

В. Н. Гордиенко, В. В. Крукмалев,
А. Д. Моченов, Р. М. Шарафутдинов

Оптические телекоммуникационные системы

Под редакцией профессора В. Н. Гордиенко

*Рекомендовано УМО по образованию
в области телекоммуникаций в качестве учебника
для студентов, обучающихся по направлению
подготовки дипломированных специалистов
210400 – «Телекоммуникации»
и направлению подготовки бакалавров
210700 – «Инфокоммуникационные технологии
и системы связи»*

Москва
Горячая линия - Телеком
2011

УДК 621.315
ББК 32.889
О-62

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор *В. Н. Дмитриев*, кандидат техн. наук, доцент *Б. Г. Спасский*

О-62 Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов / В. Н. Гордиенко, В. В. Крухмалев, А. Д. Моченов, Р. М. Шарафутдинов. Под ред. профессора В. Н. Гордиенко. – М: Горячая линия–Телеком, 2011. – 368 с.: ил.

ISBN 978-5-9912-0146-9.

Изложены принципы построения и основные особенности оптических телекоммуникационных систем, использующих в качестве среды передачи волоконно-оптические кабели. Подробно рассмотрены физические основы работы различных оптических и фотоэлектронных компонент, их параметры и характеристики. Обсуждаются особенности передачи цифровых сигналов по линейным трактам и оборудования волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) плеззиохронной и синхронной цифровых иерархий и вопросы построения на его основе современных телекоммуникационных сетей. Рассмотрены волоконно-оптические системы передачи со спектральным разделением оптических каналов и основы проектирования волоконно-оптических линий передачи.

Для студентов вузов, обучающихся по направлениям 210400 – «Телекоммуникации» и 210700 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», будет полезна для специалистов.

ББК 32.889

Учебное издание

Гордиенко Владимир Николаевич, **Крухмалев** Владимир Васильевич,
Моченов Анатолий Дмитриевич, **Шарафутдинов** Рафаил Муссолимович

ОПТИЧЕСКИЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Учебник

Редактор Ю. Н. Чернышов
Компьютерная верстка Ю. Н. Чернышова
Обложка художника В. Г. Ситникова

Подписано к печати 05.04.2011. Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 23. Изд. №11146. Тираж 1000 экз.

ISBN 978-5-9912-0146-9

© В. Н. Гордиенко, В. В. Крухмалев,
А. Д. Моченов, Р. М. Шарафутдинов, 2011
© Издательство «Горячая линия–Телеком», 2011

Введение

Связь как область человеческой деятельности развивалась от простейших форм цивилизации первобытно-общественного строя до современной цивилизации инфокоммуникационного общества. Непреходяще стремление человека к единственно настоящей роскоши — к роскоши человеческого общения. И связь в этом играет важную роль, обеспечивая разнообразные формы общения. Зарождение связи как формы общения относится к первобытной эпохе, главным достижением которой является возникновение *членораздельной* речи, необходимой, чтобы договориться об организации труда первобытного общества. Связь здесь имеет форму личного общения, использования посыльных (гонцов) и простейших форм сигнализации.

В эпоху неолита происходит *первое крупное общественное разделение труда* — отделение скотоводческих племен от земледельческих. Появляются новые виды связи — контакты между представителями различных племен при обмене продуктами их труда, т.е. связь в сфере производства.

Второе крупное разделение труда — ремесло отделяется от земледелия. Для этой эпохи связь личным общением усложняется, так как возникает необходимость ее установления между тремя партнерами: земледельцем, скотоводом и ремесленником. Для передачи сообщений на большие расстояния на этом этапе развития цивилизации использовались *оптические сигналы*: днем — дым костров, ночью — их огонь (пламя). Основу таких оптических систем связи составляли сторожевые посты, расположенные вокруг селений на специально построенных вышках, башнях, а иногда и просто на деревьях. Оптические системы связи с использованием в качестве носителей сообщения в виде огня и дыма допускали передачу весьма ограниченного числа сообщений, содержание которых было заранее обусловлено. *Код* костров был хотя романтичным и выразительным, но очень бедным, а пропускная способность весьма ограничена.

Необходимость передавать не только отдельные сигналы типа *тревог* и *радости* привела к применению кодов световых (оптических) сигналов.

Среди разработок того времени можно, например, отметить *азбучный* факельный оптический телеграф, изобретенный в III в. до н.э.

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Принципы построения волоконно-оптических систем передачи	12
1.1. Основные понятия и определения	12
1.2. Обобщенная схема волоконно-оптической системы передачи	14
1.3. Классификация волоконно-оптических систем передачи	21
1.4. Принципы построения двусторонних линейных трактов ВОСП	24
1.5. Уплотнение оптических кабелей	26
Глава 2. Оптические кабели и пассивные компоненты волоконно-оптических систем передачи	28
2.1. Оптическое волокно	28
Особенности распространения сигнала по оптическому волокну	28
Профили показателей преломления ОВ	31
Апертура ОВ	31
Затухание ОВ	33
Дисперсия в ОВ	36
Конструктивные параметры оптического волокна	41
2.2. Оптические кабели	45
Классификация оптических кабелей	45
Конструктивные элементы оптических кабелей	47
Типовые конструкции оптических кабелей	52
2.3. Разъемные и неразъемные соединители	56
Назначение и требования к пассивным оптическим устройствам	56
Устройства ввода/вывода оптического сигнала	58
Оптические соединители	60
2.4. Оптические разветвители и ответвители	67
Типы разветвителей и ответвителей	67
Основные параметры оптических разветвителей-ответвителей	68

Оптические спектрально-селективные разветвители	71
2.5. Оптические изоляторы и аттенюаторы	72
2.6. Оптические фильтры	74
Основные понятия и определения. Классификация опти- ческих фильтров	74
Оптические фильтры на основе дифракционных решеток	77
Фильтры на основе волоконно-оптических решеток Врэгга	78
Фильтры на основе резонаторов Фабри–Перо	80
Оптические фильтры на тонких интерференционных пленках	82
Оптические фильтры других технологий	83
Глава 3. Оптоэлектронные компоненты волоконно-опти- ческих систем передачи	85
3.1. Источники оптического излучения	85
Принципы действия полупроводниковых источников опти- ческого излучения	85
Светоизлучающие диоды	88
Полупроводниковые лазерные диоды	92
Передающие оптические модули	94
3.2. Оптические модуляторы	98
Модуляция оптической несущей	98
Электрооптические модуляторы	103
Магнитооптические модуляторы	105
Акустооптические модуляторы	107
Внутренняя модуляция оптической несущей	107
3.3. Приемники оптического излучения	109
Обобщенная схема приемника оптического излучения ...	109
Особенности построения фотодиодов	111
Приемные оптоэлектронные модули	115
Шумы приемных оптических модулей	117
3.5. Оптические усилители	120
Классификация и основные параметры оптических усили- телей	120
Полупроводниковые оптические усилители	124
Волоконно-оптические усилители	126
Рабочие параметры оптических усилителей типа EDFA .	128
Основные функциональные схемы усилителей технологии EDFA	132
Глава 4. Линейные тракты волоконно-оптических систем передачи	137
4.1. Оптический линейный тракт	137

Классификация оптических линейных трактов	137
Линейные ретрансляторы	140
Основные параметры линейных трактов ЦВОСП	143
4.2. Линейные коды цифровых волоконно-оптических систем передач	144
Требования к линейным кодам, их параметры и классификация	144
Типы линейных кодов ЦВОСП и их формирование	146
Скремблирование цифрового сигнала	155
4.3. Помехоустойчивость регенераторов ЦВОСП	158
Расчет вероятности ошибки регенератора	158
Оценка качества работы регенератора с помощью глаз-диаграммы	160
Глава 5. Волоконно-оптические системы передачи плезиохронной цифровой иерархии	165
5.1. Принципы мультиплексирования в цифровых ВОСП плезиохронной цифровой иерархии	165
5.2. Типовая аппаратура ЦВОСП ПЦИ	167
Аппаратура ВОСП для местных первичных сетей	168
Аппаратура ВОСП для внутризоновых и магистральных первичных сетей	169
5.3. Цифровые ВОСП плезиохронной цифровой иерархии нового поколения	170
Вторичные цифровые волоконно-оптические системы передачи	170
Третичные цифровые волоконно-оптические системы передачи	174
Глава 6. Волоконно-оптические системы передачи синхронной цифровой иерархии	184
6.1. Техничко-экономические аспекты создания синхронной цифровой иерархии	184
6.2. Основные принципы построения СЦИ	188
Транспортная сеть на основе технологии СЦИ	188
Формирование информационных структур СЦИ	189
Функции и структуры заголовков	206
Контроль ошибок в трактах транспортных сетей СЦИ ..	212
Функции и структуры указателей	214
6.3. Оборудование систем передачи синхронной цифровой иерархии	218
Общие понятия и определения	218
Синхронные мультиплексоры	219

Конфигурации синхронных мультиплексоров	228
Обобщенная структурная схема мультиплексора	231
Глава 7. Телекоммуникационные сети на основе воло-	
конно-оптических систем передачи	236
7.1. Сетевые топологические структуры	236
7.2. Защита телекоммуникационных сетей и оборудования	
СЦИ	242
7.3. Принципы построения сети тактовой синхронизации ..	249
Архитектура сети синхронизации	254
Качество синхронизации	255
Присоединение к базовой сети синхронизации и выбор то-	
пологии	256
7.4. Принципы управления сетями электросвязи	262
Назначение TMN	262
Логическая архитектура TMN	264
Функциональная архитектура сети TMN	267
Информационная архитектура TMN	268
Физическая архитектура TMN	270
Глава 8. Волоконно-оптические системы со спектраль-	
ным разделением	272
8.1. Технология спектрального разделения	272
8.2. Функциональная схема ВОСП-СР	277
8.3. Классификация ВОСП-СР и основные параметры	280
8.4. Параметры и характеристики мультиплексоров и де-	
мультиплексоров ВОСП-СР	285
8.5. Переходные влияния в ВОСП-СР	289
Переходные помехи из-за ВКР	291
Переходные помехи из-за четырехволнового смещения ..	294
Глава 9. Основы проектирования волоконно-оптических	
линий передачи	298
9.1. Организация проектирования	298
9.2. Составление схемы организации связи	299
9.3. Выбор аппаратуры ВОСП СЦИ и типа оптического ка-	
беля	303
9.4. Инженерный расчет основных показателей ВОЛП.....	320
Расчет длины регенерационного участка	320
Расчет параметров качества функционирования каналов и	
трактов ВОСП	324
Расчет оперативных норм на показатели качества каналов	
и трактов ВОСП СЦИ	327

Определение показателей надежности ВОЛП	331
9.5. Особенности проектирования ВОЛП с использованием аппаратуры ВОСП-СР	338
Оценка технологий WDM и типа оптического волокна ...	338
Схема организации связи на основе технологии WDM ...	340
Расчет длины усилительного участка ВОСП-СР	346
Расчет защищенности и предельной протяженности реге- нерационной секции ВОСП-СР	348
Расчет дисперсии регенерационной секции	350
Список сокращений	359
Литература	360