

В. Н. Листвин, В. Н. Трещиков

DWDM-системы

Второе издание

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2015

УДК 621.39
ББК 32.88
Л 63

Л63 Листвин В. Н., Трещиков В. Н.

DWDM-системы

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 296с. ISBN 978-5-94836-407-0

Рассмотрены принципы построения волоконно-оптических сетей передачи данных. Наибольшее внимание уделено технологии мультиплексирования каналов по длинам волн (DWDM). Многие рассматриваемые в книге вопросы до сих пор освещались лишь в специальных журналах. Ясный и понятный язык, большое количество иллюстраций и численных примеров делает ее полезной не только для опытных специалистов, но и для студентов, начинающих знакомиться с этой технологией.

УДК 621.39
ББК 32.88

© 2015, Листвин В. Н.
© 2015, Трещиков В. Н.
© 2015, ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-407-0

Содержание

Предисловие	7
1. Введение. DWDM-системы	8
2. Эволюция волоконно-оптических линий связи	18
2.1. Первое поколение, ММ-волокна.....	22
2.2. Второе поколение, SSMF-волокна.....	23
2.3. Третье поколение, DSF-волокна.....	24
2.4. Четвертое поколение, EDFA и DWDM.....	26
2.4.1. Мультиплексирование по длинам волн.....	26
2.4.2. Однопролетная линия.....	30
2.4.3. Каскад усилителей.....	33
2.5. Пятое поколение, форматы модуляции.....	37
2.5.1. Спектральная эффективность форматов модуляции.....	38
2.5.2. Оптические спектры сигналов.....	39
2.5.3. «Псевдолинейный режим» при $B \geq 40$ Гбит/с.....	41
3. Подводные и наземные системы	45
3.1. Топологии сетей.....	46
3.2. Параметры систем.....	48
3.3. Надежность линий.....	51
4. Оптические волокна	53
4.1. Геометрия волокон.....	53
4.2. Потери в прямом волокне.....	55
4.3. Потери в изогнутом волокне.....	56
4.4. Потери в соединениях волокон.....	58

4.5. Хроматическая дисперсия.....	59
4.6. Поляризационная модовая дисперсия.....	63
5. Нелинейные эффекты при $V \leq 10$ Гбит/с.....	68
5.1. Типы нелинейных эффектов.....	68
5.2. Фазовая самомодуляция.....	70
5.3. Перекрестная фазовая модуляция.....	74
5.4. Четырехволновое смешение.....	76
5.5. Вынужденное бриллюэновское рассеяние.....	79
5.6. Вынужденное рамановское рассеяние.....	81
6. Пассивные оптические элементы.....	91
6.1. Базовые технологии.....	91
6.2. Оптические разъемы.....	93
6.3. Оптические ответвители.....	95
6.4. Типы оптических мультиплексоров.....	101
6.5. Мультиплексоры с TFF-фильтрами.....	106
6.6. Мультиплексоры с AWG-решетками.....	110
6.7. Волокна для DCM-модулей.....	119
6.8. Компенсаторы дисперсии с DCF-волокнами.....	123
6.8. Компенсаторы дисперсии с FBG-решетками.....	131
6.10. Статические GFF-фильтры.....	143
6.11. Оптические изоляторы.....	149
6.12. Оптические циркуляторы.....	151
6.13. Атенюаторы.....	152
7. Эрбиевые усилители (EDFA).....	159
7.1. Физические основы EDFA.....	159
7.1.1. Принцип действия EDFA.....	159
7.1.2. Коэффициент перекрытия.....	162
7.1.3. Сечения рассеяния.....	164
7.1.4. Спектры усиления.....	167
7.1.5. Эффективность усиления и накачки.....	172
7.1.6. Пороговая мощность накачки.....	175
7.1.7. Типы эрбиевых волокон.....	178

7.2. Модель ненасыщенного усилителя.....	179
7.2.1. Эффект просветления волокна.....	181
7.2.2. Коэффициент усиления ненасыщенного усилителя.....	184
7.2.3. Спонтанное излучение и шум-фактор.....	186
7.3. Модель насыщенного усилителя.....	189
7.3.1. Эффект самонасыщения.....	189
7.3.2. Коэффициент усиления в режиме самонасыщения.....	192
7.3.3. Шумы усилителя в режиме самонасыщения.....	196
7.3.4. Спектральные характеристики.....	198
7.4. Насыщение усилителя мощностью сигнала.....	202
8. Расчет оптических шумов.....	205
8.1. OSNR на выходе линии передачи.....	205
8.2. Неоднородности спектра OSNR.....	212
8.3. Предустановка спектра входного сигнала.....	214
8.4. Шум-фактор оптических усилителей.....	218
9. Восстановление сигнала и шумы.....	223
9.1. Элементы цифрового фотоприемника.....	223
9.1.1. Блок-схема.....	224
9.1.2. Фотодиод.....	225
9.1.3. Трансимпедансный усилитель.....	227
9.1.4. Регенератор.....	230
9.2. Быстродействующие фотодиоды.....	232
9.2.1. Импульсные характеристики.....	232
9.2.2. Вертикальное и торцевое освещение.....	235
9.2.3. Насыщение фотодиодов.....	237
9.3. Измерение BER.....	241
9.3.1. Схема измерений.....	242
9.3.2. Законы распределения ошибок.....	243
9.3.3. Методика измерений.....	245
9.3.4. Тестирование.....	247
9.4. Коэффициент ошибок и Q-фактор.....	249
9.4.1. Вероятность появления ошибок.....	249
9.4.2. Оптимальное положение порога.....	250

9.4.3. Q-фактор.....	251
9.4.4. Негауссовы шумы.....	253
9.5. Шумы фотоприемника.....	254
9.5.1. Шумы спонтанного излучения.....	255
9.5.2. Тепловые шумы.....	256
9.6. Требуемое OSNR и чувствительность фотоприемников.....	257
9.6.1. Требуемое OSNR ($OSNR_r$).....	258
9.6.2. Чувствительность фотоприемников.....	261
9.6.3. Отношение сигнал/шум в бите.....	263
Сокращения.....	266
Литература.....	273
Дополнительная литература.....	277

Предисловие

В настоящее время телекоммуникационная индустрия претерпевает беспрецедентные изменения, связанные с переходом от голосовых систем к системам передачи данных, что является следствием бурного развития Интернет-технологий и разнообразных сетевых приложений. Поэтому одним из основных требований, предъявляемых к волоконно-оптическим сетям, является возможность быстрого увеличения их пропускной способности в соответствии с ростом объемов трафика. Наилучшим образом эта задача решается с помощью технологии мультиплексирования каналов по длинам волн (DWDM — Dense Wavelength Division Multiplexing).

Детальное описание технологии DWDM и обширный список литературы можно найти в томах *Optical Fiber Telecommunications* [1—5, 66], первый из которых был издан в 1979 году (самые новые на сегодняшний день тома VIa и VIb вышли в 2013 г.). Список литературы на русском языке приведен в конце этой книги.

Мы рассмотрим основы технологии DWDM-систем, ориентируясь на стандартное одномодовое волокно (SSMF) и российское оборудование «Волга». На долю SSMF-волокон приходится более 90% волокон, уложенных в наземные линии связи. Оборудование «Волга» сертифицировано для передачи до 96 каналов DWDM со скоростью 100 Гбит/с, ведется работа по повышению максимальной скорости передачи по одной паре волокон до 27 Тбит/с. С помощью этого оборудования компанией «Т8» инсталлировано более 55 000 км магистральных DWDM-сетей.

В книге собран курс лекций по волоконно-оптическим системам передачи, прочитанный в течение нескольких лет для специалистов отрасли, занимающихся разработкой, внедрением и эксплуатацией DWDM-систем. Первое издание книги вышло в 2012 г., во втором издании исправлены опечатки и добавлены новые данные. Авторы благодарят Сергея Шаталина за замечания, а также Андрея Леонова за редактирование текста и иллюстраций.

Мы продолжаем начатую в 2003 г. серию книг по волоконной оптике: «Оптические волокна для линий связи», «Рефлектометрия оптических волокон». Материал излагается достаточно просто и может быть хорошим введением для тех, кто только начинает знакомиться с телекоммуникационными технологиями. Авторы книги — сотрудники компании «Т8», занимающейся разработкой и производством DWDM-оборудования, а также проектированием, инсталляцией и пуско-наладкой DWDM-систем.

Производство книг на заказ
Издательство «ТЕХНОСФЕРА»
тел.: (495) 234-01-10
e-mail: knigi@technosphera.ru

Реклама в книгах:

- модульная
- статьи

Подробная информация о книгах на сайте
<http://www.technosphera.ru>

Листвин В. Н., Трещиков В. Н.

DWDM-системы

Редактор – А.В. Леонов
Компьютерная верстка – С.С. Бегунов
Дизайн – М.А. Костарева
Корректор – Н.А. Шипиль
Выпускающий редактор – О.Н. Кулешова
Ответственный за выпуск – С.А. Орлов

Подписано в печать 02.02.2015.
Формат 70x100/16. Печать офсетная.
Гарнитура Ньютон
Печ.л. 18,5. Тираж 1000 экз., Зак. №
Бумага офсет №1, плотность 80 г/м²

Издательство «ТЕХНОСФЕРА»
Москва, ул. Краснопролетарская, д.16, стр.2

Отпечатано в ОАО «ИПК «Чувашия»
Мининформполитики Чувашии
428019 Чувашская Республика
г. Чебоксары, проспект Ивана Яковлева, дом 13