенсивности отказов в течение срока службы системы традиционно описывается U-образной кривой, как показано на рисунке 9-1.

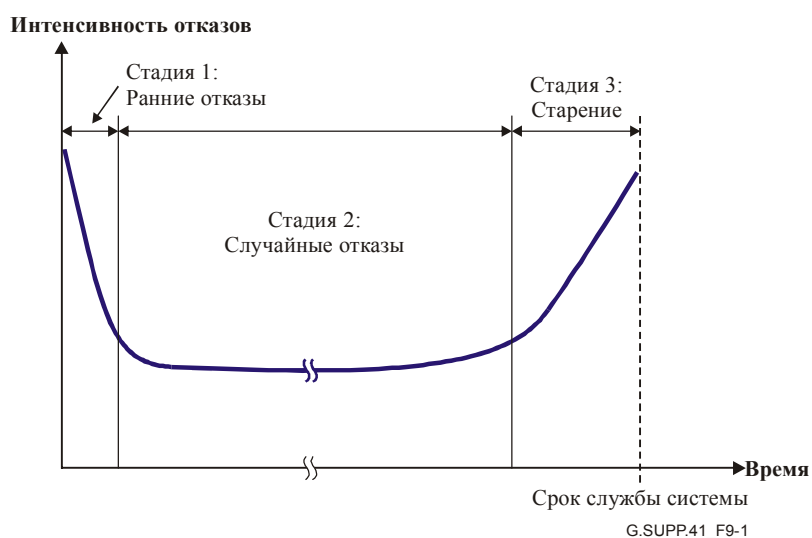


Рисунок 9-1 – Типичное изменение интенсивности отказов в течение срока службы системы

9.2.2 Надежность подводной части системы

Подводная часть системы является более критической в плане надежности, чем ее наземная часть, поскольку в ней показатель MTTR больше. Типичные значения MTTR составляют приблизительно 2 недели для ремонта подводной части системы вместо 2 часов для наземной части. С точки зрения надежности именно по этой причине показатель FIT для систем накачки лазера, используемых в повторителях, является одной из критических проблем для всей системы. Например, типичные значения FIT для усилителей в наземных сетях составляют от 1000 до 10 000, в то время как для подводных усилителей они составляют от 10 до 100 (приблизительно на два порядка величины ниже).

Проектирование максимально надежных подводных систем означает, что вероятность отказа из-за износа в течение срока службы системы должна быть почти несуществующей, а вероятность случайного отказа должна быть максимально снижена.

Повторители являются наиболее критическим оборудованием, поскольку они содержат электронные, оптические и оптоэлектронные компоненты. Кроме того, следует иметь в виду, что любое внутреннее повреждение независимо от его причины может непосредственно влиять на качество передачи. Следовательно, необходимо принять все меры предосторожности, для того чтобы предотвратить отказы и снизить их риск. В частности, оптический отказ отдельного оптического волокна не должен влиять на системные характеристики других оптических волокон. Испытания, требуемые до и во время укладки кабеля, подробно описаны в Рекомендации МСЭ-Т G.976.

i) Общие требования

Низкие значения FIT получают при использовании хорошо защищенных компонентов, тщательном контроле сырья, применении прочной и простой конструкции, тщательном контроле за процессом производства и всестороннем контроле качества.

С первого взгляда ясно, что условия испытаний должны сокращать время наработки на отказ предсказуемым и понятным образом. Кроме того, следует признать, что система охватывает различные производственные процессы и процедуры сборки, причем каждый процесс должен проверяться. Каждый отказ должен быть отнесен к одному механизму отказа и не должен коррелироваться с возможным взаимодействием между испытываемым устройством и самой процедурой испытаний. С точки зрения как экономии, так и технической осуществимости требования по надежности делают необходимым проведение ускоренных испытаний.

ii) Избыточность

Для достижения требуемой надежности и, соответственно, снижения значения FIT подсистем, как правило, используются избыточные конфигурации. Например, обычно используются избыточные конфигурации схемы накачки лазера, чтобы гарантировать выполнение требований к надежности усилителя.

9.2.3 Пример расчета надежности

В случае повторителя, в котором используется четырехкратная избыточность в схеме накачки, вероятность отказа каждой схемы накачки в течение срока службы, принятого равным 25 годам, вычисляется следующим образом (в предположении постоянной интенсивности отказов):

$$p = 1 - e^{-21,9 \times 10^{-5} FIT} \quad (9-1)$$

Значение FIT (определенное для 10^9 устройств), которое рассматривается в уравнении 9-1, одинаково для всех четырех схем накачки. Значение $21,9 \times 10^{-5}$ в уравнении 9-1 получают следующим образом:

$$\frac{25 \text{ лет} \times 365 \text{ дней} \times 24 \text{ часа}}{10^9 \text{ устройств}} = 21,9 \times 10^{-5} \text{ часов/устройство} \quad (9-2)$$

На рисунке 9-2 показано количество схем накачки, отказавших в течение 25-летнего срока службы системы, для типичного трансатлантического кабеля (150 повторителей) при наличии всего одной пары волокон. Типичное значение FIT для подводной схемы лазерной накачки принято равным 25. Количество отказавших схем накачки определяется как произведение p на общее число схем накачки.

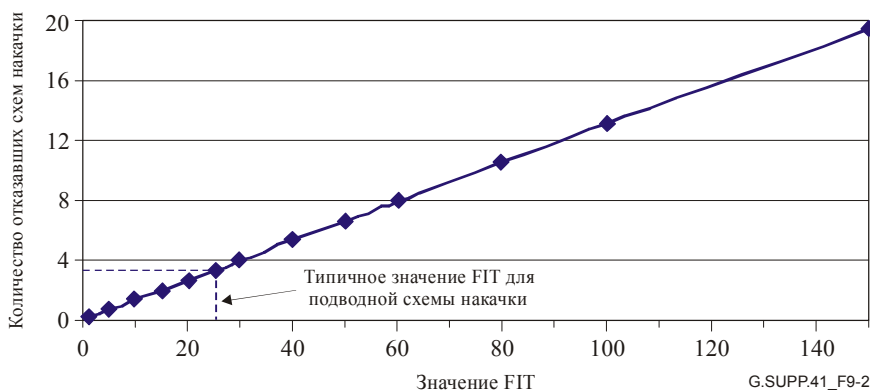


Рисунок 9-2 – Оценочное количество схем накачки, отказавших в течение 25 лет, для типичной трансатлантической линии связи, состоящей из одной пары оптических волокон и 150 повторителей, в каждом из которых имеются четыре схемы накачки

Эти отказы случайно распределены по линии передачи, означая, что индикация либо отказавшего повторителя (повторителей), либо потерь при передаче невозможна.

Если предположить, что вероятность отказа схемы накачки лазера равна p , и обозначить буквой N общее число схем накачки (в четыре раза превышающее число повторителей), то можно получить вероятность возникновения одного отказа во всей системе.

Обозначим каждую схему накачки случайной переменной X_i ($X_1 \leq X_i \leq X_N$). Таким образом, мы имеем N случайных переменных, которые подчиняются следующему закону:

- i) схема накачки X_i не работает ($X_i = 0$) с вероятностью $p(X_i = 0) = p$;
- ii) схема накачки X_i работает ($X_i = 1$) с вероятностью $p(X_i = 1) = 1 - p$ ($X_i = 0$) = $1 - p$.

Оценочное количество отказавших схем накачки равно $N \cdot p$ (рисунок 9-2), а дисперсия равна $Np(1 - p)$. Соответствующий вероятностный закон является биномиальным законом, и вероятность отказа точно n схем накачки в течение срока службы системы равна:

$$P(n, N) = \frac{N!}{(N - n)!n!} p^n (1 - p)^{N-n}. \quad (9-3)$$

Если предположить, что в повторителе уже имеется одна отказавшая схема накачки, то вероятность второго отказа схемы накачки в том же повторителе равна:

$$P_2(N) = P(1, 3) = 3p(1 - p)^2. \quad (9-4)$$

При той же типичной системе, которая использовалась на рисунке 9-2, при применении уравнения 9-4 эта вероятность приводит к значению MTBF между первым и вторым отказами в этом повторителе, представленному на рисунке 9-3. MTBF, полученная для типичного значения FIT, равного 25, составляет более 1500 лет!

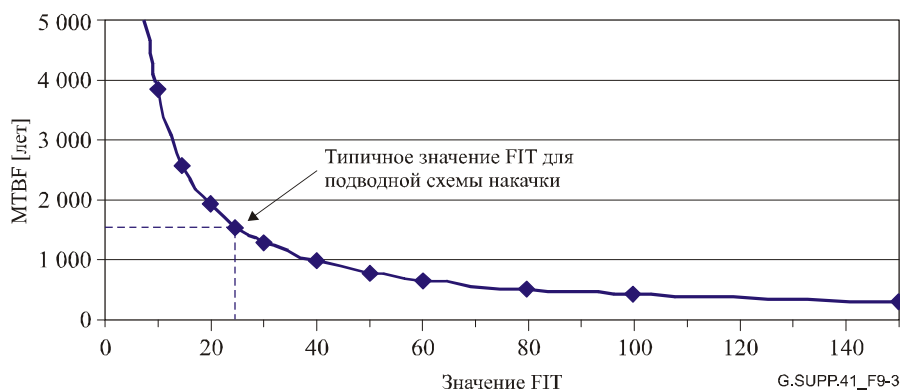


Рисунок 9-3 – MTBF для отказа второй схемы накачки в том же повторителе в типичной трансатлантической линии связи, состоящей из 1 пары оптических волокон и 150 повторителей с четырьмя избыточными схемами накачки в каждом повторителе

9.3 Внешняя неисправность

Внешние неисправности обычно возникают на кабельных участках. В действительности основными причинами отказов являются такие факторы, как глубинный лов рыбы, лов рыбы с траулеров, океанические течения, геологические явления (землетрясения и вулканическая деятельность) и тепловые отказы из-за перегрузки. Почти 90 процентов отказов вызваны связанной с рыболовством деятельностью и повреждениями якорями. Для защиты кабеля от воздействия этих различных факторов подводная часть системы может быть углублена в грунт в мелких водах, за исключением области выхода скалистых пород, где состояние морского дна не позволяет закопать кабель. Кроме того, маршрут укладки кабеля выбирают так, чтобы в максимально возможной степени избежать воздействия геологических факторов.

В случае отказа подводной части системы необходимо проведение работ в море, и для ремонта мобилизуется кабельное судно. Участок поврежденного кабеля отрезают, восстанавливают и заменяют запасным участком на борту судна. Согласно оценкам, среднее время ремонта (MTTR) составляет от 1 до 3 недель в зависимости от местоположения отказа, глубины моря, доступности судна, первопричины повреждения и погоды, которая может существенно замедлить проведение работ на море.

Чтобы свести к минимуму влияние таких отказов на трафик, общий коэффициент готовности сети повышают, используя, по возможности, несколько маршрутов (см. п. 6, в котором подробно описаны

топологии подводных сетей). В случае неисправности в подводной части системы, приведшей к потере передачи, трафик обычно перенаправляется по резервному тракту.

9.4 Локализация отказов

В большинстве случаев тщательное проектирование системы не предотвращает возникновения неожиданных отказов. Для сведения к минимуму перерывов трафика требуются быстрая диагностика и оперативное устранение неисправностей. Поэтому ключевые параметры следует контролировать (с применением механизма надзора) и использовать для обнаружения внезапных или постепенных отказов и их местоположения.

Как подробно описано в Рекомендации МСЭ-Т G.976, некоторые испытания могут проводиться на оконечной станции в условиях эксплуатации, а другие испытания – в случае отключения системы в зависимости от используемых средств (контроль повторителей или внешние средства, такие как OTDR, когерентная OTDR, измерения сопротивления или емкости проводника и т. д.). Эти испытания используются для обнаружения и идентификации типа неисправности с максимально возможной точностью. Обычно OTDR используют для проверки качества кабеля, который уложен между TTE и первым подводным повторителем, а COTDR – для определения места отказа в системах передачи на большие расстояния с повторителями.

В течение ремонта может использоваться методика нанесения электродов с судна (если она применима), чтобы определить маршрут кабельной магистрали. Она позволяет достаточно быстро восстановить неисправный участок кабеля или подводного оборудования.

10 Соображения по модернизации

Этот пункт подлежит дальнейшему изучению.

СЕРИИ РЕКОМЕНДАЦИЙ МСЭ-Т

Серия А	Организация работы МСЭ-Т
Серия D	Общие принципы тарификации
Серия E	Общая эксплуатация сети, телефонная служба, функционирование служб и человеческие факторы
Серия F	Нетелефонные службы электросвязи
Серия G	Системы и среда передачи, цифровые системы и сети
Серия H	Аудиовизуальные и мультимедийные системы
Серия I	Цифровая сеть с интеграцией служб
Серия J	Кабельные сети и передача сигналов телевизионных и звуковых программ и других мультимедийных сигналов
Серия K	Защита от помех
Серия L	Конструкция, прокладка и защита кабелей и других элементов линейно-кабельных сооружений
Серия M	Управление электросвязью, включая СУЭ и техническое обслуживание сетей
Серия N	Техническое обслуживание: международные каналы передачи звуковых и телевизионных программ
Серия O	Требования к измерительной аппаратуре
Серия P	Качество телефонной передачи, телефонные установки, сети местных линий
Серия Q	Коммутация и сигнализация
Серия R	Телеграфная передача
Серия S	Оконечное оборудование для телеграфных служб
Серия T	Оконечное оборудование для телематических служб
Серия U	Телеграфная коммутация
Серия V	Передача данных по телефонной сети
Серия X	Сети передачи данных, взаимосвязь открытых систем и безопасность
Серия Y	Глобальная информационная инфраструктура, аспекты межсетевого протокола и сети последующих поколений
Серия Z	Языки и общие аспекты программного обеспечения для систем электросвязи