

Содержание

Предисловие к второму изданию на русском языке	24
Предисловие к первому изданию на русском языке	26
Предисловие автора	28
Глава 1	
Введение в передачу сигнала по оптическому волокну	30
1.1. Требования к полосе пропускания	30
1.2. Модель волоконно-оптической системы передачи	31
1.2.1. Диапазоны длин волн, используемые для передачи сигнала по оптоволокну	33
1.3. Волоконно-оптический световод как среда передачи	37
1.3.1. Конструкция световода	37
1.3.2. Как свет распространяется по волоконно-оптическому световоду	38
Глава 2	
Волоконно-оптический кабель	41
2.1. Типы оптических волокон	41
2.1.1. Определение диаметра сердцевины	41
2.1.2. Три типа оптических волокон	41
2.2. Распространение различных мод по оптоволокну	44
2.3. Микроизгибы и макроизгибы	45
2.4. Конструкция кабеля	46
2.4.1. Диаметр оптоволокну	46
2.4.2. Плотное буферное покрытие или свободная буферная трубка	47
2.4.3. Силовые элементы	49
2.5. Характеристики оптического волокна	54
2.5.1. Оптические характеристики	54
2.5.2. Механические характеристики	55
2.5.3. Волоконно-оптические модули	55
2.6. Волокно с выровненным или с профильным показателем преломления оболочки	56
2.7. Типичные характеристики оптического волокна высокого качества	57
Глава 3	
Оптические разъемы, сростки и пассивные оптические устройства 59	
3.1. Введение	59
3.2. Основные определения	60
3.2.1. Элемент, ответвляющий поток (неселективный по отношению к длине волны)	60
3.2.2. Оптический разветвитель (сплиттер – комбайнер)	60
3.2.3. Атенюатор	60

3.2.4. Волоконно-оптический фильтр	60
3.2.5. Волоконно-оптический изолятор	61
3.2.6. Волоконно-оптический терминатор	61
3.2.7. Волоконно-оптический переключатель (коммутатор)	61
3.2.8. Пассивный компенсатор (хроматической) дисперсии	61
3.2.9. Волоконно-оптический соединитель (оптический разъем)	61
3.2.10. Сращивание оптических волокон	61
3.3. Определение функциональных параметров (За основу взят стандарт ИТУ-T G.671, Раздел 3.2)	62
3.3.1. Вносимые потери (IL)	62
3.3.2. Возвратные потери (RL)	62
3.3.3. Отражательная способность	63
3.3.4. Предварительное обсуждение направленности, возвратных потерь и отражательной способности	63
3.3.5. Рабочий диапазон длин волн	63
3.3.6. Потери, зависящие от поляризации (PDL)	64
3.3.7. Зависимость отражательной способности от поляризации	64
3.3.8. Обратные потери (степень изоляции) волоконно-оптических изоляторов	64
3.3.9. Направленность	64
3.3.10. Однородность	64
3.3.11. Оптический порт	65
3.3.12. Матрица передачи волоконно-оптических устройств ветвления и WDM-устройств	65
3.3.13. Коэффициент передачи волоконно-оптических устройств ветвления и WDM-устройств	65
3.3.14. Логарифмический коэффициент матрицы передачи волоконно-оптических устройств ветвления и WDM-устройств	65
3.3.15. Матрица передачи волоконно-оптических коммутаторов	66
3.3.16. Коэффициенты передачи волоконно-оптических коммутаторов	66
3.3.17. Логарифмическая матрица передачи волоконно-оптических коммутаторов	66
3.3.18. Избыточные потери волоконно-оптических устройств ветвления	67
3.3.19. Коэффициент связи	67
3.3.20. Рабочая длина волны	67
3.3.21. Матрица времен переключений волоконно-оптического коммутатора	67
3.4. Оптические разъемы и неразъемное соединение (сращивание) волокон	68
3.4.1. Оптические разъемы	68
3.4.2. Неразъемное соединение волокон	74

3.5. Волоконно-оптические элементы ветвления потока, или разветвители	79
3.5.1. Введение	79
3.5.2. Концепции разветвителей/элементов ветвления	80
3.5.3. Рабочие параметры разветвителей/элементов ветвления	83
3.5.4. Основные определения разветвителей/элементов ветвления	84
3.5.5. Звездообразные и направленные разветвители/элементы ветвления — дополнительное обсуждение	86
3.6. Оптические аттенюаторы	87
3.6.1. Основные рабочие параметры аттенюаторов	88
3.7. Изоляторы	88
3.8. Волоконно-оптические фильтры	89
3.9. Оптические кроссы, коммутационные панели и оптические коммутаторы	90
Глава 4	
Источники света	92
4.1. Введение	92
4.2. Светоизлучающие диоды	92
4.3. Лазерные диоды	93
4.3.1. Многомодовые (MLM) лазеры, или лазеры с резонаторами Фабри–Перо	94
4.3.2. Одномодовые (SLM) лазеры	95
4.3.3. Полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью (DFB)	95
4.3.4. DFB-лазеры с внешним модулятором	96
4.3.5. Лазер с вертикальной резонаторной полостью и излучающей поверхностью (VCSEL)	98
4.4. Частотно-модулированный импульс (чирп)	100
4.4.1. Понятие ЧМ импульса	100
4.4.2. Подробное обсуждение ЧМ сдвига	100
4.4.3. Параметры импульсов, характеризующие эффект ЧМ сдвига	101
4.5. Потери мощности	101
4.6. Основные параметры промышленных источников светового излучения	105
4.6.1. Светоизлучающие диоды (СИД)	105
4.6.2. Лазерные диоды (ЛД)	105
4.6.3. Сравнение характеристик СИД с характеристиками некоторых типов лазерных диодов	106
4.6.4. Рабочие характеристики некоторых промышленных лазерных диодов	108
4.7. Настраиваемые лазеры	113
4.7.1. Настраиваемый DFB-лазер	113

4.7.2. Лазер с распределенным брэгговским отражателем (DBR)	114
4.7.3. DBR-лазеры с выбранными решетками (SG-DBR)	114
4.7.4. VCSEL-лазеры	115
4.7.5. Лазеры с внешней резонаторной полостью	115
4.8. Модулированные импульсные последовательности	118
Глава 5	
Детекторы светового излучения	121
5.1. Введение	121
5.2. Определения	121
5.3. Необходимые соотношения	124
5.4. PIN-фотодиоды	127
5.4.1. Конструкция детектора на основе кремниевого фотодиода	129
5.4.2. Обзор фотодиодных детекторов на основе InGaAs	131
5.4.3. Лавинные фотодиоды (APD)	132
5.4.4. Применение APD	138
5.5. Оптические приемники	139
5.5.1. Электрические усилители, выход приемника	139
5.5.2. Глазковая диаграмма	141
5.5.3. Уровень принятого сигнала и BER	143
5.6. Замечания по применению детекторов	145
Глава 6	
Ухудшение передачи света	146
6.1. Введение	146
6.2. Потери или ослабление сигнала в оптическом волокне	147
6.2.1. Собственные внутренние потери	147
6.2.2. Потери от наличия примеси (внешние потери поглощения)	147
6.2.3. Рэлеевское рассеяние	148
6.2.4. Несовершенство оптического волокна (ОВ)	148
6.3. Дисперсия	149
6.3.1. Межмодовая дисперсия	149
6.3.2. Материальная дисперсия	150
6.3.3. Хроматическая дисперсия	151
6.3.4. Поляризационная модовая дисперсия (PMD)	153
6.3.5. Компенсация дисперсии	155
6.4. Нелинейные эффекты	156
6.4.1. Введение в оптические нелинейности	157
6.4.2. Вынужденное рассеяние Бриллюэна	157
6.4.3. Вынужденное рассеяние Рамана	159
6.4.4. Фазовая самомодуляция	160
6.4.5. Четырехволновое смещение	162

6.4.6. Модуляционная неустойчивость	166
6.4.7. Формирование солитонов	168
6.4.8. Фазовая кросс-модуляция	170
6.5. Поляризационные свойства	170
6.5.1. Поляризационная модовая дисперсия (PMD)	170
6.5.2. Потери, обусловленные поляризацией	173
6.5.3. Поляризационный провал усиления	174
6.6. Другие типы ухудшений системы передачи	176
6.6.1. Накопленный шум, связанный с оптическим усилением	176
6.6.2. Эффект самофильтрации	178
6.7. Выбор оптических фильтров	
по их дисперсионным характеристикам	180
6.7.1. Характерные параметры одномодового ОВ, соответствующего стандарту ITU-T G.652	182
6.7.2. Характерные параметры одномодового ОВ с сдвигом нулевой дисперсии, соответствующего стандарту ITU-T G.653	183
6.7.3. Характеристики одномодового ОВ со сдвигом волны отсечки, соответствующего стандарту ITU-T G.654	184
6.7.4. Характерные параметры одномодового ОВ с ненулевой смещенной дисперсией, соответствующего стандарту ITU-T G.655	184
Глава 7	
Регенераторы и волоконно-оптические усилители	186
7.1. Введение	186
7.2. Применение регенераторов в оптических системах	187
7.2.1. Регенераторы в сетях SONET	189
7.3. Волоконно-оптические усилители	191
7.3.1. Типы волоконно-оптических усилителей	192
7.3.1.1. Усилители на лазерных диодах	192
7.4. Критические рабочие параметры усилителей типа EDFA	200
7.4.1. Усиление и выходная характеристика	200
7.4.2. Усиленная спонтанная эмиссия (ASE)	201
7.5. Рамановские усилители	203
Глава 8	
Мультиплексирование с разделением по длине волны	205
8.1. Возрастание требований на пропускную способность ВОСП	205
8.2. Основы WDM-систем	206
8.3. Интерферометр Фабри–Перо	207
8.4. Фильтры Маха–Цендера	208
8.5. Решетки Брэгга и волоконно-оптические решетки Брэгга (FBG)	209
8.5.1. Некоторые характерные применения FBG	212

8.6. Фильтры на тонких пленках	214
8.6.1. Оптические фильтры – подведение итогов	216
8.7. Дифракционная решетка на массиве волноводов	216
8.8. Прямая и обратная операции интерливинга	217
8.9. Рекомендации ITU-T (МСЭ) по назначению длин волн, используемых в системах WDM	220
8.9.1. Выбор минимального шага и стандартных несущих частотного плана систем WDM	222
8.10. Типичные характеристики систем WDM	223
Глава 9	
Синхронные оптические сети SONET и синхронная цифровая иерархия SDH	225
9.1. Введение	225
9.2. Синхронные оптические сети (SONET)	228
9.2.1. Структура синхронных сигналов	228
9.2.2. Указатель полезной нагрузки	234
9.2.3. Три уровня заголовков SONET	237
9.2.4. Процесс сборки/разборки SPE	238
9.2.5. Мультиплексирование ввода-вывода (ADM)	240
9.2.6. Автоматическое защитное переключение (APS)	242
9.2.7. Кольцевая архитектура SONET	244
9.3. Синхронная цифровая иерархия SDH	246
9.3.1. Введение	246
9.3.2. Стандартные скорости передачи SDH	246
9.3.3. Определения	247
9.3.4. Основная схема мультиплексирования SDH	249
9.3.5. Структура фрейма для интерфейса 51,84 Мбит/с	255
9.3.6. Методы мультиплексирования SDH	255
9.3.7. Указатели	259
9.4. Заключение	264
Глава 10	
Соединение оптических систем на инженерном уровне	266
10.1. Понятие бюджета линии связи	266
10.2. Расчетные допуски для линии связи	267
10.2.1. Таблицы контроля	268
10.2.2. Практические таблицы ITU-T (МСЭ)	273
10.3. Бюджет линии связи: примеры	273
10.3.1. Общие правила	274
10.3.2. Пример 1	274
10.3.3. Пример 2	275

10.3.4. Пример 3	276
10.3.5. Пример 4	278
10.4. Полоса пропускания линии связи, время нарастания фронтов, накопленная дисперсия	280
10.4.1. Бюджет времени нарастания	280
10.5. Определение уровней оптической мощности	284
10.5.1. Уровень мощности канала	284
10.5.2. Максимальная полная мощность	286
Глава 11	
Наружная прокладка ВОЛС	287
11.1. Введение	287
11.2. Прокладка кабеля в грунт	287
11.2.1. Стандарты маркировки наружной кабельной прокладки	287
11.2.2. Глубина прокладки	289
11.2.3. Маркировка на трассе	289
11.2.4. Вертикальные опоры	290
11.2.5. Устройство вводов	290
11.2.6. Прокладка кабеля через водные преграды	290
11.2.7. Пересечение железных дорог	290
11.2.8. Прокладка по мостовым переходам	291
11.2.9. Пересечение автомагистралей	291
11.2.10. Экскаваторные работы и повреждения	291
11.2.11. Восстановление повреждений	292
11.3. Планирование трассы и прокладка ВОЛС	293
11.3.1. Волоконно-оптические кабели	293
11.3.2. Планирование трассы прокладки	293
11.3.3. Особенности прокладки кабеля	299
11.4. Измерения при внешней кабельной прокладке и приемо-сдаточные испытания	305
11.4.1. Полное затухание	305
11.4.2. Дисперсия	305
11.4.3. Тестирование показателей ошибок	306
11.5. Подводные кабельные системы	306
11.5.1. Меры по улучшению доступности	307
Глава 12	
Доступность и безотказность систем	308
12.1. Важность показателей доступности и безотказности	308
12.1.1. Определения доступности и безотказности	309
12.1.2. Безотказность и форс-мажорные обстоятельства	310
12.1.3. Определение отказа канала	310

12.1.4. Показатели доступности короткой секции (Telcordia)	311
12.1.5. Ссылки на стандарты по надежности электронного оборудования и систем	311
12.1.6. Основные требования для систем передачи (TSGR): оценка надежности оборудования	312
12.2. Взаимосвязь показателей надежности	313
12.3. Вычисление доступности системы	314
12.3.1. Доступность и недоступность	314
12.4. Сетевая архитектура и безотказность	316
12.4.1. Автоматическое защитное переключение (APS)	316
12.4.2. Активирование переключения	317
12.4.3. Восстановление	317
12.4.4. Надежность и доступность защитного переключения	319
12.4.5. Варианты защиты линейных сегментов	320
12.4.6. Самовосстанавливающееся кольцо (SHR) SONET	321
12.4.7. Конфигурация кольца	323
12.5. Центр управления работой сети (NOCC)	330
12.5.1. Доставка информации о статусе и показателях ошибок в NOCC	330
12.5.2. Язык TL1	330
12.6. Показатели ошибок и сообщения об аварийных ситуациях в SONET	331
12.6.1. Структура заголовков по их уровням	332
12.6.2. Мониторинг показателей ошибок	333
12.6.3. Сигналы, используемые для обслуживания системы	335
12.6.4. Каналы инженерной связи	336
12.6.5. Каналы пользователей	336
12.6.6. Каналы передачи данных (DCC)	337
12.7. Минимизация необходимых запасных узлов	337

Глава 13

Варианты сетевого питания для улучшения доступности системы	339
13.1. Бесперебойное питание	339
13.2. Кинетические системы с маховиком	340
13.3. Обычные статические системы бесперебойного питания	342
13.3.1. Классификация обычных статических систем бесперебойного питания	343
13.3.2. Указания по использованию вторичных элементов	348
13.3.3. Перезарядка/выравнивание заряда	350
13.3.4. Емкость батареи	352
13.4. Питание удаленных пунктов	353
13.4.1. Газотурбинные генераторы питания	355
13.4.2. Топливо сберегающая альтернатива	355

Глава 14**Гибридные системы, использующие медные жилы и оптоволокно . 357**

14.1. Введение	357
14.2. Основные сведения	357
14.2.1. Логическое обоснование	359
14.3. Использование передачи КТВ по волоконно-оптическому пролету КТВ магистрали	362
14.3.1. Передача АМ сигнала КТВ по волоконно-оптическому пролету	363
14.3.2. Комментарии и обсуждение бюджета мощности волоконно-оптической линии	364
14.4. Установка волоконно-оптического оборудования как можно ближе к ТВ приемнику пользователя	366
14.5. Двухнаправленная схема КТВ	366
14.5.1. Назначение сегментов спектра КТВ для обратного трафика	369

Глава 15**Внутриобъектная кабельная прокладка с использованием
волоконной оптики**

15.1. Введение	372
15.2. Диапазон используемых приложений	372
15.2.1. Создание вертикальной (магистральной) и горизонтальной кабельной прокладки	373
15.3. Топология сети	376
15.3.1. Кампусная магистральная сеть	376
15.4. Замечания по поводу прокладки волоконно-оптического кабеля	377
15.4.1. Оптические разъемы, рекомендуемые для использования при прокладке волоконно-оптического кабеля в здании	380
15.4.2. Практика кабельной прокладки – учет полярности	381
15.5. Выбор кабеля и его использование	382
15.6. Тестирование эксплуатационных характеристик корпоративной сети	389
15.6.1. К вопросу о показателях корпоративной сети	389
15.6.2. Подготовка плана и методология тестирования	390

Глава 16**Средства, используемые для поиска неисправности сети**

16.1. Сценарий	392
16.2. Оборудование для тестирования	392
16.3. Процедуры тестирования, использующие измерители оптической мощности	393
16.3.1. Измерение обрывов оптоволокна в ВОК, используя измерители оптической мощности	393
16.4. Введение в оптическую рефлектометрию во временной области (OTDR)	395

16.5. Тестирование BER и другие процедуры тестирования ошибок	401
16.5.1. Понятие BERT	401
16.6. Оптические спектроанализаторы (OSA)	403
16.7. Анализаторы световых сигналов	404
16.8. Оптические каналы супервизорного контроля	406
Глава 17	
Функционирование оптической сети	407
17.1. Введение	407
17.2. Требования новых оптических технологий	409
17.3. Распределенная коммутация	409
17.4. Оверлейные сети	411
17.4.1. Появление двухуровневых сетей	411
17.5. Оптическая коммутация	413
17.5.1. Коммутация с помощью MEMS	416
17.6. Практические оптические мультиплексоры ввода-вывода (OADM)	418
17.6.1. OADM и ОХС улучшают доступность и безотказность системы	420
17.7. Совершенствование управления новой сетевой архитектурой	421
17.8. Полностью оптические кросс-коммутаторы	422
17.9. Варианты сигнализации для оптического уровня	423
17.10. Четыре класса оптических сетей	425
17.10.1. Общие типы сетей	425
17.11. Обзор многопротокольной коммутации с использованием меток (MPLS)	428
17.11.1. Введение	428
17.11.2. Основные термины технологии MPLS	428
17.11.3. Архитектура MPLS-сетей	428
17.12. Заключение	431
Дополнение	
Глава Д1	
Синхронизация потоков цифровых данных ВОСП	434
Д1.1. Введение	434
Д1.2. Основные типы синхронизации и связанные с ними понятия	434
Д1.3. Основные схемы управления в сетях ТСС	436
Д1.3.1. Основные определения типов источников	437
Д1.3.2. Точностные параметры и основные ошибки эталонных источников	438
Д1.3.3. Определения некоторых основных ошибок	439
Д1.3.4. Стандартные сигналы, используемые для целей синхронизации	440
Д1.3.5. Стандартные режимы работы хранирующего источника	440
Д1.4. Общее решение задачи синхронизации	440
Д1.5. Классы и характеристики хранирующих источников	442

Д1.5.1. Оборудование, используемое для синхронизации сети	442
Д1.5.2. Спутниковые системы и датчики точного времени	443
Д1.6. Проектирование сетей ТСС	444
Д1.6.1. Особенности синхронизации цифровых сетей SDH	445
Д1.6.2. Источники синхронизации сетей SDH	445
Д1.6.3. Качество хронизирующего источника	446
Д1.7. Примеры реализации сетей ТСС	447
Д1.7.1. Система ТСС цифровой сети ОАО «Ростелеком»	447
Д1.7.1.1. Классы подключения к Базовой сети ТСС	448
Д1.7.1.2. Процедура подключения к Базовой сети ТСС	448
Д1.7.2. Система ТСС цифровой сети ЗАО «Транстелеком»	448
Заключение	449
Литература	449
Глава Д2	
Показатели ошибок ВОСП	450
Д2.1. Введение	450
Д2.2. Схема тракта ВОСП для оценки показателей ошибок	450
Д2.2.1. Эталонный тракт для каналов со скоростью меньшей Е1	451
Д2.2.2. Эталонный тракт для каналов со скоростью больше Е1	452
Д2.2.3. Спутниковый и наземный каналы передачи данных	453
Д2.3. Типы показателей ошибок	455
Д2.4. Методика оценки показателей ошибок на основе BER	458
Д2.4.1. Использование вероятностных оценок BER - BER	459
Д2.4.1.1. Маска BER	460
Д2.5. Процедура расчета показателей ошибок на основе ES и SES	461
Д2.5.1. Мониторинг показателей ошибок в реальных системах	464
Д2.5.2. Примеры расчета показателей ошибок	465
Д2.5.3. Новые тенденции и стандарты для оценки показателей ошибок	467
Литература	468
Глава Д3	
Пассивные оптические сети PON	468
Д3.1. Введение	469
Д3.2. Волокно в сетях доступа	469
Д3.3. Принцип действия PON	472
Д3.4. Архитектуры APON, EPON и GPON	473
Литература	478
Список литературы	479
Список литературы на русском языке, добавленный редактором перевода	485
Список часто встречающихся англоязычных сокращений	487
Предметный указатель	491