

В. В. Крухмалев
В. Н. Гордиенко
А. Д. Моченов

Цифровые системы передачи

*2-е издание, переработанное и дополненное
Под редакцией А. Д. Моченова*

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

Москва
Горячая линия - Телеком
2012

УДК 621.372.88(075)

ББК 32.883

К43

Рецензенты: канд. техн. наук, профессор *В. А. Кудряшов*; канд. техн. наук, доцент *Б. Г. Спасский*

Крухмалев В. В., Гордиенко В. Н., Моченов А. Д.

К43 Цифровые системы передачи: Учебное пособие для вузов / Под редакцией А. Д. Моченова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия–Телеком, 2012. – 376 с: ил.

ISBN 978-5-9912-0226-8.

Изложены принципы построения цифровых систем передачи (ЦСП) на основе импульсно-кодовой модуляции с временным разделением каналов, рассмотрены основные функциональные узлы оконечных станций ЦСП, принципы мультиплексирования при образовании высших ступеней плезиохронной цифровой иерархии, а также основы синхронной цифровой иерархии. Рассмотрены вопросы построения линейных трактов ЦСП по металлическим и оптическим кабелям. Во втором издании изменения в той или иной степени коснулись практически всех глав пособия. Существенно дополнена третья глава в части касающейся структуры цикла первичного цифрового потока и первичного мультиплексирования, четвертая глава дополнена изложением цифровых систем абонентского доступа на основе технологии *xDSL*, содержание седьмой главы дополнено рассмотрением линейных кодов цифровых волоконно-оптических систем передачи и особенностей распространения светового сигнала в оптическом волокне, его основных параметров и характеристик, а также рассмотрены общие вопросы построения оптических усилителей.

Для студентов, обучающихся по специальностям «Многоканальные телекоммуникационные системы», «Сети связи и системы коммутации», «Физика и техника оптической связи» и «Защищенные системы связи» направления 210400 – «Телекоммуникации» и направлению подготовки бакалавров 210700 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Будет полезна студентам, обучающимся по специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте», и студентам колледжей телекоммуникационного направления.

ББК 32.883

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

Учебное издание

**Крухмалев Владимир Васильевич, Гордиенко Владимир Николаевич
Моченов Анатолий Дмитриевич**

ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

Учебное пособие

Художник В. Г. Ситников

Подготовка оригинал-макета Ю. Н. Рысева

Подписано к печати 20.10.2011. Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 23,5. Тираж 500 (1-й завод 200 экз.)

ISBN 978-5-9912-0226-8

© В. В. Крухмалев, В. Н. Гордиенко, А. Д. Моченов, 2012
© Оформление издательства «Горячая линия–Телеком», 2012

Предисловие

В настоящее время более чем в восьмидесяти государственных вузах Российской Федерации и многих колледжах на основе лицензий, выданных Минобрнауки РФ, осуществляется подготовка бакалавров и инженеров по специальностям, входящим в направление «Телекоммуникации». Кроме того, в большом количестве вузов и колледжей самых различных отраслей народного хозяйства в рамках других направлений открыты специализации с телекоммуникационным уклоном.

В этих условиях, несмотря на определенные успехи, достигнутые за последние годы в подготовке и издании учебников и учебных пособий, проблема обеспечения учебного процесса необходимой учебной литературой остается достаточно острой. Предлагаемое издание поможет частично решить отмеченную проблему.

Данное учебное пособие ориентировано на студентов, обучающихся по специальностям «Многоканальные телекоммуникационные системы», «Цифровые системы передачи», «Сети связи и системы коммутации», «Физика и техника оптической связи», «Защищенные системы связи» направления 210400 – «Телекоммуникации» и направлению подготовки бакалавров 210700 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Пособие также может быть полезно студентам специальности «Системы обеспечения движения поездов» специализации «Телекоммуникационные системы и сети на железнодорожном транспорте», а также студентам колледжей телекоммуникационного направления.

Одной из особенностей учебного пособия является наличие большого числа конкретных примеров в тексте и вопросов для самоконтроля в конце каждой из глав.

Предлагаемая читателю книга является вторым изданием (исправленным и дополненным) учебного пособия «Цифровые системы передачи» (Горячая линия – Телеком, 2007).

Авторы данного учебного пособия представляют Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ) и Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

Глава 1. Построение цифровых систем передачи на основе импульсно-кодовой модуляции с временным разделением каналов

Научно-технический прогресс конца XX века открыл пути создания глобального информационного общества, в котором информационные и телекоммуникационные технологии приобретают особое значение, интегрируясь в *инфокоммуникационный сектор* мировой экономики, экономики каждой страны и ее регионов.

Глобальное информационное общество – ступень в развитии современной цивилизации, характеризующаяся возрастанием роли информации и знаний в жизни общества, ростом доли информационно-коммуникационных – инфокоммуникационных технологий в валовом внутреннем продукте (ВВП), созданием глобального информационного пространства, обеспечивающего эффективное информационное взаимодействие людей, их доступ к мировым информационным структурам.

Развитие инфокоммуникационного сектора в мире происходит одновременно по нескольким направлениям. При этом в области телекоммуникаций и информации оно характеризуется созданием глобальных инфокоммуникационных систем и сетей, основу которых составят цифровые системы передачи (ЦСП) или многоканальные телекоммуникационные системы (МТС) различного назначения с широким использованием современных оптоволоконных технологий и цифровых систем коммутации различного вида и уровня. Важное место в построении и развитии инфокоммуникационного сектора нашей страны отводится Федеральной целевой программе Электронная Россия 2002–2010 гг., одной из задач которой является расширение подготовки специалистов по инфокоммуникационным технологиям.

1.1. Основные понятия и определения. Классификация цифровых систем передачи

Цифровой системой передач (ЦСП) называется *комплекс* технических средств, предназначенный для образования типовых цифровых каналов и трактов и линейного тракта, обеспечивающего передачу цифровых сигналов электросвязи. В этом определении имеется ряд понятий, требующих дополнительных пояснений.

Оглавление

Предисловие	3
Глава 1. Построение цифровых систем передачи на основе импульсно-кодовой модуляции с временным разделением каналов	4
1.1. Основные понятия и определения. Классификация цифровых систем передачи	4
1.2. Аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование сигнала в ЦСП ИКМ-ВРК	7
1.2.1. Дискретизация или амплитудно-импульсная модуляция	8
1.2.2. Переходные влияния в групповом АИМ тракте	16
1.2.3. Способы повышения защищенности от переходных помех	19
1.2.4. Дискретизация групповых сигналов	21
1.3. Квантование	25
1.3.1. Равномерное квантование	26
1.3.2. Неравномерное квантование	33
1.3.3. Энергетический спектр шума квантования	42
1.4. Кодирование квантовых сигналов	43
1.4.1. Основные понятия и определения. Классификация кодов и их основные параметры	43
1.4.2. Нелинейное кодирование	48
1.4.3. Сравнение A - и μ -законов нелинейного компандирования	57
1.5. Групповой ИКМ сигнал	60
1.6. Обобщенная структурная схема оконечной станции цифровой системы передачи с ИКМ-ВРК	63
Глава 2. Основные функциональные узлы цифровых систем передачи с ИКМ-ВРК	73
2.1. Канальные амплитудно-импульсные модуляторы и селекторы	73
2.2. Кодеры и декодеры с линейной шкалой квантования	77
2.3. Кодеры и декодеры с нелинейной шкалой квантования	88
2.4. Генераторное оборудование цифровых систем передачи	94
2.4.1. Общие принципы построения генераторного оборудования	94
2.4.2. Задающие генераторы	97
2.4.3. Делители частоты	100

Оглавление

Глава 3. Временное группообразование или мультиплексирование в ЦСП ИКМ-ВРК.....	102
3.1. Иерархии и стандарты ЦСП ИКМ-ВРК	102
3.2. Объединение цифровых потоков в плезиохронной цифровой иерархии	104
3.2.1. Построение цикла первичного цифрового потока Е1. Универсальная система первичного мультиплексирования.....	107
3.2.2. Построение цикла первичного цифрового потока DS1	115
3.3. Асинхронное объединение цифровых потоков	116
3.3.1. Временные сдвиги и неоднородности. Согласование скоростей	116
3.3.2. Методы асинхронного объединения цифровых потоков	120
3.3.3. Структурная схема ОВГ с асинхронным объединением цифровых потоков	126
3.3.4. Формирование структуры цикла передачи	130
3.4. Синхронное объединение цифровых потоков.....	136
3.4.1. Синфазно-синхронное объединение и разделение цифровых потоков.....	136
3.4.2. Синхронное объединение цифровых потоков.....	138
3.5. Функциональные узлы оборудования временного группообразования.....	140
3.5.1. Запоминающее устройство.....	140
3.5.2. Временной детектор	143
3.5.3. Передатчик и приемник команд согласования скоростей	145
3.5.4. Устройство фазовой автоподстройки частоты	150
3.6. Объединение цифровых потоков в синхронной цифровой иерархии....	154
3.6.1. Формирование STM-1 на основе компонентного потока Е1	158
3.6.2. Формирование STM-1 на основе компонентного потока Е3	159
3.6.3. Формирование STM-1 на основе компонентного потока Е4	160
3.6.4. Формирование STM-1 на основе потока DS1 североамериканского стандарта.....	163
3.6.5. Формирование STM-1 на основе потока DS2 североамериканского стандарта.....	163
3.6.6. Формирование STM-1 на основе потока DS3 североамериканского стандарта.....	163
3.7. Функциональные блоки аппаратуры SDH.....	164
3.7.1. Общие положения	164
3.7.2. Структура терминального мультиплексора для формирования STM-1 на основе компонентного потока Е1	165

Оглавление

3.7.3. Структура терминального мультиплексора для формирования STM-1 на основе потока E4.....	169
3.7.4. Управление в аппаратуре синхронной цифровой иерархии.....	170
3.7.5. Обобщенная структурная схема терминального мультиплексора уровня STM-1	171
Глава 4. Цифровые разностные системы передачи и цифровые системы передачи абонентского доступа.....	174
4.1. Дифференциальная импульсно-кодовая модуляция	174
4.2. Дельта-модуляция	181
4.3. Дельта-модуляция с инерционным компандированием (ДМИК)	185
4.4. Полосное кодирование. Вокодеры.....	187
4.5. Ввод сигналов передачи данных в каналы и тракты цифровых систем передачи с ИКМ-ВРК.....	198
4.6. Цифровые системы передачи абонентского доступа.....	203
4.6.1. Основные понятия и определения. Классификация систем абонентского доступа на основе технологии xDSL.....	203
4.6.2. Технология и алгоритмы линейного кодирования xDSL	208
4.6.3. Примеры реализации систем передачи абонентского доступа	214
Глава 5. Синхронизация в цифровых системах передачи	222
5.1. Основные понятия и определения. Виды синхронизации. Требования к системам синхронизации	222
5.2. Тактовая синхронизация.....	224
5.3. Тактовая сетевая синхронизация	230
5.4. Общие принципы построения цикловой синхронизации	245
5.4.1. Отличительные признаки циклового синхросигнала.....	245
5.4.2. Классификация приемников синхросигнала.....	248
5.5. Приемники синхросигнала с задержкой контроля и одноразрядным сдвигом.....	250
5.6. Приемники синхросигнала со скользящим поиском	255
5.6.1. Неадаптивные приемники синхросигнала	256
5.6.2. Приемник синхросигнала, адаптивный к вероятности ошибки в линейном тракте.....	261
5.6.3. Полностью адаптивный приемник синхросигнала.....	263
5.7. Оценка параметров системы цикловой синхронизации.....	264
Глава 6. Линейный тракт цифровых систем передачи по электрическим кабелям	273
6.1. Основные понятия и определения. Структура линейного тракта и его основные параметры.....	273
6.2. Линейные коды.....	277
6.3. Скремблирование цифрового сигнала.....	288
6.4. Регенерация цифрового сигнала	291
6.4.1. Принципы построения и классификации регенераторов.....	291
6.4.2. Обобщенная структурная схема типового регенератора	294

Оглавление

6.4.3. Оценка помехозащищенности одиночного регенератора	297
6.4.4. Оценка помехозащищенности одиночного регенератора с помощью глаз-диаграмм.....	302
Глава 7. Линейный тракт цифровых систем передачи по оптическим кабелям	306
7.1. Обобщенная структурная схема цифровой волоконно-оптической системы передачи.....	306
7.2. Принципы построения двухсторонних линейных трактов ЦВОСП	313
7.2.1. Линейные коды ЦВОСП.....	314
7.2.2. Обобщенная структурная схема оптического линейного тракта..	321
7.3. Методы уплотнения волоконно-оптических линий связи	325
7.4. Источники оптического излучения.....	338
7.5. Оптическое волокно.....	342
7.5.1. Затухание оптического волокна.....	345
7.5.2. Дисперсия оптического волокна.....	346
7.6. Приемники оптического излучения.....	349
7.7. Модуляция и демодуляция оптической несущей	354
7.7.1. Методы модуляции оптической несущей	358
7.7.2. Типы оптических модуляторов.....	360
7.8. Оптические усилители	366
Список литературы	371