



МИР электроники

А.И. Белоус, В.А. Солодуха,
С.В. Шведов

**Основы конструирования
высокоскоростных
электронных устройств.
Краткий курс «белой магии»**

Под общей редакцией А.И. Белоуса

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2017

УДК 621.38
ББК 32.85
Б43

Б43 Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В.

Основы конструирования высокоскоростных электронных устройств.

Краткий курс «белой магии»

Под общей редакцией А.И. Белоуса

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2017. – 872 с. ISBN 978-5-94836-500-8

Впервые в отечественной научно-технической литературе в объеме одной книги детально и последовательно рассмотрен комплекс теоретических и практических аспектов проектирования и организации производства различного рода радиоэлектронных устройств, приборов и систем, общим и основным отличительным признаком которых является высокая скорость обработки и передачи данных.

В быстродействующих цифровых схемах, составляющих основу аппаратной части современных быстродействующих электронных устройств, короткие фронты обрабатываемых и передаваемых сигналов приводят к появлению множества нежелательных эффектов – разработчики таких устройств на практике имеют дело с искаженными до неузнаваемости цифровыми сигналами, которые к тому же передаются на фоне множественных помех.

Поскольку многие из вопросов, включенных в эту книгу, ранее не рассматривались в стандартных учебных курсах, инженеры-практики часто относятся к эффектам, проявляющимся в высокоскоростных цифровых устройствах, как к чему-то мистическому, поэтому в своей профессиональной среде называют их «эффектами черной магии», имея в виду, что на высоких частотах с быстродействующими устройствами происходит что-то необычное и необъяснимое.

В большинстве случаев в устройствах «низкой» и «средней» производительности эти эффекты себя не проявляют, но с увеличением скорости обработки и скорости передачи данных они фактически стали преградой на пути повышения производительности современных информационно-коммуникационных и телекоммуникационных систем. В монографии рассмотрены основные теоретические и практические аспекты проектирования быстродействующих электронных устройств «по полной цепочке» – от верхнего системного уровня иерархии до уровня базовых элементов и плат.

Книга ориентирована на широкий круг читателей: студентов, аспирантов, преподавателей технических университетов, инженеров, специализирующихся в области разработки и организации производств различного рода радиоэлектронных устройств, приборов и систем, к которым предъявляются требования обеспечения высокой скорости обработки и передачи данных.

**УДК 621.38
ББК 32.85**

© 2017 Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В.
© 2017, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-500-8

Содержание

Предисловие	13
Введение	18
Глава 1. Информационно-коммуникационные технологии и системы на их основе	21
1.1. Основные тенденции развития информационно-коммуникационных технологий	21
1.2. Основные принципы организации телекоммуникационных систем	23
1.3. Из истории развития высокоскоростных сетей передачи данных	33
1.4. Стандартные протоколы функционирования телекоммуникационных систем	37
1.5. Базовые стандарты телекоммуникационных систем.....	42
1.6. Практические основы физического и логического кодирования данных.....	44
1.7. Узкополосные и широкополосные системы с мультиплексированием данных.....	52
1.8. Режимы и среды передачи данных	56
1.9. Структурированные кабельные системы	63
1.10. Топологии высокоскоростных систем передачи данных.....	68
1.11. Методы организации доступа в высокоскоростные каналы	70
1.12. Технологии коммутации.....	72
1.13. Особенности организации связи сегментов телекоммуникационных сетей.....	75
1.14. Полупроводниковая элементная база для телекоммуникационных систем нового поколения.....	82
Глава 2. Особенности организации проводных интерфейсов высокоскоростных электронных устройств	99
2.1. Линии связи как составной компонент интерфейса	99
2.2. Методы организации и основные параметры интерфейсных шин высокоскоростных электронных устройств	101
2.3. Основные принципы применения и методы расчета характеристик проводных линий связи.....	106
2.3.1. Расчет электрических параметров проводных линий связи.....	106
2.3.2. Расчет динамических параметров проводных линий связи	109
2.3.3. Энергетические параметры проводных линий связи	111
2.3.4. Конструктивные варианты реализации проводных линий связи	112
2.4. Организация процесса высокоскоростной передачи данных на основе трансиверов с топологией типа SerDes.....	113
2.4.1. Принципы работы трансивера с топологией типа SerDes.....	113
2.4.2. Методы коррекции сигнала при передаче по видеокабелю.....	117
2.5. Особенности проектирования высокоскоростных шин памяти DDR	120
2.5.1. Принцип работы модуля DDR	120

2.5.2. Методологические особенности этапа подготовки к моделированию	124
2.5.3. Некоторые методологические особенности этапа моделирования.....	127
2.6. Особенности организации каналов высокоскоростной передачи данных с интерфейсом RS-485.....	130
2.6.1. Синхронные каналы передачи данных на основе RS-485.....	130
2.6.2. Асинхронные каналы передачи данных на основе RS-485.....	134
2.7. Схмотехнические методы защиты интерфейсных шин RS-485 от электрических перенапряжений.....	136
2.8. Практические рекомендации по конструированию шинного узла высокоскоростного интерфейса RS-485.....	141
2.9. Особенности проектирования высокоскоростных электронных устройств на основе программируемых логических микросхем.....	146
2.9.1. Выбор конкретного типоминимала базовой ПЛИС	146
2.9.2. Общие рекомендации по выбору структуры системы электропитания высокоскоростных электронных устройств.....	149
2.9.3. Общие рекомендации по выбору оптимальной структуры дерева тактовых сигналов	150
2.9.4. Общие рекомендации по проектированию топологий печатных плат высокоскоростных устройств	153
2.10. Схмотехнические варианты согласования линий передачи стандарта LVPECL	155
Глава 3. Беспроводные телекоммуникационные системы	164
3.1. Тенденции, перспективы и проблемы развития элементной базы беспроводных телекоммуникационных систем	164
3.2. Основные методологические и терминологические проблемы внедрения беспроводных телекоммуникационных систем пятого поколения	171
3.3. Состояние, перспективы и проблемы развития технологий мобильной связи пятого поколения (5G).....	175
3.4. Основные тенденции и проблемы развития беспроводных технологий для «Интернета вещей» (IoT)	184
3.5. Каналы связи телекоммуникационных систем поколения 5G на основе фазированных антенных решеток.....	187
3.6. Особенности использования технологий LPWAN для «Интернета вещей»	189
Глава 4. Методы и средства обеспечения помехоустойчивости быстродействующих электронных устройств	195
4.1. Электромагнитная совместимость электронных устройств: термины, определения, классификация.....	195
4.1.1. Природа электромагнитных помех.....	195
4.1.2. Формы представления сигналов помехи.....	196
4.1.3. Измерение электромагнитного излучения.....	198
4.1.4. Термины, определения, классификация ЭМС	200
4.1.5. Нормы и стандарты электромагнитной совместимости.....	203

4.2. Оценка устойчивости полупроводниковой элементной базы быстродействующих электронных устройств к воздействию электромагнитных помех	214
4.3. Обеспечение электромагнитной совместимости микропроцессорных блоков управления быстродействующих электронных устройств.....	221
4.3.1. Особенности проектирования печатных плат, оптимизированных по электромагнитной совместимости.....	221
4.3.2. Особенности измерения уровня помех, излучаемых микроконтроллерами	227
4.3.2.2. Схемотехнические методы по предотвращению излучения помех от микроконтроллеров	231
4.3.2.3. Компьютерное моделирование характеристик EMC.....	234
4.3.3. Обеспечение электромагнитной совместимости в проводных линиях связи телекоммуникационных сетей	236
4.3.3.1. Общие требования к электромагнитной совместимости телекоммуникационных систем	236
4.3.3.2. Системы, компоненты и основные понятия	238
4.3.4. Особенности проектирования топологии печатных плат для высокоскоростных систем связи	239
4.3.4.1. Понятие целостности сигнала	239
4.3.4.2. Перекрестные помехи	240
4.3.4.3. Индуктивная перекрестная помеха	241
4.3.4.4. Емкостная перекрестная помеха.....	243
4.3.4.5. Сочетание индуктивной и емкостной перекрестных помех.....	244
4.3.4.6. Затухающие колебания («звон»)	246
4.3.4.7. Нестабильность земли	248
4.3.4.8. Шумы источника питания	249
4.4. Методы уменьшения уровня интермодуляционных искажений в высокоскоростных электронных устройствах	251
4.4.1. Механизмы возникновения явлений пассивной интермодуляции.....	251
4.4.2. Методы снижения уровня пассивной интермодуляции в радиочастотных соединителях.....	253
4.4.3. ПИМ в материале печатной платы.....	254
4.4.4. ПИМ в полосковых, коаксиальных и волноводных линиях передачи	254
4.4.5. ПИМ в направленных ответвителях, частотных дуплексерах и трансформаторах.....	255
4.4.6. Внешние источники ПИМ	256
4.4.7. Методы оценки уровня ПИМ.....	257
4.5. Стандарты и методы испытаний быстродействующих электронных устройств на устойчивость к электростатическим разрядам	260
4.5.1. Стандарты испытания на уровне устройства	260
4.5.1.1. Модель человеческого тела	260

4.5.1.2. Машинная модель	262
4.5.1.3. Модель заряженного устройства	263
4.5.2. Сравнение методов испытаний на уровне устройства	264
4.5.3. Стандарты испытаний на системном уровне	265
4.5.3.1. Устойчивость к быстрому переходному процессу	265
4.5.3.2. Устойчивость к всплескам напряжения	267
4.6. Защитные СВЧ-устройства для телекоммуникационных систем	269
4.6.1. Классификация и особенности применения защитных СВЧ-устройств для радиоэлектронной аппаратуры	269
4.6.2. Газоразрядные защитные устройства	271
4.6.3. Полупроводниковые защитные устройства	272
4.6.4. Вакуумные защитные устройства	279
4.7. Специальные компоненты для фильтрации и подавления электромагнитных помех в телекоммуникационных системах	280
4.7.1. Керамические конденсаторы	280
4.7.2. Коаксиальные фильтры нижних частот	282
4.7.3. Фильтры для поверхностного монтажа	286
4.8. Методика оценки ресурса быстродействующих электронных устройств с учетом надежности механических составных частей	288
Глава 5. Основы проектирования конструкций печатных плат быстродействующих электронных устройств	299
5.1. Конструкции и технологии изготовления печатных плат	299
5.1.1. Из истории создания печатных плат	299
5.1.2. Конструкции печатных плат	302
5.1.2.1. Многослойные печатные платы	302
5.1.2.2. Гибкие печатные платы	306
5.1.2.3. Печатные платы на основании с высокой теплопроводностью	307
5.1.3. Основные технологические особенности изготовления печатных плат	308
5.1.4. Проблемы микроминиатюризации элементов печатных плат	311
5.1.5. Печатные платы для компонентов с большим тепловыделением	314
5.2. Особенности проектирования печатных плат для высокоскоростных линий передачи	318
5.2.1. Классификация основных типов линий передачи высокоскоростных электронных устройств	318
5.2.2. Конструктивные особенности проектирования высокоскоростных линий передачи сигналов	324
5.2.3. Особенности расчета характеристик проводников и линий передачи на печатных платах СВЧ-устройств	325
5.3. Конструктивно-технологические особенности проектирования печатных плат для быстродействующих электронных устройств	327
5.3.1. Методологические аспекты конструирования печатных плат быстродействующих устройств с учетом вносимых потерь	327
5.3.2. Финишные покрытия для ВЧ-плат	333

5.4. Основные тенденции развития технологии проектирования печатных плат для быстродействующих электронных устройств.....	337
5.4.1. Основные тенденции развития инновационных технологий печатных плат	337
5.4.2. Некоторые технологические особенности реализации встроенных компонентов печатных плат.....	338
5.4.3. Некоторые новые применения меди в межсоединениях печатных плат высокоскоростных электронных устройств.....	341
5.4.4. Методы конструирования специальных подложек для микросборок электронных устройств	343
5.4.5. Особенности размещения оптических цепей на платах.....	345
5.5. Методы обеспечения целостности сигналов в высокоскоростных линиях связи	348
5.5.1. Что такое целостность сигналов?	348
5.5.2. Целостность сигнала	351
5.5.3. Выбор протокола как средство повышения целостности сигнала	353
5.6. Электромагнитные помехи и методы обеспечения целостности сигналов на печатных платах высокоскоростных электронных устройств	357
5.7. Методы обеспечения целостности сигнала на всех этапах проектирования печатной платы	362
5.8. Методика расчета зигзагообразных линий задержки для печатных плат высокоскоростных устройств.....	374
5.8.1. Расчет перекрестных помех в связанных линиях передачи.....	374
5.8.2. Механизм формирования помехи в серпантине.....	378
5.8.3. Уравнения выходного сигнала серпантина	380
5.8.4. Методика определения расстояния s и коэффициента связи между соседними секциями	383
5.8.5. Аналитические выражения для определения расстояния между секциями серпантина	384
5.8.6. Практические рекомендации по выбору длины секции.....	385
5.8.7. Методика расчета величины времени опережения выходного сигнала за счет помех	387
5.8.8. Методика итогового расчета линии задержки	388
5.9. Практические рекомендации по устранению нежелательных эффектов от висячих переходных отверстий.....	390
5.10. Основные эмпирические правила проектирования топологии плат с высокоскоростными сигналами.....	399
Глава 6. Базовые компоненты телекоммуникационных систем	412
6.1. Особенности использования пассивных компонентов в ВЧ- и СВЧ-устройствах	412
6.1.1. Необходимость использования специальных материалов для эксплуатации в экстремальных условиях	412
6.1.2. Волноводы и коаксиальные линии связи.....	413
6.1.3. Адаптеры и оконечное оборудование.....	415

6.1.4. Атенюаторы и поглощающие фильтры.....	415
6.1.5. Направленные ответвители и делители/сумматоры мощности	416
6.1.6. Основные механизмы деградации СВЧ-компонентов.....	418
6.2. Новое поколение энкодеров, особенности их применения в составе РЭА.....	419
6.3. Базовые технологии радиочастотных систем.....	426
6.3.1. Качественный анализ технологий изготовления радиочастотных компонентов.....	426
6.3.2. Особенности выбора конструктивно-технологических параметров мощных СВЧ MESFET-транзисторов на основе карбида кремния	432
6.4. Конструктивно-технологические особенности и области применения импедансных ПАВ-фильтров	438
6.4.1. Особенности проектирования микросхем на ПАВ.....	438
6.4.2. Конструктивно-технологические особенности импедансных ПАВ-фильтров	443
6.4.3. Области применения импедансных ПАВ-фильтров	448
6.5. СВЧ-приложения МЭМС-технологий	455
6.5.1. Особенности реализации радиочастотных МЭМС/КМОП-устройств.....	455
6.5.2. Радиочастотные МЭМС-переключатели	460
6.5.3. Радиочастотные МЭМС-конденсаторы переменной емкости.....	463
6.5.4. Интегрированные МЭМС/КМОП-резонаторы	465
6.5.5. MEMS-технологии в задачах системной интеграции радиолокационных устройств	467
6.5.5.1. Типовые MEMS-изделия для СВЧ-устройств.....	467
6.5.5.2. Технологии микромонтажа СВЧ MEMS-приборов.....	473
6.6. Программно-конфигурируемые радиосистемы.....	476
6.7. Кабельные сборки СВЧ-диапазона	484
6.7.1. Назначение, классификация, особенности применения кабельных сборок.....	484
6.7.2. Основные технические параметры радиочастотных кабельных сборок.....	487
6.8. Основные технические параметры и конструктивные решения фазостабильных кабелей СВЧ-диапазона	494
6.8.1. Радиочастотные кабели Temp-Flex компании Molex.....	494
6.8.2. Радиочастотные кабели с изоляцией из двуокиси кремния.....	501
6.8.3. Радиочастотные кабели Phase Track	505
6.8.4. Радиочастотные кабели SucoPearl компании Huber+Suhner	509
6.9. ВОЛС в ЛВС и системах сбора информации: выбор физической среды и активной компонентной базы.....	511
6.9.1. Основные тенденции развития волоконно-оптических технологий.....	511
6.9.2. Типовые характеристики базового комплекта для ВОЛС	514

Глава 7. Специализированные микросхемы для телекоммуникационных систем	525
7.1. Принципы построения и основные технические характеристики телекоммуникационных микросхем серии SerDes	525
7.1.1. Основные положения базового стандарта IEEE 802.3 телекоммуникационных сетей Ethernet	525
7.1.2. Основные технические характеристики микросхем серии SerDes компании Semtech	527
7.1.3. Структура и принцип действия микросхем серии SerDes	529
7.2. Методы проектирования импульсных преобразователей напряжения с топологией SEPIC	532
7.2.1. Анализ и расчет параметров стандартного преобразователя SEPIC	532
7.2.2. Анализ и расчет двуполярного источника напряжения на основе преобразователя SEPIC	537
7.2.3. Выбор микросхемы преобразователя	539
7.2.4. Определение параметров остальных компонентов схемы	540
7.2.5. Краткое описание процесса моделирования преобразователя SEPIC	542
7.3. Применение систем на кристалле (СнК) для создания двунаправленных линий связи миллиметрового диапазона 60 ГГц	547
7.3.1. Модем миллиметрового диапазона	547
7.3.2. Базовый набор микросхем трансиверов для диапазона миллиметровых волн	551
7.4. Специализированные микросхемы для построения шины RS-485	555
7.4.1. Функциональные особенности приемопередатчиков интерфейса RS-485	555
7.4.2. Практические рекомендации по применению интерфейсных приемопередатчиков	558
7.5. Специализированные микросхемы для высоковольтных интерфейсов LVDS и DVI	562
7.5.1. Основные технические решения для построения интерфейса LVDS	562
7.5.2. Основные технические решения для построения DVI	565
7.6. СВЧ-микросхемы для высокоскоростных электронных устройств	571
7.6.1. Развитие технологии нитрида галлия и перспективы его применения в СВЧ-электронике	571
7.6.2. СВЧ-микросхемы на GaN	573
7.6.2.1. СВЧ-микросхемы компании RFHIC для систем беспроводной связи	573
7.6.2.2. Усилители СВЧ на основе технологии GaN	575
7.6.3. СВЧ-микросхемы компании HittiteMicrowave	584
7.6.3.1. СВЧ-микросхемы аттенуаторов	584
7.6.3.2. Типовые микросхемы аттенуаторов с аналоговым управлением	588

7.6.3.3. Микросхемы аттенюаторов с цифровым управлением.....	589
7.6.3.4. СВЧ и сверхширокополосные усилители с фиксированным усилением	591
7.6.3.5. Монолитные СВЧ-микросхемы полных синтезаторов частоты	602
7.6.4. Мощные нитрид-галлиевые транзисторы	623
7.6.5. СВЧ-приборы на основе технологии гетерогенной интеграции (Heterogeneous integration)	636
7.6.5.1. Проект COSMOS	636
7.6.5.2. Проект NEXT	640
7.6.5.3. Проект DANI	641
7.6.5.4. Проект SMART-LEES	643
7.7. Методологические особенности проектирования радиочастотных микросхем.....	645
Глава 8. Защита быстродействующих электронных устройств от электромагнитных помех	657
8.1. Конструктивно-технологические методы защиты электронных устройств от воздействия электромагнитного излучения.....	657
8.2. Практические рекомендации по выбору надежных фильтров для защиты СВЧ-устройств от электромагнитного импульса	662
8.3. Особенности проектирования защитных устройств для радиоэлектронного оборудования с частотно-регулируемыми приводами	669
8.4. Практические рекомендации разработчикам РЭА по решению проблем защиты от кондуктивных помех.....	673
8.5. Применение многослойных пленочных электромагнитных экранов для защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов от воздействия квазистационарных магнитных полей	682
Глава 9. Системы электропитания быстродействующих электронных устройств	693
9.1. Особенности проектирования систем электропитания быстродействующих электронных устройств.....	693
9.2. Специализированные микросхемы для систем энергопитания электронных устройств.....	700
9.2.1. Обобщенная структура цепи энергопитания телекоммуникационных устройств	700
9.2.2. Контроллеры и драйверы в цепях управления питанием.....	702
9.2.3. Импульсные стабилизаторы напряжения	706
9.2.4. LDO-стабилизаторы напряжения.....	710
9.2.5. Микросхемы супервизоров.....	713
9.2.6. Микросхемы формирования последовательности управляющих сигналов в цепях электропитания электронных устройств.....	717
9.2.7. Специализированные микросхемы для обеспечения горячего режима подключения электронной аппаратуры	721

9.2.8. Специализированные микросхемы переключателей нагрузки.....	726
9.3. Повышающие и понижающие DC/DC-преобразователи для быстродействующей электронной аппаратуры с батарейным питанием.....	730
9.4. Схемотехнические методы подавления шумов в цепях питания быстродействующих электронных устройств.....	739
9.4.1. Анализ типовой схемы разводки цепи электропитания платы СВЧ-устройства	739
9.4.2. Основные схемотехнические методы подавления шумов в цепях электропитания.....	743
9.5. Особенности организации систем заземления электронной аппаратуры электроэнергетических объектов.....	748
9.5.1. Заземление электронной аппаратуры – анализ неочевидных противоречий	748
9.5.2. Проблемы конвенциональных систем заземления.....	750
9.5.3. Актуальные проблемы использования защитных фильтров в цепях заземления электронных устройств	754
9.5.4. Заземление типа «плавающая земля»	755
9.5.5. Оптимальное решение проблемы организации защитного заземления электронных устройств	758
Глава 10. Базовые технологии корпусирования быстродействующих электронных устройств	762
10.1. Основные тенденции развития технологий корпусирования микросхем	762
10.2. BGA-технология сборки кристаллов	766
10.3. Технология монтажа кристаллов на плату.....	768
10.4. Многокристальные модули и печатные платы.....	770
10.5. Основные тенденции развития технологий корпусирования высокоскоростных микроэлектронных устройств.....	774
10.5.1. Тенденция уменьшения шага выводов корпуса микросхем	774
10.5.2. Технология сборки на пластине (WLP)	779
10.6. Особенности технологий корпусирования СВЧ-микросхем на пластине	785
10.7. Технологии TSV сборки микросхем для космических применений	792
10.8. Особенности сборки 3D изделий с использованием технологии «flip-chip».....	797
10.9. Основные тенденции развития технологии корпусирования микроэлектронных изделий космического и военного назначения	799
10.10. Особенности использования клеев и паст при 3D сборке	804
10.11. Технологии корпусирования полупроводниковых СВЧ-приборов и МИС.....	808
10.11.1. Основные этапы создания отечественной технологии корпусирования СВЧ-приборов	808
10.11.2. Особенности технологии корпусирования мощных СВЧ-транзисторов.....	814

10.11.3. Особенности использования золота и алюминия в технологии сборки мощных СВЧ-транзисторов	824
10.11.4. Основы технологии сборки СВЧ-микросхем	830
10.12. Специализированные радиационно-защитные корпуса микросхем	837
10.12.1. Современные материалы и конструкции корпусов с интегрированными элементами радиационной защиты	837
10.12.2. Экспериментальные исследования экранов радиационной защиты на основе различных материалов	842
10.12.3. Корпуса для микросхем с ЭРЗ на основе композитного материала W-CU	846
10.13. Некоторые проблемы обеспечения надежности паяных соединений поверхностного монтажа	847
10.13.1. Необходимость перехода от тестирования к надежностному проектированию	847
10.13.2. Краткая характеристика полей нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации	851
Перечень условных обозначений	861
Приложение 1. Перечень авторов основных работ, графические и текстовые материалы которых использованы в книге «Основы конструирования высокоскоростных электронных устройств»	869

Предисловие

Эта книга ориентирована на достаточно широкий круг читателей: студентов, аспирантов, преподавателей технических университетов, инженеров, специализирующихся в области разработки, организации производства различного рода радиоэлектронных устройств, приборов и систем, общим и основным отличительным признаком которых является высокая скорость обработки и передачи данных.

На английском языке наиболее соответствующим содержанию книги было бы короткое название «High-speed design», но на русском языке содержанию книги наиболее полно соответствует более длинное название «Основы конструирования высокоскоростных электронных устройств». Наличие в названии книги второго, нестандартного для отечественной технической литературы подзаголовка «Краткий курс белой магии» обусловлен тем фактом, что наиболее близкое по тематике аналогичное первое издание зарубежных авторов, уже ставших «живыми классиками», — Хогварда Джонсона (Howard Johnson) — основного «писателя» и его идейного учителя Мартина Грэхама (Martin Graham), вышедшее в свет более двадцати лет назад, называлось «High-speed digital design» и имело подзаголовки «Начальный курс черной магии» (A Hand book of Black Magic).

Более того, после очевидного триумфа этой книги в среде профессиональных инженеров, преподавателей и студентов через десять лет этот же авторский коллектив издал вторую книгу (фактически второй том) по этой теме «High-speed design», но уже с подзаголовком «Высший курс черной магии» (Advanced Black Magic).

Конечно, авторы этих популярных книг не имели ничего общего с мистикой — это профессионалы, очень хорошо знающие и прекрасно излагающие достаточно сложные для понимания как теоретические, так и актуальные практические проблемы в области проектирования и организации производства высокоскоростных электронных устройств. Это кстати большая редкость — в мире достаточно много специалистов с глубокими теоретическими и практическими знаниями в этой сфере, но, к сожалению, очень немногие из них могут достаточно просто и понятно излагать весьма сложные материалы.

В быстродействующих цифровых схемах, составляющих основу аппаратной части современных быстродействующих электронных устройств, короткие фронты обрабатываемых и передаваемых сигналов приводят к появлению множества нежелательных эффектов — разработчики таких устройств на практике имеют дело с искаженными до неузнаваемости цифровыми сигналами, которые к тому же передаются на фоне множественных помех.

Поскольку многие из вопросов, включенных в эту книгу, ранее не рассматривались в стандартных учебных курсах, инженеры-практики часто относились к эффектам, проявляющимся в высокоскоростных цифровых устройствах, как к чему-то мистическому, поэтому в своей профессиональной среде их называли «эффектами черной магии», имея в виду, что на высоких частотах с быстродействующими устройствами происходит что-то необычное и необъяснимое.

На русском языке как первый, так и второй том этой книги появились очень быстро (практически через год после выхода оригиналов) и сразу же стали своего рода «техническими бестселлерами» в среде специалистов по высокопроизво-

дительным устройствам и системам, поскольку популярно объясняли физическую сущность этих так называемых «эффектов черной магии» и предлагали совершенно конкретные теоретические и практические технические решения, как этих «эффектов черной магии» избежать еще на этапах проектирования быстродействующих устройств и систем. Действительно, в большинстве случаев эти эффекты обычно не проявляли себя ранее в устройствах «низкой» и «средней» производительности, но с увеличением скорости обработки и скорости передачи информации они стали фактически основной преградой на пути повышения производительности разного рода информационно-коммуникационных систем.

Дополнительными достоинствами этой популярной серии из двух книг является то, что они посвящены описанию основных конструктивных, технологических, системотехнических и схемотехнических аспектов проектирования и некоторым важным практическим особенностям подготовки организации производства быстродействующей цифровой техники, работающей с тактовыми частотами от 20 МГц до 20 ГГц и более, содержат массу полезных сведений, которые ранее (и до сих пор) не излагаются в классических университетских курсах по данному предмету.

Здесь необходимо разделять проблемы обеспечения *скорости обработки* и проблемы *скорости передачи* информации, поскольку причины их возникновения и пути их решения имеют совершенно отличную природу.

Основной отличительной особенностью предлагаемой читателям книги от всех ранее опубликованных авторами в России и за рубежом научных и технических монографий является тот факт, что более 80% материалов книги не являются результатами их собственных теоретических исследований или их собственных практических разработок.

Авторы этой книги выступили здесь в качестве своего рода «системных интеграторов» имеющейся весьма обширной, но разрозненной отечественной и зарубежной технической и научной информации по различным аспектам сложной проблемы конструирования высокоскоростных электронных устройств различного назначения.

Практически их роль заключалась всего лишь в качественной систематизации, критическом анализе и обобщении сути научных, технических и практических проблем проектирования и организации производства таких систем и устройств.

Так, в результате большого объема работ, проведенных авторами совместно с привлеченными ими многими авторитетными в этой области знаний экспертами, для включения в эту книгу были отобраны из более чем 1200 источников информации около 300 публикаций, основные результаты которых и были использованы при написании этой книги.

Авторами этих публикаций являлись как простые инженеры-разработчики и линейные инженеры-технологи, не обремененные высокими научными степенями и научными званиями, так и кандидаты и доктора технических и физико-математических наук, а также члены-корреспонденты и академики.

В приложении 1 перечислены основные авторы использованных публикаций (фактические соавторы этой книги), которым авторы выражают свою искреннюю благодарность.

Необходимо сказать несколько слов и об истории создания этой книги — почему авторы взялись за решение этой тяжелой и ответственной задачи? Дело в том, что на момент написания книги по роду своей основной деятельности авторы являлись научными руководителями целого ряда больших коллективов специалистов, занимающихся проектированием и организацией производства как различного рода микросхем (коммерческого, космического и специального назначения), так и целого ряда законченных сложнофункциональных быстродействующих радиоэлектронных устройств и систем, спроектированных на этих микросхемах. Очень часто в процессе конструирования и промышленного освоения подобных приборов, устройств и систем возникали ситуации, которые разработчики объясняли своим руководителям как вышеупомянутые «эффекты черной магии». Самый простой и понятный практический пример: почему спроектированные и изготовленные микросхемы центрального процессора и оперативной памяти (ОЗУ) прекрасно работают на частотах до 100 МГц, а сконструированные с использованием этих же микросхем электронные устройства и системы могут функционировать на тактовых частотах всего лишь 10–50 МГц?

В каждом таком случае все эти «эффекты черной магии», конечно, выявлялись и исключались, что каждый раз требовало времени и средств.

Как правило, с микросхемами и платами в этих устройствах и приборах не происходило никаких мистических превращений, просто надо было глубоко понимать физические механизмы появления подобных эффектов и в процессе проектирования устройств (плат, линий передачи) исключать возможности их проявления.

Поэтому авторы поставили целью создать своего рода практическое руководство «внутрифирменного пользования» для своих разработчиков таких высокоскоростных устройств, которое бы органично дополнило высокопрофессиональные теоретические материалы книг «High-speed design».

Надо сказать, что в процессе работы над этим «практическим руководством» было получено много новых данных и новых решений, которые не были освещены в книгах «High-speed design», включая совершенно новые физические механизмы возникновения подобных «эффектов черной магии», что в итоге и послужило одной из причин написания этой книги для более широкой аудитории.

Однако, чтобы перейти от задуманного формата конкретного «внутрифирменного» практического руководства — справочника для разработчиков высокоскоростных устройств к формату профессиональной монографии, потребовалось проделать огромную работу.

Была полностью изменена первоначальная структура этого «руководства» и поставлена задача осветить основные теоретические и практические вопросы проектирования высокоскоростных устройств «по полной цепочке» — начиная от верхнего уровня иерархии высокоскоростных систем до самого нижнего уровня — базовых элементов. Верхний уровень (глава 1) — это современные информационно-коммуникационные технологии и телекоммуникационные системы (ТКС) на их основе. Следующий уровень — каналы передачи (обмена) данных между сегментами ТКС (проводные интерфейсы — глава 2 и беспроводные коммуникации — глава 3). Затем надо было обобщить имеющиеся технические решения по проблемам, методам и средствам обеспечения помехоустойчивости таких быстродействующих электронных устройств — так появилась глава 4.

А как обойтись без проблем конструирования печатных плат быстродействующих устройств — основного раздела «внутрифирменного» практического руководства-справочника? Так появилась доработанная глава 5 «Основы проектирования конструкций печатных плат».

Но существует множество конфигураций и архитектур высокоскоростных электронных устройств, направленных на решение конкретных задач, и желательно «иметь на руках» перечень оптимальных базовых элементов («кирпичиков»), на основе которых строятся эти устройства. Так появились главы 6 и 7, посвященные описанию состава, технических характеристик и особенностей применения пассивных и активных базовых компонентов (глава 6) и специализированных микросхем (глава 7).

Но при проектировании высокоскоростных электронных устройств на базе этих активных и пассивных элементов необходимо принимать специальные меры по их защите от различного рода помех. Так появилась глава 8.

Однако даже «правильно» сконструированное с учетом рекомендаций всех предыдущих глав электронное устройство не будет надежно функционировать, если «неправильно» организовать его систему электропитания. Конечно, эта проблема появилась не вчера, но особую актуальность приобрела в последнее время в связи с резким увеличением электропотребления современных высокоскоростных телекоммуникационных систем. Так появилась глава 9, посвященная особенностям проектирования систем электропитания, выбору оптимальной номенклатуры специализированных микросхем, методам подавления помех в цепях питания и важным для практического применения особенностям организации систем заземления электронной аппаратуры (конвекционные системы, «плавающая земля», защитное заземление, защитные фильтры и т.п.).

В результате эволюции конструкций высокоскоростных электронных устройств, сопровождаемой увеличением функциональных возможностей и производительности, неуклонно растет величина их удельного тепловыделения, что заставляет разработчиков создавать все новые технологии их корпусирования (микромонтажа) — от корпусирования отдельных микросхем до создания многокристальных модулей, систем на пластине, систем в корпусе и др. В последней главе 10 впервые в отечественной научно-технической литературе классифицированы и рассмотрены все известные базовые технологии корпусирования быстродействующих электронных устройств. Используя материалы этой главы, разработчик может выбрать именно ту технологию, которая в наибольшей степени будет соответствовать требованиям, предъявляемым к конструктивному оформлению разрабатываемого им электронного устройства.

В итоге пришлось решить максимальную задачу и «закрыть» основные этапы создания высокоскоростных систем по следующей алгоритмической цепи: «системы → интерфейсы → методы обеспечения помехоустойчивости → методы конструирования печатных плат → базовые компоненты быстродействующих систем → специализированные наборы микросхем для них → методы и устройства их защиты от электромагнитных помех → организация правильной системы электропитания → базовые технологии корпусирования быстродействующих электронных устройств».

Как и в предыдущих своих книгах, авторы при написании этой книги исходили из двух основных постулатов. Во-первых, будущим инженерам-разработчикам высокоскоростных электронных устройств, студентам и их преподавателям всегда необходимо иметь под рукой некий систематизированный сборник справочных материалов по таким устройствам. Во-вторых, чтобы стать достаточно популярным среди широкого круга ученых, специалистов и студентов, эта книга должна выполнять одновременно интегральные функции и классического учебника, и краткого научного практического пособия-справочника, да и просто увлекательной книги.

Еще один из таких основополагающих принципов принятой авторами концепции изложения материала – представление достаточно объемной необходимой справочной информации относительно физических механизмов и принципов работы базовых компонентов электронных устройств, но, в отличие от классических учебников с избытком математических выкладок и физических формул, попытаться максимально простым языком изложить как основные теоретические аспекты конструирования высокоскоростных электронных устройств и систем, так и основные практические моменты расчета и конструирования этих систем и устройств на уровне, доступном для понимания даже относительно «слабо подготовленным теоретически» читателем. Тем более что большинство этих математических выкладок и формул можно найти в цитируемой замечательной книге Джонсона и Грэхема.

Насколько авторам удалось реализовать эту концепцию книги – судить читателям.

Авторы выражают благодарность рецензентам – академику Национальной академии наук Беларуси и иностранному избранному члену Академии наук Российской Федерации В.А. Лабунову и д.т.н., профессору О.К. Гусеву, чьи критические замечания и полезные советы во многом способствовали появлению книги именно в этом формате, а также своим сотрудникам: Е.Н. Карташовой, С.В. Гордиенко, А.В. Силину, К.В. Гайворонскому за огромную помощь в обработке материалов и подготовке рукописи к печати.

Введение

Материал книги изложен в десяти главах, которые, в зависимости от уровня подготовки, можно читать не по порядку.

В *главе 1* кратко рассматриваются основные принципы организации и базовые компоненты телекоммуникационных систем, в которых широко используются высокоскоростные электронные устройства, являющиеся предметом рассмотрения этой книги.

Глава 2 посвящена особенностям организации проводных интерфейсов высокопроизводительных цифровых устройств обработки информации: изложены основные принципы организации и методы их расчета, рассмотрены особенности проектирования и применения наиболее часто используемых интерфейсов (RS-485, SerDes, LPVECL), быстродействующих шин памяти типа DDR, приведены рекомендации и схемотехнические решения их защиты от электрических перенапряжений.

В *главе 3*, носящей обзорный характер, рассматриваются основные тенденции, проблемы и перспективы развития беспроводных телекоммуникационных систем. Приведены основные технические характеристики и особенности всех поколений развития этого научно-технического направления: 1G, 2G, 2,5G, 3G, 3,5G, 4G и 5G.

Рассмотрены тенденции, проблемы и перспективы развития таких направлений, как «Интернет Вещей» (IoT) и «Интернет Всего», особенности организации межмашинного (M2M) взаимодействия в подобных сетях.

Особое внимание уделено состоянию, проблемам и перспективам развития технологий беспроводной связи пятого поколения (5G), рассмотрены технические решения одного из путей перехода к 5G на примере особенностей создания каналов связи с фазированными антенными решетками, использования миллиметрового диапазона волн и принципов облачного управления.

В *главе 4* подробно рассматриваются основные методы обеспечения помехоустойчивости и надежности современных высокоскоростных электронных устройств. В отличие от известной книги Хогварда Джонсона здесь подробно описаны механизмы возникновения и методы борьбы с относительно новыми для телекоммуникационных систем типами помех, в частности пассивной интермодуляцией (ПИМ) (механизмы возникновения, особенности проявления в материалах печатной платы, в полосковых, коаксиальных и волноводных линиях и др.). Предложены различные эффективные методы уменьшения уровня интермодуляционных искажений в высокоскоростных электронных устройствах.

Здесь же детально рассмотрены различные защитные СВЧ-устройства для быстродействующих электронных устройств (полупроводниковые, газоразрядные, вакуумные), а также специальные компоненты для фильтрации и подавления различных электромагнитных помех.

Глава 5 посвящена особенностям проектирования конструкций современных плат для быстродействующих электронных устройств. Разработчики современных высокоскоростных электронных устройств, просматривая оглавление книги, почти наверняка пропустят эту главу — ну что еще интересного и полезного они смогут узнать о печатных платах. Обычно они выбирают и используют многочисленные

имеющиеся на современном рынке варианты этого класса изделий и используют их только как некую физическую среду для конструктивного оформления своего проектируемого прибора (устройства, системы).

К вопросам анализа конструкции платы или используемой для ее изготовления технологии разработчики быстродействующих электронных устройств обычно обращаются только тогда, когда на практике сталкиваются с вышеупомянутыми «эффектами черной магии»: все спроектировано и отмоделировано вроде бы правильно, а на испытаниях устройство ведет себя неправильно. Производители многочисленных разновидностей печатных плат не обязаны сообщать своим потребителям без специального запроса многочисленные конструктивные и технологические особенности своих изделий, хотя зачастую именно в этих отличиях и особенностях и заключаются причины появления этих «мистических» эффектов.

В этой главе на основе анализа и обобщения уже имеющегося у разработчиков положительного и отрицательного опыта детально рассмотрен ряд конструктивных и технологических особенностей современных печатных плат, которые непосредственно связаны с надежностью функционирования высокоскоростных устройств, в которых они будут использоваться.

Кроме того, рассмотрены различные методы обеспечения целостности сигналов на платах высокоскоростных линий передачи, приведены методики, выражения и формулы для расчетов оптимальных конструкций и топологий проводников, в том числе приведены эмпирические правила для проектирования топологий плат с высокоскоростными сигналами.

Глава 6 посвящена базовым компонентам высокоскоростных электронных устройств – от пассивных компонентов (волноводы, коаксиальные линии связи, фазостабилизаторы, кабели СВЧ-диапазона, адаптеры, аттенюаторы, поглощающие фильтры, направленные ответвители, делители и сумматоры мощности, энкодеры) до особенностей проектирования радиочастотных схем, ПАВ-фильтров, МЭМС-изделий и программно-конфигурируемых радиосистем.

Глава 7 посвящена рассмотрению специализированных микросхем для быстродействующих телекоммуникационных устройств – принципы построения, основные технические характеристики и особенности применения микросхем серии SerDes, SERIC, базовые наборы микросхем трансиверов для диапазона миллиметровых волн, специализированные микросхемы для стандартного интерфейса RS-485 и высоковольтных интерфейсов LVDS и DV1.

Отдельный параграф посвящен новому стремительно развивающемуся в мире направлению СВЧ-приборов на основе технологии гетерогенной интеграции (Heterogenous Integration).

Глава 8 посвящена практическим рекомендациям по применению различных конструктивно-технологических и аппаратных методов защиты быстродействующих электронных устройств от различного рода электромагнитных помех. В рамках отдельного параграфа рассмотрены методы применения многослойных пленочных электромагнитных экранов для защиты бортовой электронной аппаратуры космической и военной техники от воздействия радиации и квазистационарных магнитных полей.

Глава 9 посвящена вопросам проектирования одной из важнейших систем – системы электропитания быстродействующих электронных устройств.

Рассмотрены основные требования к этим системам: состав, технические параметры и особенности применения специализированных микросхем (контроллеров и драйверов управления питанием, импульсных стабилизаторов напряжения, микросхем супервизоров, формирователей последовательности управляющих сигналов в цепях электропитания, специализированные микросхемы переключателей нагрузки и микросхем обеспечения «горячего режима» подключения электронной аппаратуры).

Рассмотрены различные эффективные методы подавления шумов в цепях питания быстродействующих устройств, а также особенности организации систем заземления электронной аппаратуры электроэнергетических объектов, входящих в состав телекоммуникационных систем.

Глава 10 впервые в отечественной литературе обобщает тенденции, перспективы и конкретные технические решения, используемые в мире для решения задач корпусирования (микромонтажа) быстродействующих электронных устройств различного назначения: это технологии BGA – сборки кристаллов, WLP – сборки на пластине, TSV – трехмерной (3D) сборки, особенности сборки 3D изделий на основе технологии «flip-chip».

В рамках отдельных параграфов рассмотрены технологические особенности сборки полупроводниковых СВЧ-приборов и МИС, а также специализированные радиационно-защитные конструкции корпусов микросхем.

Приведены важные для практического применения особенности использования клеев и паст при 3D-сборке, а также рекомендации по повышению надежности паяных соединений поверхностного монтажа, приведены методы оценки и характеристики полей нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации.

ГЛАВА I

ИНФОРМАЦИОННО–КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ НА ИХ ОСНОВЕ

1.1. Основные тенденции развития информационно-коммуникационных технологий

Сегодня без информационно-коммуникационных технологий и систем на их основе – телекоммуникационных систем (ТКС) невозможно представить как жизнь обычного человека, так и функционирование разнообразных современных инфраструктур, ответственных за социально-экономическое благосостояние граждан и за целый комплекс проблем, связанных с национальной безопасностью государства. ТКС (или, как часто их называют, информационно-коммуникационные технологии) проникли во все сферы жизнедеятельности человека, но наиболее активно результаты их развития используются в интересах военных и специальных ведомств.

В идущей уже длительное время тайной войне технических гениев однозначной победы только одного из участников этой «технологической гонки» быть не может – наука и техника не имеют «привязки» к национальным или географическим особенностям, для любого «оружия» всегда находится «щит», и это хорошо понимают эксперты правительств всех мировых держав.

Тем не менее, что касается ближайших и среднесрочных перспектив развития телекоммуникационных технологий во всем их многообразии, правительствами всех развитых индустриальных стран наложено негласное вето на публикации в открытой периодической научно-технической печати ключевых технических моментов концепций и перспектив дальнейшего развития этого научно-технического направления, что, в частности, можно объяснить реально ведущейся мировыми державами информационной войной Востока и Запада.

Под это вето, к сожалению, попали и технические аспекты развития перспективных информационно-коммуникационных технологий.

Конечно, на международных конференциях, симпозиумах, в научно-технической печати активно обсуждаются отдельные аспекты этой проблемы, поскольку бизнес, в том числе и в этой сфере, должен развиваться и завоевывать все новые ниши. Ведущие полупроводниковые фирмы мира очень активно работают в этом направлении, поскольку «бизнес есть бизнес».

Прежде всего, военные ведомства мировых держав-лидеров, прекрасно понимая реальное положение дел и возможные уникальные перспективы развития этого направления, финансируют в достаточно больших объемах целый ряд как отдельных проектов, так и специальных комплексных программ.

Так, например, как известно из открытых источников информации [1–9], для противодействия угрозам национальной безопасности в военной сфере и обеспечения абсолютного технологического превосходства Министерство обороны США в 2014 году приступило к реализации очередного комплекса мероприятий по инновационному развитию вооруженных сил, получившего название «инициатива в области оборонных исследований» (Defense Innovation Initiative – ДИИ), направленного на реализацию стратегии полного военного превосходства США над всеми потенциальными противниками, в первую очередь Россией и Китаем. Это уже третья по счету такая стратегия.

Первая стратегия обеспечения военного превосходства (Offset Strategy) США была основана на ядерном оружии и средствах его доставки, и, как утверждает американскими экспертами [4, 5], была успешно реализована во времена «холодной войны». В основу этой стратегии и мероприятий по ее реализации было положено первое теоретическое обоснование технологий, обеспечивающих военное превосходство (technology offset strategy), разработанное адмиралом Уильямом Перри (William J. Perry) в период, когда он был заместителем министра обороны США по НИОКР [6]. Можно считать, что периодические публикации в открытой печати отдельных элементов подобных стратегий являются своеобразным приглашением потенциальных противников США к участию в «гонке вооружений».

Вторая стратегия была основана на синергетическом эффекте от применения высокоточного оружия, космических разведывательных систем, комплексов противоракетной и противовоздушной обороны (ПРО/ПВО) и технологий снижения заметности средств вооружений и военной техники.

Основная цель реализуемой с 2014 года третьей стратегии (Third Offset Strategy) ориентирована на достижение абсолютного военного превосходства США над всеми потенциальными противниками, обладающими современными средствами противодействия (блокирования) доступу к своим или подконтрольным им территориям (Anti-access/Area Denial, A2/AD). В частности, к таким средствам A2/AD относится комплекс вооружений, включающий высокоточное оружие (ВТО), системы обороны (противовоздушной, противокосмической, противоракетной, противокорабельной, противолодочной) и средства радиоэлектронной борьбы (РЭБ).

При этом под абсолютным превосходством в этой стратегии понимается безоговорочное достижение военного успеха во всех сферах борьбы – в космосе, в воздухе, на море, на суше и в киберпространстве.

Далеко не случайным является выбор рабочего названия программы – «Быстрота». Так, в качестве основных задач стратегии выделены следующие [1, 6–9]:

- военные операции, основанные на широкомасштабном и комплексном использовании возможностей робототехнических комплексов;
- воздушные операции с применением малозаметных летательных аппаратов большого радиуса действия;
- подводная война с использованием автономных комплексов, состоящих из разнородных технических средств;
- проектирование комплексных систем ВВТ и их ускоренная интеграция в единую систему вооружения.

В рамках реализации третьей стратегии выделено пять комплексных направлений НИОКР:

- автономные машины и системы, способные к продолжительному самообучению;
- технологии взаимодействия человек – машина, обеспечивающие эффективную поддержку принятия решений;
- новые технические средства для повышения эффективности деятельности человека (военнослужащего);
- технологии взаимодействия группировок из экипажных средств ВВТ и роботов;
- полуавтономные системы оружия (вооружения), эффективно функционирующие в условиях широкомасштабного применения противником средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ).

Очевидно, что для технической реализации как вышеперечисленных основных задач, так и этих комплексных направлений НИОКР требуется использовать самые быстродействующие телекоммуникационные системы, отдельным техническим проблемам проектирования и производства которых посвящена настоящая книга.

В силу вышеизложенного из опубликованных открытых источников научно-технической информации в большинстве случаев невозможно узнать конкретные технические решения этих систем и их отдельных компонентов.

Но для рядовых технических разработчиков современных телекоммуникационных систем все эти «засекречивания» не имеют практического смысла.

Как будет показано ниже, им достаточно просто провести анализ продуктовых линеек ведущих мировых производителей элементной базы для этих систем, и можно достаточно легко «расшифровать» ключевые технические моменты всех этих секретных «концепций» и «стратегий».

Но прежде чем рассматривать ключевые технические проблемы проектирования высокоскоростных электронных устройств, лежащих в основе построения разнообразных современных телекоммуникационных систем, необходимо хотя бы кратко рассмотреть теоретические и практические основы их организации и функционирования, представленные ниже [10].

1.2. Основные принципы организации телекоммуникационных систем

В конце 90-х годов прошлого века начался процесс конвергенции двух отраслей науки и техники – информатики и связи (электросвязи), в результате которого появились так называемые информационно-коммуникационные технологии, объединяющие собственно информационные технологии и технологии связи и получившие название телекоммуникационных технологий [10]. Аппаратно-телекоммуникационные технологии реализуются *телекоммуникационными системами*.

Наиболее распространенное общее определение термина «телекоммуникационная система» (ТКС) – совокупность аппаратно- и программно-совместимого оборудования, соединенного в систему с целью передачи данных из одного места в другое. Структурная схема простейшей ТКС представлена на рис. 1.1 [10].

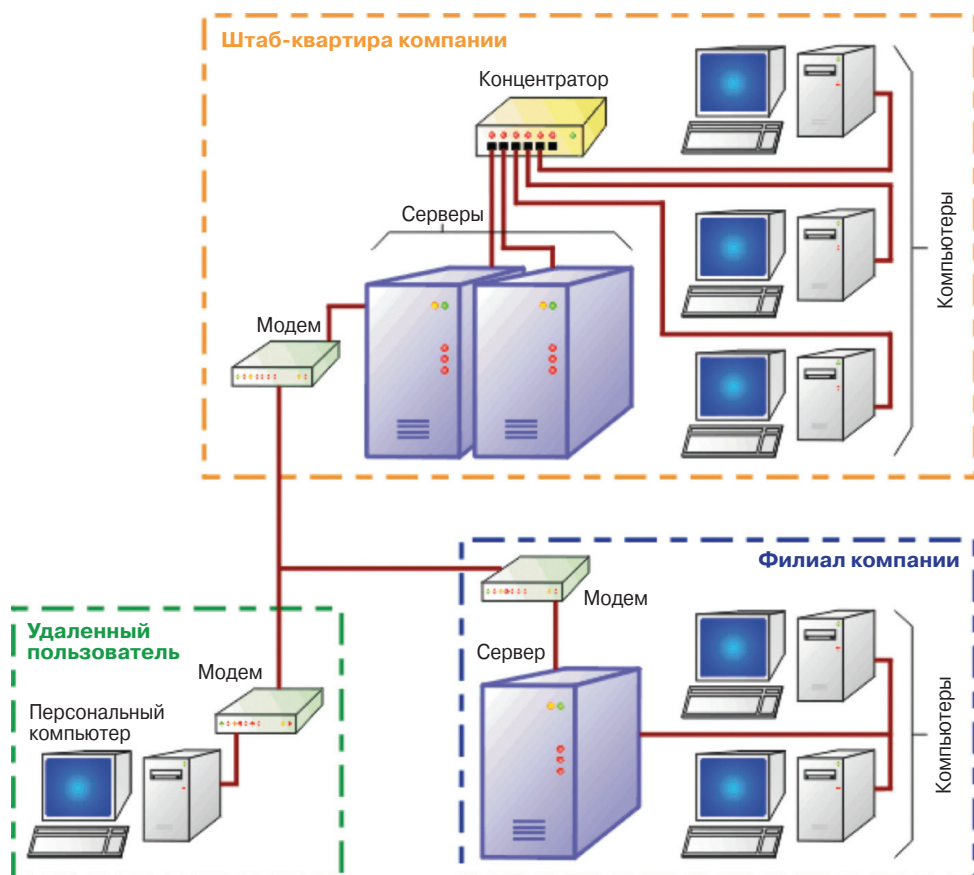


Рис. 1.1. Структурная схема простейшей телекоммуникационной системы

Любая ТКС должна быть способна передавать текстовую, графическую, голосовую или видеоинформацию, поэтому основу любой ТКС составляют каналы передачи данных, упрощенная структурная схема которых представлена на рис. 1.2 [10]. На передающей стороне компьютер пользователя формирует исходный сигнал данных, который с помощью преобразователя (модема) преобразуется в форму (аналоговую или цифровую), удобную для передачи через среду распространения. На принимающей стороне такой же модем выполняет преобразование принятых сигналов в понятные принимающему компьютеру другого пользователя сигналы. По аналогичной схеме происходит передача данных в обратном направлении к компьютеру пользователя, отправившего исходный запрос.

Рассмотрим основные компоненты стандартной коммерческой ТКС, а также на простом языке поясним, как эти отдельные компоненты работают совместно друг с другом, образуя в итоге различные виды ТКС.

В состав структуры такой типовой ТКС входит управляющее оборудование (серверы, пользовательские компьютеры, коммуникационное оборудование (каналы связи)), а также так называемое активное оборудование (различные модемы, концентраторы и ряд других).



Рис. 1.2. Упрощенная структурная схема канала передачи данных

Как видно из рис. 1.1, простейшую ТКС образуют такие основные компоненты, как:

- серверы, хранящие и обрабатывающие информацию;
- рабочие станции и пользовательские ПК, служащие для ввода запросов к базам данных, получения и обработки результатов запросов и выполнения других задач конечных пользователей информационных систем;
- коммуникационные каналы – линии связи, по которым данные передаются между отправителем и получателем информации. Важно понимать, что коммуникационные каналы используют различные типы среды передачи данных: телефонные линии, волоконно-оптический кабель, коаксиальный кабель, беспроводные и другие каналы связи;
- активное оборудование – это различные модемы, сетевые адаптеры, концентраторы, коммутаторы, маршрутизаторы и проч. Эти устройства необходимы для передачи и приема данных;
- сетевое программное обеспечение, управляющее процессом передачи и приема данных и контролирующее работу отдельных частей ТКС.

Итак, основные функции любой ТКС заключаются в реализации вроде бы самой простой функции – необходимо быстро передать информацию из пункта А и получить ее в пункте Б. Для этого ТКС нужно выполнить ряд операций, которые обычно скрыты от пользователей. Во-первых, прежде чем ТКС начнет передачу информации, ей необходимо установить надежное соединение между передающей (*sender*) и принимающей (*receiver*) сторонами, затем быстро рассчитать оптимальный маршрут передачи этих данных, выполнить процедуру первичной обработки передаваемой информации (например, необходимо проверить, что ваше сообщение передается именно тому, кому вы его отослали). Но самое главное – необходимо преобразовать скорость передачи компьютера в скорость, реально поддерживаемую линией связи.

ТКС управляет потоком передаваемой информации (трафиком), поэтому для реализации этих функций любая ТКС должна содержать разнообразные аппаратные и программные компоненты, которым жизненно необходимо работать совместно, чтобы передавать эту информацию по назначению. Эти компоненты сети должны активно «общаться» друг с другом, придерживаясь ряда специальных правил. Такой набор стандартных правил, регулирующий весь процесс подготовки и передачи данных между двумя точками сети, называется *протоколом (protocol)*. Каждое устройство в сети должно правильно «понимать» и, безусловно, выполнять протокол другого устройства.

Главные функции сетевых протоколов вроде бы очень простые: идентифицировать каждое устройство, участвующее в процессе передачи данных, быстро проверить, не нуждаются ли эти данные в повторной передаче, быстро выполнить повторную передачу, если произошла ошибка, а также целый ряд дополнительных функций, которые будут рассмотрены ниже.

Плохой «старой новостью» для разработчиков ТКС является тот факт, что многочисленные коммерческие, правительственные и компьютерные учреждения осознают необходимость введения общих стандартов для передачи данных. На момент выхода этой книги в промышленности пока нет таких стандартов.

Особый вопрос – передача сигналов по линиям связи, где поток информации в любой ТКС передается в виде электронных сигналов. Сигналы бывают двух типов: аналоговые и цифровые. Аналоговый сигнал представляет собой непрерывные колебания синусоидальной формы. Такие сигналы используются в основном при передаче голосовых сообщений.

Цифровой сигнал, в отличие от аналогового, является дискретным и имеет импульсную форму. С помощью цифровых сигналов информация передается, будучи предварительно закодированной двумя дискретными значениями сигнала: 0 и 1. Такая форма передачи данных весьма удобна при использовании компьютеров, которые понимают именно двоичную информацию. Но в большинстве коммуникационных каналов нельзя передавать цифровые данные без некоторого предварительного преобразования – все цифровые сигналы должны быть преобразованы в аналоговые, прежде чем быть переданными по каналу связи.

Одним из устройств, применяемых для преобразования сигналов, является модем (modem – MODulation/DEModulation, модуляция/демодуляция).

Модем – это устройство, преобразующее цифровые сигналы, передаваемые компьютером, в аналоговую форму. На принимающей стороне такой же модем выполняет обратное преобразование сигнала из аналоговой формы в цифровую.

Упрощенная работа простейшего модема приведена на рис. 1.3 [10]. На передающей стороне модем преобразует цифровые сигналы, идущие от компьютера, в аналоговые, которые можно дальше передавать по телефонной линии. На принимающей стороне такой же модем выполняет преобразование аналоговых сигналов в цифровые сигналы, понятные принимающему компьютеру.

При передаче данных с помощью модема в качестве каналов связи используются обычные телефонные линии.

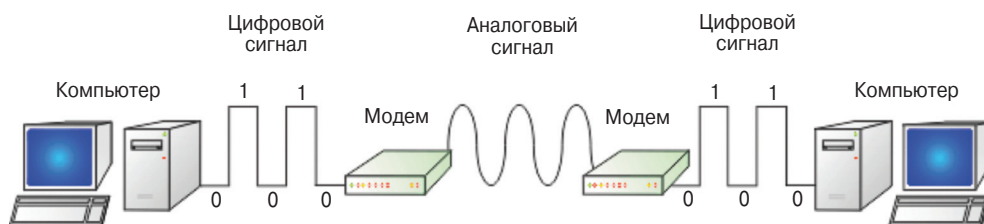


Рис. 1.3. Упрощенная блок-схема передачи данных с применением модемов

Модем не только связывает компьютер с телефонной линией, но и выполняет другую важную функцию – преобразовывает сигналы компьютера в форму, в которой их можно передавать по телефонной линии.

На передающей стороне модем преобразует цифровые сигналы в аналоговую форму, после чего они передаются по телефонной линии, а на принимающей стороне такой же модем выполняет обратное преобразование сигналов – из аналоговой формы в цифровую, понятную компьютеру.

По конструктивному исполнению модемы бывают *внешними (internal)* и *внутренними (external)*. Внешний модем обычно представляет собой небольшую коробочку, на передней панели которого расположен блок индикаторов работы устройства. На задней панели находятся два гнезда:

- для подключения кабеля, соединяющего модем с компьютером (RS-232 Interface);
- для соединения с телефонной линией (RJ-11 Interface).

Стандартный модем обычно подключается к последовательному порту компьютера. Для соединения с компьютером используется кабель стандарта RS-232. Для подключения к телефонной сети используется кабель с разъемами RJ-11.

Внутренний модем вставляется в свободный слот расширения, как любая другая карта. После этого нужно только подключить модем к телефонной сети с разъемом RJ-11.

При построении ТКС используются различные типы каналов связи. Рассмотрим кратко типы каналов связи ТКС. Следует отметить, что в общем случае *каналы связи (communications channels)* – это линии связи, по которым одно сетевое устройство передает данные другому. Такие каналы связи могут использовать различные виды среды передачи данных: витую пару, коаксиальный кабель, волоконную оптику, радио- и инфракрасные волны, спутниковые линии связи. Каждый из типов каналов связи имеет свои преимущества и недостатки, которые более подробно будут рассмотрены в последующих главах этой книги. Обычно высокоскоростные каналы более дорогие, зато по ним можно быстро передавать большие объемы данных (что снижает значение показателя цена/бит). К примеру, соотношение цена/производительность может быть для пользователя лучше в случае использования спутникового канала связи, чем при использовании выделенной линии, но при условии, что пользователь постоянно (100% времени) использует спутниковую связь. Также нужно принимать во внимание, что при использовании любой среды передачи скорость обмена данными сильно зависит от конфигурации используемого аппаратного и программного обеспечения.

Телефонные линии — наиболее распространенный вид каналов связи. В телефонных линиях в качестве среды передачи применяется двухжильный медный кабель. Существует два типа телефонных линий, по которым может осуществляться модемная связь. Первый — это каналы общедоступной *коммутируемой (dial-up)* телефонной связи. Они медленны, не очень надежны и требуют, чтобы пользователь вручную устанавливал соединения для каждого сеанса связи. Скорость передачи в таких обычных телефонных линиях невысока, от 14 до 56 Кбит/с. Тем не менее именно телефонные линии благодаря своей повсеместной распространенности до сих пор составляют основу многих сетей, в том числе мировой глобальной сети Интернет.

Другой вид телефонных линий — *арендуемые*, или так называемые *выделенные (dedicated) линии*. От обычных телефонных линий их отличает то, что такой канал используется только для организации связи между двумя определенными пунктами. В случае использования такой выделенной линии обычно нет необходимости набирать номер абонента, с которым вы хотите связаться, — у вас с ним проведена прямая линия связи, которая всегда к вашим услугам. Качество связи по такой выделенной линии всегда выше, чем связь по коммутируемой телефонной линии. При этом скорость передачи в выделенных линиях несколько выше — от 64 до 512 Кбит/с. Экономический аспект — обычно владелец выделенной линии платит за ее использование некоторую постоянную сумму. Но нужно учитывать, что использовать такой выделенный канал обычно можно только для передачи цифровых данных, для других целей (например, для голосовой связи) он не подходит.

При использовании выделенной линии набирать номер не нужно, так как существует прямой канал связи между абонентами.

Среди других типов каналов связи следует отметить различные виды коаксиальных кабелей, кабель «витая пара», различные виды волоконно-оптических кабелей, микрополосковые линии и др. Более подробно эти и другие типы каналов связи будут рассмотрены детально в других разделах. Здесь кратко будут рассмотрены только основные типы.

Коаксиальный кабель (coaxial cable), используемый в телекоммуникационных сетях, очень похож на тот, который применяется в телевидении. Его конструкция содержит одну медную жилу в изоляции и металлической оплетке, выполняющей функцию экрана. Этот экран необходим для защиты от помех, что позволяет использовать этот тип кабеля передачи сигналов на большие расстояния, в отличие от кабеля типа «витая пара». Этот вид кабеля нашел широкое применение в локальных сетях типа Ethernet, хотя с 2010 года коаксиальный кабель постепенно выходит из употребления, главным образом из-за высокой стоимости и относительно небольшой скорости передачи данных (10–20 Мбит/с).

Кабель типа «витая пара» (twisted pair) содержит уже не одну, а несколько пар медных проводов и наиболее распространен в локальных сетях, поскольку многие новые здания в России строятся с заранее готовой кабельной системой, в которой используется кабель «витая пара». Следует отметить, что имеющиеся в конструкции свободные линии связи могут быть успешно применены в других целях (например, для голосовой связи или сигнализации). Скорость передачи данных в сетях, где используется кабель «витая пара», составляет от 10 до 100 Мбит/с. Здесь чаще всего применяется кабель типа UTP5 (Unscrewed Twisted Pair — неэкранированная витая

пара, категория 5). В тех случаях, когда необходима повышенная защита данных от помех (например, от сильных электромагнитных полей), разработчики применяют экранированную витую пару. Кабель типа «витая пара» широко применяется в локальных сетях, создаваемых на основе технологий Ethernet и Fast Ethernet.

Волоконно-оптический (fiber optic) кабель содержит тысячи стекловолокон, каждое из которых тоньше человеческого волоса. Для передачи данные преобразуются не в привычные нам электрические сигналы, а в специальные световые импульсы, которые передаются по оптоволокну с помощью лазерного устройства со скоростью от 500 Кбит до нескольких гигабит в секунду. С одной стороны, волоконно-оптические линии связи значительно быстрее, легче и намного прочнее, чем медные провода; поэтому волоконная оптика используется в качестве каналов связи в тех системах, где нужно быстро передавать большие массивы данных. Но с другой стороны, волоконно-оптический кабель требует больших финансовых затрат при прокладке, кроме того, он более дорог. Его лучше всего использовать для прокладки магистральных линий (backbone), а для подключения к сети компьютеров пользователей применять более дешевую витую пару. Оптоволоконный кабель находит применение и в локальных сетях, где требуется высокая степень защиты данных от несанкционированного использования (например, в банках), так как подключиться к оптоволокну с целью перехвата данных невозможно.

Беспроводные каналы связи, использующие в качестве среды передачи радио- или инфракрасные волны, не осуществляют прямой физический контакт с передающими и принимающими устройствами, поэтому такие каналы связи являются главной альтернативой контактным способам передачи данных на основе телефонных линий, витой пары и оптоволокну. Наиболее часто используемые сегодня устройства беспроводной передачи данных — сотовые телефоны, смартфоны, радиотелефоны, системы спутникового телевидения, системы микроволновой связи. К устройствам беспроводной связи также относятся пульты дистанционного управления различными бытовыми устройствами и другие системы инфракрасной (ИК) связи. Ниже мы рассмотрим только те технологии, которые применяются в телекоммуникационных сетях передачи данных, а именно системы радиосвязи, спутниковой связи, а также ИК-устройства.

К *системам микроволновой радиосвязи (microwave systems)* относятся в основном наземные радиорелейные линии, которые в телекоммуникационных системах используются для передачи больших объемов информации между двумя пунктами. Здесь микроволновые сигналы распространяются в пространстве по прямой линии, что ограничивает дальность передачи 40–50 км из-за кривизны земной поверхности. Еще один существенный недостаток этих систем — зависимость от погодных условий.

Спутниковые системы связи (satellite communication systems) лишены недостатков, присущих радиорелейным линиям, поскольку здесь сигналы передаются с наземной станции на спутник, который служит ретранслятором. В качестве принимающего устройства применяется обычная параболическая антенна. Спутники связи весьма эффективны по стоимости при передаче больших массивов данных на большие расстояния, поэтому системы связи этого типа используются в больших, географически распределенных организациях, а также там, где нельзя применить кабельные или

радиорелейные линии связи. Характерный пример: сеть аптек Rite Aide использует системы спутниковой связи для организации быстрой двусторонней связи между региональными складами и корпоративным мейнфреймом, расположенным в Кэмп-Хилле (Camp Hill), Пенсильвания. В каждом складе установлен специальный сервер, который обслуживает кассовые аппараты, локальную сеть компьютеров работников аптек и менеджеров, а также проверяет наличие необходимых препаратов и оборудования. Этот сервер может быстро связаться с мейнфреймом через спутник для передачи отчетов о продажах, для получения доступа к базе данных компании, для составления расписания и т.п.

Особо следует отметить системы доступа к Интернету, базирующиеся на использовании систем спутниковой связи. Поскольку передающее оборудование стоит довольно дорого, многие компании используют системы DirecPC, где в качестве приемных устройств используют спутниковые антенны, а передают информацию от пользователей в Интернете по обычным наземным каналам связи.

Следует отметить, что если обычные спутники связи находятся на стационарных орбитах на высоте примерно 35 км над Землей, то новые низкоорбитальные спутники (low-orbit satellites) работают на орбитах, максимально приближенных к земной поверхности, что позволяет им принимать сигналы даже от маломощных передатчиков. При этом такие спутники (микро- и наноспутники) потребляют меньше энергии, а их запуск и эксплуатация обходится значительно дешевле традиционных спутниковых систем связи. Использование низкоорбитальных спутников делает возможным пользоваться услугами связи, находясь в любой точке земного шара.

Если говорить о системах *инфракрасной (ИК) связи (infrared/IR-/systems)*, то она используется, как правило, в небольших офисах для организации беспроводной связи между различными устройствами, например для связи компьютера с принтером или соединения в локальную сеть от двух до шести компьютеров, находящихся друг от друга на небольшом расстоянии (1–8 м). Эти системы находят применение в мобильных офисах, когда нет необходимости или возможности прокладывать кабель. Сети, построенные на базе систем ИК-связи, быстро разворачиваются и настраиваются, но имеют низкую скорость передачи данных и не очень надежны.

Характеристики выбранного разработчиком ТКС канала связи определяют эффективность и возможности ТКС. К основным таким характеристикам относятся скорость передачи, направление, в котором следуют сигналы, а также режим передачи.

Для передачи сигналов вышеперечисленными международными организациями разработаны определенные стандарты режимов передачи, именуемые *соглашениями (conventions)*, придерживаться которых необходимо всем устройствам, работающим в сети. Так, например, при *асинхронной передаче (asynchronous transmission)* по каналу связи в каждый момент времени передается один символ (8 бит). В начало каждого такого символа помещается стартовый бит (start bit), а в конец – стоповый бит (stop bit) и бит паритета (parity bit) [10]. Асинхронная передача используется при эксплуатации низкоскоростных каналов связи, например обычных телефонных линий.

При асинхронном методе данные передаются последовательным потоком. Здесь каждый символ – это буква, число или знак раскладываются в последовательность битов (bits). Каждая из этих последовательностей отделяется от других стартовым битом (start bit) и стоповым битом (stop bit).

При приеме данных при асинхронной передаче принимающий компьютер использует стартовый и стоповый биты для управления синхронизацией, готовясь тем самым к приему следующего байта данных. Связь этого типа не синхронизируется. Передающий компьютер просто посылает данные. Получающий компьютер принимает данные и проверяет их, чтобы убедиться, что данные приняты без ошибок.

Конечно, вероятность появления ошибок при такой передаче не исключена, поэтому при асинхронной связи всегда осуществляется так называемый «контроль четности информации», для чего используется специальный бит – бит четности (*parity bit*). Он используется для контроля ошибок. При контроле четности количество посланных и принятых отдельных битов должно совпадать. Если это количество совпадает, то данные приняты правильно. Если не совпадает, автоматически следует запрос на повторную передачу данных.

Синхронная связь основана на схеме синхронизации, согласованной между двумя устройствами, в которой передающий модем выделяет специальные биты из группы данных и посылает их блоками, которые называют *кадрами (frames)*. Для установки синхронизации и периодической проверки ее правильности используются специальные символы. При синхронной передаче (*synchronous transmission*) за определенный временной интервал передается несколько символов, но вначале сеанса связи устройства, осуществляющие прием и передачу данных, синхронизируют работу своих электронных схем. Поскольку стартовые и стоповые биты для синхронной связи не нужны, то здесь передача идет быстрее. Синхронную связь используют при эксплуатации быстрых телекоммуникационных каналов – выделенных линий и др.

Передача завершается в конце одного кадра и начинается вновь на следующем кадре. Конечно, этот метод более эффективен, чем асинхронная передача. При этом синхронная связь требует меньше проверочной информации и поэтому работает быстрее.

В случае выявления ошибки синхронная схема распознавания и коррекции ошибок просто повторяет передачу кадров.

Скорость передачи характеризует, как быстро информационные биты были переданы в коммуникационный канал. При этом суммарное количество информации, которое может быть передано через коммуникационный канал, измеряется в *битах в секунду (bits per second, BPS)*.

Иногда применяется другая единица измерения скорости передачи – *бод (baud rate)*. Бод – это двоичное событие, отражающее изменение сигнала с плюса на минус или наоборот. Надо понимать, что скорость передачи в бодах не всегда равна скорости в битах в секунду. На высоких скоростях, а также в случае применения современных методов сжатия данных за время изменения сигнала с плюса на минус может быть передано больше одного бита информации. Поэтому скорость в битах в секунду обычно больше, чем в бодах.

Процедура *сжатия данных (compression)* значительно уменьшает время, необходимое для передачи данных (за счет удаления избыточных элементов или пустых участков).

Следует отметить и такой момент – так как за время изменения фазы сигнала (или за цикл, *cycle*) может быть передан один или несколько битов в секунду, то производительность любого канала связи зависит от частоты, на которой канал по-

зволяет передавать данные (частота измеряется в герцах (hertz)). Диапазон частот, который имеет тот или иной канал связи, называется *полосой пропускания (bandwidth)*. Таким образом, полоса пропускания — это разность между самой высокой и самой низкой частотами, на которых канал связи может передавать данные. Чем выше диапазон частот, тем больше полоса пропускания, тем производительнее канал связи. В табл. 1.1 приведен сравнительный анализ таких показателей, как скорость передачи и стоимость для наиболее распространенных телекоммуникационных каналов [10].

Таблица 1.1. Скорость передачи и стоимость каналов для стандартных линий передачи

Канал связи	Скорость	Стоимость
Телефонная линия	14,4 KBPS – 56,6 KBPS	Невысокая
Выделенная линия	28,8 KBPS – 256 KBPS	Невысокая
Коаксиальный кабель	10 MBPS – 20 MBPS	Невысокая
Радиорелейная линия	256 KBPS – 100 MBPS	Невысокая
Витая пара	10 MBPS – 100 MBPS	Высокая
Спутниковый канал	256 KBPS – 100 MBPS	Высокая
Волоконная оптика	500 KBPS – 10 GBPS	Высокая

Примечание к табл. 1.1:

- KBPS – kilobits per second – килобит в секунду;
- MBPS – megabits per second – мегабит в секунду;
- GBPS – gigabits per second – гигабит в секунду.

При передаче данных обычно принимается во внимание направление, в котором может следовать в канале связи поток данных. В системах *симплексной связи (simplex transmission)* данные всегда могут передаваться только в одном направлении. *Полудуплексная связь (half-duplex transmission)* позволяет передавать данные в двух направлениях; но в каждый момент времени устройства могут только передавать или только принимать данные. Системы *полнодуплексной связи (full-duplex transmission)* могут одновременно передавать и принимать данные.

К *сетевому оборудованию* относятся устройства, обеспечивающие передачу и прием сетевого трафика (поток данных, передающийся через канал связи (network traffic)), а также связь одних ТКС с другими. Основные устройства, входящие в данную группу, — это модемы, сетевые адаптеры, концентраторы, репитеры, мосты, маршрутизаторы и шлюзы. С модемами вы уже знакомы, поэтому кратко рассмотрим назначение остальных устройств.

Сетевой адаптер — это устройство, с помощью которого компьютер, работающий в сети, может передавать и получать данные. Существует несколько видов сетевых адаптеров, самыми распространенными из которых являются *сетевые карты (network cards)*.

При создании крупных сетей часто приходится прокладывать кабель на большие расстояния. При этом нужно учитывать, что в длинном сегменте кабеля может произойти *затухание (signal damping)*, т.е. искажение формы сигнала, что влечет искажение передаваемой информации. Чтобы этого не происходило, применяют *репитеры (repeaters)* — специальные повторители, усиливающие сигнал и восстанавливающие его форму.

В некоторых видах линий передачи сигналов (например, на основе витой пары) необходимо применять специальные согласующие устройства, которые связывают все компьютеры с сетевыми адаптерами в один узел и осуществляют передачу данных в пределах этого узла. К таким устройствам относятся так называемые *концентраторы (hubs)*.

Часто бывает необходимо соединить между собой две или несколько сетей. Для этих целей применяют мосты, маршрутизаторы и шлюзы.

Мост (bridge) – это устройство, соединяющее две или несколько сетей одного типа. По своему действию мосты похожи на ретрансляторы, но, в отличие от последних, могут фильтровать данные, т.е. передавать в другие сегменты или сети только часть трафика, что снижает нагрузку каналов связи.

Маршрутизаторы (routers) служат для организации связи между сетями и передачи данных по оптимальным маршрутам. Чаще всего маршрутизатор – это специализированный компьютер, который имеет собственный процессор для расчета путей передачи данных, а также память для хранения базы данных маршрутов и характеристик каналов связи. По сравнению с мостом маршрутизатор обеспечивает больший контроль над путями и большую защиту передаваемых данных, однако установить, настроить и эксплуатировать его гораздо сложнее.

Шлюз (gateway) – это устройство, выполняющее преобразование передаваемых данных из одного формата в другой. Шлюз может быть программным (например, шлюз электронной почты) или аппаратным, например для связи сети на основе витой пары с сетью на базе волоконной оптики.

Хост (host) – любой компьютер, подключенный к ТКС.

Телекоммуникационное программное обеспечение (telecommunications software) – это специальное ПО, используемое для управления и поддержки работы телекоммуникационной сети. Это ПО устанавливается на хосты и активное оборудование сетей. Основные функции телекоммуникационного программного обеспечения – управление сетью, контроль доступа к данным, контроль передачи данных, обнаружение и коррекция ошибок передачи, а также защита данных. Некоторые функции управления и мониторинга сетей выполняют операционные системы компьютеров.

1.3. Из истории развития высокоскоростных сетей передачи данных

Анализируя исторический опыт создания и развития сетевых технологий высокоскоростной передачи информации, следует отметить, что главным фактором, который обусловил появление этих технологий, является создание и развитие средств вычислительной техники [10]. В свою очередь, стимулом к созданию средств вычислительной техники (электронных компьютеров) стала Вторая мировая война. Для расшифровки закодированных сообщений немецких агентов английскими специалистами требовалось огромное количество вычислений, и их нужно было произвести непосредственно после получения радиоперехвата. Поэтому британское правительство в то время основало секретную лабораторию для создания специ-

ального электронного компьютера под названием COLOSSUS, в создании которой принимал участие знаменитый британский математик Алан Тьюринг. В результате этой работы был создан первый в мире электронный цифровой компьютер.

Можно сказать, что Вторая мировая война повлияла на развитие компьютерной техники и в США. Армии нужны были таблицы для стрельбы, которые использовались при нацеливании тяжелой артиллерии. Так, в 1943 году Джон Моушли и его студент Дж. Преспер Экерт начали конструировать электронный компьютер, который назвали ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer – электронный цифровой интегратор и калькулятор). Он состоял из 18 000 электровакуумных ламп и 1500 реле. Этот монстр весил около 30 тонн и потреблял 140 киловатт электроэнергии. У машины было всего лишь 20 регистров, каждый из которых мог содержать только 10-разрядное десятичное число.

После войны Моушли и Экерту позволили организовать школу, где они рассказывали о своей работе коллегам-ученым, после чего вскоре и другие исследователи взялись за конструирование подобных электронных вычислительных машин. Вторым рабочим компьютером был EDS AC (1949 год), который сконструировал Морис Уилкс в Кембриджском университете. Далее появился JOHNIAC – в корпорации Rand, ILLIAC – в Университете Иллинойса, MANIAC – в лаборатории Лос-Аламоса, WEIZAC – в Институте Вайцмана в Израиле и многие другие.

Воодушевленные полученным результатом Экерт и Моушли вскоре начали работу над машиной EDVAC (Electronic Discrete Variable Computer – электронная дискретная параметрическая вычислительная машина), затем последовала разработка UNIVAC (первая электронная серийная вычислительная машина). В 1945 году к их работе был привлечен Джон фон Нейман, создавший, как мы знаем, основные принципы работы современной вычислительной техники. Поскольку фон Нейман осознал, что создание компьютеров с большим количеством переключателей и кабелей требует длительного времени и очень утомительно, то он пришел к мысли, что программа должна быть представлена в памяти компьютера в цифровой форме вместе с данными. Он также отметил, что десятичная арифметика, используемая в машине ENIAC, где каждый разряд представлялся 10 электронными лампами (1 лампа включена, 9 ламп выключены), должна быть заменена бинарной арифметикой. В итоге новая машина фон Неймана состояла из пяти основных частей: памяти – RAM, процессора – CPU, вторичной памяти – магнитные барабаны, ленты, магнитные диски, устройства ввода – чтение с перфокарт, устройства вывода информации – принтер. Именно необходимость передавать данные между частями такой ЭВМ послужила впоследствии стимулом развития высокоскоростной передачи данных и организации современных компьютерных сетей.

Официальной датой рождения советской вычислительной техники следует считать, видимо, конец 1948 года [3]. Именно тогда в секретной лаборатории в местечке Феофания под Киевом под руководством Сергея Александровича Лебедева (в то время директора Института электротехники АН Украины и по совместительству руководителя лаборатории Института точной механики и вычислительной техники АН СССР) начались работы по созданию малой электронной счетной машины (МЭСМ) [10]. Лебедевым были выдвинуты, обоснованы и реализованы (незави-

симо от Джона фон Неймана) принципы ЭВМ с хранимой в памяти программой. В 1953 году коллективом, возглавляемым С.А. Лебедевым, была создана первая большая ЭВМ – БЭСМ-1 (большая электронная счетная машина), выпущенная в одном экземпляре. Она создавалась уже в Москве, в Институте точной механики (ИТМ) и Вычислительном центре АН СССР, директором которого и стал С.А. Лебедев, а собрана была на Московском заводе счетно-аналитических машин (САМ). Параллельно шла работа в подмосковном Специальном конструкторском бюро № 245, которым руководил М.А. Лесечко, основанном также в декабре 1948 года приказом И.В. Сталина. В 1950–1953 годах коллектив этого конструкторского бюро, но уже под руководством Ю.Я. Базилевского разработал цифровую вычислительную машину общего назначения «Стрела» с быстродействием в 2000 операций в секунду. Эта машина выпускалась до 1956 года, а всего было сделано семь экземпляров. Таким образом, «Стрела» была первой промышленной ЭВМ, МЭСМ, БЭСМ существовали в то время всего в одном экземпляре. В результате в 1953 году серьезные вычислительные задачи для нужд обороны страны, науки и народного хозяйства можно было решать на трех типах вычислительных машин – БЭСМ, «Стрела» и М-2.

Первоначально для передачи данных между компьютерами использовались перфоленты и перфокарты, затем магнитные ленты и съемные магнитные диски. В дальнейшем появилось специальное математическое обеспечение (софт) – операционные системы, позволяющие многим пользователям с различных терминалов пользоваться одним процессором, одним принтером. При этом терминалы большой машины (мейнфрейм) могли быть удалены от нее на весьма ограниченное расстояние (до 300–800 м). С развитием операционных систем появилась возможность присоединять терминалы к мейнфреймам при помощи телефонных сетей общего пользования с увеличением числа терминалов и соответствующих расстояний. При этом никаких общих стандартов не существовало. Каждый производитель больших компьютеров разрабатывал свои правила (протоколы) присоединения, и, таким образом, выбор производителя и технологии передачи данных для пользователя становился пожизненным.

Появление интегральных микросхем с низкой стоимостью привело к тому, что компьютеры стали меньше по размерам, доступнее по цене, мощнее и специализированнее. Компании уже могли позволить себе иметь несколько компьютеров, предназначенных для различных подразделений и задач и выпущенных различными производителями. В связи с этим появилась новая задача: соединение групп компьютеров между собой (Interconnection). Самыми первыми компаниями, которые эти «островки» соединили, были IBM и DEC. Протоколом системы передачи данных у DEC был DECNET, который сегодня уже не применяется, а у IBM – SNA (System Network Architecture – первая сетевая архитектура передачи данных для компьютеров серии IBM 360). Однако компьютеры одного производителя все еще ограничивались соединением с себе подобными. При присоединении компьютеров другого производителя использовалась программная эмуляция для имитации работы нужной системы.

В 60-х годах прошлого века правительство США поставило задачу обеспечения передачи информации между компьютерами различных организаций и осуществило

весьма значительное для того времени финансирование разработки стандартов и протоколов обмена информацией. За реализацию поставленной задачи взялось ARPA — агентство по исследованиям министерства обороны США. В результате удалось разработать и внедрить первую компьютерную сеть ARPANET, с помощью которой в итоге были соединены федеральные организации США. В этой сети были внедрены протоколы TCP/IP и первая технология связи сегментов сетей министерства обороны США (DoD), известная сегодня как сеть Internet — Интернет.

Появившиеся в 1980-х годах персональные компьютеры стали объединять в локальные сети (LAN — Local Area Network).

Постепенно появляется все больше производителей оборудования и соответственно математического обеспечения (МО), проводятся активные разработки в области взаимодействия оборудования различных производителей. В настоящее время сети, включающие оборудование и МО различных производителей, называют гетерогенными сетями (разнородными). Необходимость «понимать» друг друга приводит к необходимости создания не корпоративных правил передачи данных (например, SNA), а общих для всех. Появляются организации, создающие стандарты передачи данных, определяются правила, по которым могут работать частные клиенты, телекоммуникационные компании, правила объединения гетерогенных сетей. К таким международным стандартизирующим организациям относятся, например:

- ИТУ-Т (МСЭ-Т — сектор стандартизации электросвязи международного союза электросвязи, преемник МККТТ);
- IEEE (институт инженеров электротехники и электроники);
- ISO (международная организация по стандартизации);
- EIA (альянс отраслей электронной промышленности);
- TIA (ассоциация телекоммуникационной промышленности).

Параллельно не прекращали разработки и отдельные частные компании (например, компания Xerox разработала технологию Ethernet, а компания CISCO — технологию 1000Base-LH и MPLS).

С удешевлением технологий организации и компании получили возможность объединять свои компьютерные островки, находящиеся на различном удалении (в разных городах и даже на континентах), в свою частную — *корпоративную — сеть*. Такая корпоративная сеть может строиться на основе международных стандартов (ИТУ-Т) или стандартов одного производителя (IBM SNA).

Наконец, при дальнейшем развитии высокоскоростной передачи данных стало возможным объединять в одну сеть различные организации и подключать к ней не только членов какой-то одной компании, а любое лицо, выполняющее определенные правила доступа. Такие сети стали называть глобальными. Заметим, если корпоративная сеть — это сеть, которая не является открытой для любого пользователя, то *глобальная сеть*, напротив, открыта для любого пользователя.

В настоящий момент практически все сети являются гетерогенными, хотя основная информация обычно рождается в корпоративных сетях. Основные объемы информации циркулируют там же. Отсюда истекает очевидная необходимость их изучения и умения создавать такие сети.

1.4. Стандартные протоколы функционирования телекоммуникационных систем

Как известно, в 1977 году Международная организация по стандартизации (МОС, ISO), состоящая из представителей индустрии информационных и телекоммуникационных технологий, создала специальный комитет по разработке коммуникационных стандартов в целях обеспечения универсального взаимодействия программных и аппаратных средств множества производителей. Результатом его работы стала так называемая эталонная модель взаимодействия открытых систем (ЭМВОС). Эта модель определяет уровни взаимодействия в компьютерных сетях, описывает функции, которые выполняются каждым уровнем, как показано в табл. 1.2 [10].

Таблица 1.2. Основные уровни взаимодействия в сети в соответствии с ЭМВОС (OSI)

7	Прикладной (или уровень приложения, Application)
6	Представительный (или уровень представления, Presentation)
5	Сеансовый (или уровень сессии, Session)
4	Транспортный (Transport)
3	Сетевой (Network)
2	Канальный (или уровень звена данных, Data Link)
1	Физический (Physical)

Поскольку различные современные компьютеры имеют различные скорости обработки и передачи данных, различные форматы данных, различные типы разъемов, разные способы хранения данных, доступа к данным (методы доступа), разные операционные системы и разную организацию постоянной и оперативной памяти, то у любого разработчика ТКС возникает масса проблем их соединения в одну систему. Все эти проблемы классифицировали и распределили по функциональным группам – так называемым уровням ЭМВОС (табл. 1.3).

Как правило, эти уровни организуются в виде отдельного вертикального стека (рис. 1.4). Здесь каждый уровень выполняет свою специфическую группу близких функций, требуемых для организации связи компьютеров. В реализации более примитивных функций он полагается на нижележащий уровень (пользуется его услугами) и не интересуется подробностями этой реализации. Кроме того, каждый такой нижестоящий уровень предлагает свои услуги вышестоящему уровню.

Рассмотрим более подробно алгоритм работы на уровне пользователя. Пусть прикладной процесс пользователя, который выполняется в оконечной системе «А», обращается с запросом к прикладному уровню (Application), например к файловой службе. На основании этого запроса программное обеспечение прикладного уровня формирует сообщение стандартного формата, которое обычно состоит из заголовка (header) и поля данных. Заголовок содержит служебную информацию, которую надо передать через сеть прикладному уровню другого компьютера (оконечная система «В»), чтобы сообщить ему, какие действия требуется выполнить. Например, заголовок должен содержать информацию о местонахождении файла и о типе операции, которую необходимо над ним выполнить. Поле данных может быть пустым или содержать какие-либо данные, например те, которые надо записать в удаленный файл.

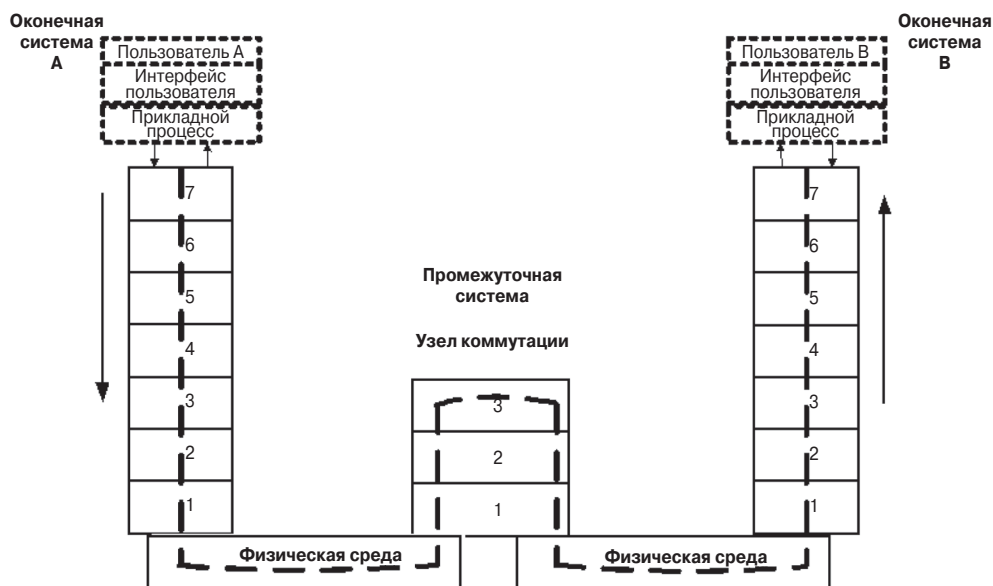


Рис. 1.4. Архитектура процессов в сети в соответствии с ЭМВОС

Для того чтобы доставить эту информацию по назначению, предстоит решить много задач. Но за них несут ответственность другие нижележащие уровни.

Это сформированное сообщение прикладной уровень направляет вниз по стеку *представительному уровню (Presentation)*. Программный модуль представительного уровня на основании информации, полученной из заголовка прикладного уровня, выполняет требуемые действия и добавляет к сообщению свою служебную информацию — заголовок представительного уровня, в котором содержатся указания для модуля представительного уровня компьютера-получателя. Сформированный блок данных передается вниз по стеку *сеансовому уровню (Session)*, который, в свою очередь, добавляет свой заголовок, и т.д. Когда сообщение достигает нижнего *физического уровня (Physical)*, оно «обрастает» заголовками всех уровней. Физический уровень обеспечивает передачу сообщения по линии связи, т.е. через физическую среду передачи.

Когда сообщение наконец поступает на компьютер-получатель, оно принимается физическим уровнем и последовательно перемещается вверх по стеку с уровня на уровень. При этом каждый уровень анализирует и обрабатывает свой заголовок, выполняет свои функции, затем удаляет этот заголовок и передает оставшийся блок данных смежному вышележащему уровню.

Так вот, эти правила (спецификации), по которым взаимодействуют компоненты систем, называются протоколами. В вышеприведенной модели ЭМВОС различают два основных типа протоколов. В *протоколах с установлением соединения (connection-oriented network service)* перед обменом данными отправитель и получатель (сетевые компоненты одного уровня в удаленных системах) должны сначала установить логическое соединение и, возможно, выбрать протокол, который будут использовать. После завершения диалога они должны разорвать соединение.

В протоколах без предварительного установления соединения (*connectionless network service*) отправитель просто передает данные. Эти протоколы также называются *дейтаграммными*.

Иерархически организованный набор протоколов, достаточный для организации взаимодействия узлов в сети, называется «стек коммуникационных протоколов».

Для обозначения блока данных, с которым имеют дело модули определенного уровня, в модели ЭМВОС используется общее название «протокольный блок данных» (Protocol Data Unit, PDU). В то же время блок данных определенного уровня имеет и специальное название (табл. 1.3) [10].

Таблица 1.3. Уровни ЭМВОС и протокольные блоки данных

7	Прикладной	Сообщение (Message)
6	Представительный	Пакет (Packet)
5	Сеансовый	Пакет (Packet)
4	Транспортный	Пакет (Packet) Сегмент (Segment)
3	Сетевой	Пакет (Packet) Дейтаграмма (Datagram)
2	Канальный	Кадр, фрейм (Frame)
1	Физический	Бит (Bit)

Кратко рассмотрим основные функции, отнесенные к разным уровням ЭМВОС, приведенным в табл. 1.3.

Так, *физический уровень* обеспечивает передачу потока бит в физическую среду передачи информации. В основном он определяет только конкретную спецификацию на кабель и разъемы, т.е. только механические, электрические и функциональные характеристики сетевой среды и интерфейсов.

На этом уровне определяется общее количество задействованных устройств, основные механические параметры – количество пинов (тип разъема), электрические параметры (напряжение, длительность единичного импульса сигнала), функциональные параметры (для чего используется каждый пин сетевого разъема, как устанавливается начальное физическое соединение и как оно разрывается).

Типовыми примерами практической реализации таких протоколов физического уровня являются широко известные RS-232, RS-485, RS-449, RS-530 и множество спецификаций МСЭ-Т серий V и X (например, V.35, V.24, X.21).

Если же говорить о *канальном уровне*, то здесь биты организуются уже в группы (фреймы, кадры). Кадр – это блок информации, имеющий логический смысл для передачи от одного компьютера другому. Каждый кадр снабжается адресами физических устройств (источника и получателя), между которыми он пересылается.

Протокол канального уровня локальной сети обеспечивает процедуру доставки кадра между любыми узлами (node) этой сети. Если в локальной сети используется разделяемая среда передачи, протокол канального уровня выполняет проверку доступности этой среды передачи, т.е. реализует определенный метод доступа в канал передачи данных.

В глобальных сетях, которые редко обладают «регулярной» топологией, канальный уровень обеспечивает обмен кадрами только между соседними в сети узлами, соединенными индивидуальной линией связи.

Кроме пересылки кадров с необходимой синхронизацией, канальный уровень выполняет также контроль ошибок, контроль соединения и управление потоком данных. Начало и конец каждого кадра обозначаются специальной битовой последовательностью (например, флаг – 01111110). Каждый кадр содержит контрольную последовательность, которая позволяет принимающей стороне обнаруживать возможные ошибки. Канальный уровень может не только обнаруживать, но и исправлять поврежденные кадры за счет повторной передачи.

В «заголовке» канального уровня обычно содержится подробная информация об адресах взаимодействующих устройств, типе кадра, длине кадра, информация для управления потоком данных и сведения о протоколах вышестоящего уровня, принимающих пакет, размещенный в кадре.

Сетевой уровень – один из сложных для реализации. Основной задачей этого уровня является передача информации по сложной сети, состоящей из множества островков (сегментов), где внутри сегментов могут использоваться совершенно разные принципы передачи сообщений между конечными узлами и другими абонентами – компьютерами. Такую сеть, состоящую из многих сегментов, мы сегодня называем Интернет.

Наконец, передача данных (пакетов) между отдельными сегментами сети выполняется при помощи *маршрутизаторов* (*router, роутер*) (рис. 1.5). Можно представить себе маршрутизатор как устройство, в котором функционируют два процесса. Один из них обрабатывает входящие пакеты и выбирает для них по таблице маршрутизации исходящую линию. Второй процесс отвечает за заполнение и обновление таблиц маршрутизации и определяется алгоритмом выбора маршрута. В свою очередь, алгоритмы выбора маршрута можно разбить на два основных класса: адаптивные и неадаптивные. Неадаптивные алгоритмы (статическая маршрутизация) не учитывают конкретную топологию и текущее состояние сети и не измеряют трафик на линиях связи. Список маршрутов загружается в память маршрутизатора заранее и не изменяется при любом изменении состояния сети.

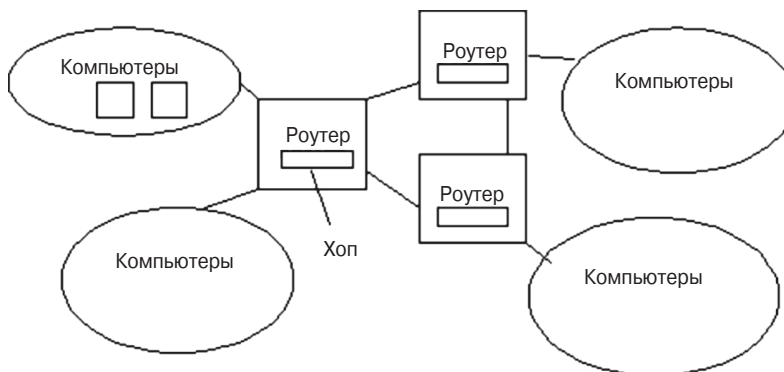


Рис. 1.5. Блок-схема передачи информации между сегментами сложной сети с использованием роутеров [10]

Адаптивные алгоритмы (так называемая динамическая маршрутизация) изменяют решение о выборе маршрутов при изменении топологии сети и, что главное, в зависимости от текущей загруженности линий.

Отметим, что в современных сетях используются два метода динамической маршрутизации: маршрутизация по вектору расстояния (протокол RIP, который минимизирует число переходов через промежуточные маршрутизаторы – число хопов) и маршрутизация с учетом состояния каналов (протокол OSPF, который минимизирует время достижения нужного сегмента сети).

Как показывает практика, на сетевом уровне может потребоваться разбить полученный фрейм на ряд более мелких фрагментов (дейтаграммы), прежде чем передать их дальше.

Известными примерами наиболее широко используемых протоколов сетевого уровня являются протокол межсетевого взаимодействия IP стека TCP/IP и протокол межсетевого обмена пакетами IPX стека компании Novell IPX/SPX. В отношении транспортного уровня следует отметить, что *транспортный уровень* – это сердцевина иерархии протоколов. Он предназначен для оптимизации передачи данных от отправителя к получателю, управления потоком данных, организации приложению или верхним уровням стека необходимой степени надежности передачи данных вне зависимости от физических характеристик используемой сети или сетей. Начиная с транспортного уровня, все вышележащие протоколы реализуются программными средствами, обычно включаемыми в состав сетевой операционной системы.

Сеансовый уровень (уровень сессии) позволяет пользователям различных компьютеров устанавливать сеансы связи друг с другом. При этом обеспечивается открытие сеанса, управление диалогом устройств (например, выделение места для файла на диске принимающего устройства) и завершение взаимодействия. Это делается с помощью специальных программных библиотек (например, RPC-remote procedure calls от Sun Microsystems). На практике немногие приложения используют сеансовый уровень.

Уровень представления – очень важный компонент ТКС, поскольку он выполняет преобразование данных между компьютерами сети с различными форматами кодов символов, например ASCII и EBCDIC, т.е. преодолевает синтаксические различия в представлении данных. На этом уровне может выполняться шифрование и дешифрирование и сжатие данных, благодаря чему секретность обмена данными обеспечивается сразу для всех прикладных служб.

И наконец, последний по списку, но не по важности – прикладной уровень (уровень конкретных приложений).

Прикладной уровень – это набор разнообразных протоколов (стандартов), с помощью которых любые пользователи сети получают доступ к разделяемым ресурсам, таким как файлы, электронная почта, гипертекстовые WEB-страницы, принтеры.

На этом уровне обычно происходит взаимодействие уже не между компьютерами, а между конкретными приложениями: определяется модель, по которой будет происходить обмен файлами, устанавливаются правила, по которым мы будем пересылать почту, организовывать виртуальный терминал, сетевое управление, директории и т.п.

Типичными примерами протоколов этого уровня являются Telnet, X.400, FTP, HTTP.

1.5. Базовые стандарты телекоммуникационных систем

В общем случае стандартом (протоколом) называют способы и правила, при помощи которых осуществляется обмен данными между компьютерами ТКС. При этом некоторые реально используемые протоколы с точки зрения ЭМВОС осуществляют функции только одного уровня, а другие протоколы — нескольких уровней. И наоборот, протокол может осуществлять функции какого-либо уровня частично. Пока МОС (ISO) разрабатывала свою модель разбиения на функции передачи данных, различные крупные компании-производители создавали свои правила, при этом кто-то из них придерживался руководящих документов МОС, кто-то нет. В табл. 1.4 приведены основные используемые на практике стеки коммуникационных протоколов и уровней ЭМВОС X [10].

Таблица 1.4. Соответствие промышленных стеков телекоммуникационных протоколов модели ЭМВОС

Уровни ЭМВОС		Протоколы сетевой архитектуры		
		IBM	Novell/NetWare	TCP/IP
7	Прикладной	SN A		Telnet FTP HTTP SMTP
6	Представительный			
5	Сеансовый			
4	Транспортный		SPX	TCP UDP
3	Сетевой		IPX	IP ICMP
2	Канальный		Ethernet, Token Ring, FDDI	
1	Физический			

Можно сказать, что *стандарт* — это узаконенный вариант реализации протокола в аппаратуре или программном обеспечении.

В общем случае все многообразие стандартов можно условно разделить на три большие группы.

- *Юридические стандарты.* Они подтверждаются законами, которые приняты государством (например, ФСБ в России требует соблюдения определенных стандартов безопасности для применяемой этой организацией аппаратуры).
- *Фактические стандарты.* Эти стандарты существуют, но их использование не определено законами. Например, стек TCP/IP (наиболее популярный стек протоколов, используемый как в глобальных, так и в локальных сетях) и связанные с ним протоколы являются промышленным фактическим стандартом на соединение сегментов сетей передачи данных.
- *Корпоративные стандарты.* Это те стандарты, которые разрабатывают и внедряют частные коммерческие компании для своих продуктов (например, оригинальный стек протоколов IPX/SPX фирмы Novell, который она разработала для своей операционной системы Net Ware в начале 1980-х годов).

Следует понимать, что стандарты, разрабатываемые не частными стандартизирующими организациями, не являются корпоративными, они могут стать промышленным стандартом де-факто, а могут и не стать. Примером являются стандарты IEEE 802.3 и стек протоколов OSI.

Разработчикам ТКС важно знать основные международные стандартизирующие организации в области передачи данных:

ITU (International Telecommunications Union) – Международный союз электросвязи; является структурным подразделением ООН, образован в 1865 году как Международный телеграфный союз. Основными рабочими органами ITU являются:

- Сектор стандартизации электросвязи (ITU-T), являющийся преемником (ССИТТ, МККТТ);
- Сектор радиосвязи (ITU-R);
- Сектор развития электросвязи (ITU-D).

Разработки ITU-T носят рекомендательный характер в области традиционной электросвязи, передачи данных, информационных сетей. Тем не менее рекомендации ITU-T фактически являются международными стандартами в соответствующих областях техники. Серии подобных рекомендаций ITU-T обычно обозначаются латинскими буквами, например, Q – коммутация и сигнализация, X – сети данных и взаимодействие открытых систем, V – передача данных по телефонной сети, Y – Глобальная информационная инфраструктура и аспекты протоколов Интернета.

Общеизвестным примером таких стандартов является стандарт X.25.

ISO – The International Organization for Standardization (также International Standards Organization) – Международная организация по стандартизации (МОС). Это некоммерческая организация со штаб-квартирой в Женеве (<http://www.iso.ch/>), занимающаяся разработкой международных стандартов во многих областях, включая вычислительную технику и связь. Основана в 1946 году как всемирная федерация органов стандартизации. Членами ISO являются более 130 национальных институтов, занимающихся стандартизацией (например, ANSI – Американский институт национальных стандартов). Название ISO не является аббревиатурой – оно происходит от древнегреческого слова *isos*, означавшего «равный, равносильный». ISO состоит из множества рабочих групп по разным направлениям. Протоколы OSI – пример стандартов ISO.

IEEE (произносится «ай-трипл-и») – The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. – Институт инженеров электротехники и электроники (США). Эта крупнейшая в мире профессиональная организация (www.ieee.org) образована в 1963 году, объединяет более 300 тыс. технических специалистов из 147 стран, на момент издания книги – ведущая организация по стандартизации, отвечающая также за сетевые стандарты. IEEE ведет большую издательскую и образовательную деятельность, субсидирует разработку стандартов для компьютеров и с точки зрения передачи данных отвечает за спецификации серии стандартов 802, которые являются основными для высокоскоростной передачи данных.

EIA – Electronics Industries Alliance – Альянс отраслей электронной промышленности (альянс EIA). До октября 1997 года это сокращение расшифровывалось как Electronics Industries Association – Ассоциация отраслей электронной промышленности. Расположенная в США, организация специализируется на стандартах (интерфейсах) физического уровня, она разрабатывает электрические и функциональные стандарты с идентификатором RS (Recommended Standards – рекомендуемые стандарты). Пример подобного стандарта – широко известный последовательный интерфейс RS-232C.

TIA – Telecommunication Industry Association – Ассоциация телекоммуникационной промышленности США, ассоциация TIA. Это ассоциация изготовителей средств связи, которая специализируется на разработках стандартов на кабельные системы.

ETSI – European Telecommunications Standards Institute – Европейский институт стандартов для электросвязи – был создан в 1988 году, является неправительственной организацией, разрабатывающей общеевропейские стандарты. Примеры наиболее известных стандартов – стандарт цифровой мобильной связи GSM (Global System for Mobile Telecommunications), DECT, TETRA.

И наконец, нельзя не включить в этот перечень **IAB** – Internet Architecture Board – Координационный Совет по архитектуре сети Интернет. В IAB входят:

- IETF – Internet Engineering Task Force, фактически это техническая комиссия Интернет, образована в 1986 году и до сих пор занимается решением текущих задач. Например, к ее функциям относится стандартизация стека протоколов TCP/IP. В рамках этой комиссии оперативно создаются отдельные рабочие группы на короткий промежуток времени для быстрого решения возникшей конкретной задачи. К дополнительным функциям IETF относится подготовка документов RFC (Request For Comment, Запрос на получение комментария). Конечно, не все документы RFC являются стандартами Интернет, однако многие содержат полезные комментарии к какому-либо стандарту либо просто описание какой-либо проблемы Интернет.
- IRTF – Internet Research Task Force. Это так называемая исследовательская комиссия Интернет, занимается перспективными долгосрочными исследованиями по протоколам стека TCP/IP и вопросами стандартизации новых разрабатываемых информационных технологий.

Российским разработчикам необходимо помнить, что в России действуют свои законы (например, Федеральный закон об информации, информационных технологиях и защите данных), ГОСТы Госстандарта, СНиП – строительные нормы и правила Госстроя, ПУЭ – правила устройства электроустановок, ВНТП и РД – ведомственные нормы и правила и рабочие документы Мининформсвязи. Например, РД.45.128-2000, сети и службы передачи данных. Все эти нормативно-правовые документы в силу объективных причин могут отличаться от вышеназванных стандартов.

В заключение этого раздела необходимо отметить, что протоколы и стандарты чрезвычайно важны для организации передачи данных. Однако хотя количество протоколов и стандартов на момент выхода этой книги очень велико, а развитие средств передачи данных идет настолько быстро, требуется отслеживать этот важный сегмент ТКС.

1.6. Практические основы физического и логического кодирования данных

Каждый вид компьютеров имеет свой внутренний вид кодирования для представления обрабатываемых и передаваемых данных – символьной и текстовой информации [10]. Наиболее часто используются коды ASCII (American Standard Code for Information Interchange, американский стандартный код для обмена информацией)

и EBCDIC (Extended Binary Coded Decimal Interchange Code, расширенный двоично-десятичный код обмена информацией).

Так, ASCII представляет собой 8-битную кодировку для представления десятичных цифр, латинского и национального алфавитов, знаков препинания и управляющих символов. Первую половину так называемой кодовой таблицы (0–127) занимают символы US-ASCII, которые включают 95 печатаемых и 33 управляющих символа (разработана ANSI – Американским институтом национальных стандартов). Вторая половина таблицы (128–255) содержит национальные шрифты (кириллица) и символы псевдографики. Этот код используется в персональных компьютерах и в несовместимых с IBM больших машинах. На больших компьютерах (мейнфреймах) используется 8-битовый код EBCDIC, разработанный компанией IBM. При передаче данных от одного компьютера к другому может потребоваться перекодировка символов, которая осуществляется системным МО передающего или принимающего компьютера. Эти действия являются функциями уровня представления модели OSI. Далее рассмотрим наиболее часто применяемые методы кодирования на физическом уровне.

Большинство компьютеров для представления «0» и «1» обычно оперирует стандартными логическими уровнями сигналов, которые определяются конкретным видом используемых микросхем. TTL-логика представляет 0,5 В как «0» и 5 В как «1». ECL- и CMOS-логики представляют –1,75 В как «0» и –0,9 В как «1». Для передачи данных, например, в оптоволоконных системах в трансивере (приемопередатчике) устанавливается специальный чип, обрабатывающий любую логику и выдающий управляющий сигнал источнику света с конвертацией 0,5 В и 5 В TTL в 0 мА и 50 мА соответственно (включи свет, выключи свет).

В большинстве современных компьютерных сетей все цифровые данные передаются при помощи цифрового сигнала, т.е. последовательностью импульсов. Для передачи данных может использоваться более двух уровней сигнала, при этом единичный импульс сигнала может представлять не один бит, а целую группу бит. Возможна и обратная ситуация, когда для высоконадежной передачи только одного бита может использоваться два импульса сигнала.

При цифровой передаче используют как потенциальные, так и импульсные коды. В *потенциальных кодах* для представления логических единиц и нулей используется только значение сигнала в течение битового интервала, а фронты сигнала, формирующие законченные импульсы, во внимание не принимаются. *Импульсные коды* представляют собой логический ноль и логическую единицу перепадом напряжений определенного направления. В значение импульсного кода включается весь импульс вместе с его фронтами.

Сигналы в виде импульсных последовательностей имеют бесконечный спектр. При этом основная энергия сигнала сосредоточена в диапазоне частот от нуля до частоты $f = 1/t_0$ (первый лепесток энергетического спектра сигнала), где t_0 – бодовый интервал, т.е. длительность единичного импульса линейного сигнала.

Теоретически в соответствии с известным пределом Найквиста максимально допустимая скорость изменения значений дискретного сигнала ($B = 1/t_0$, скорость передачи в бодах) при передаче последовательности прямоугольных импульсов по каналу связи, эквивалентом которого является идеальный ФНЧ с прямоугольной

АЧХ и линейной ФЧХ и с частотой среза $f_{гр}$, равна $B_{max} = 2f_{гр}$. Указанное ограничение связано с наличием переходных процессов на выходе ФНЧ, при этом время нарастания/спада фронта сигнала определяется как:

$$t_n = \frac{1}{2f_p}. \quad (1.1)$$

При максимально допустимой скорости передачи сигнала $t_0 = t_n$. Если интервал $t_0 < t_n$, происходит недопустимое искажение формы сигнала на выходе канала и, как следствие, ошибки при приеме. Таким образом, скорость передачи информации N (бит/с) зависит от скорости передачи сигнала B (бод) и выбранного метода кодирования сигнала на физическом уровне.

В любом случае используемый разработчиками ТКС метод физического цифрового кодирования должен достигать нескольких целей:

- обеспечивать наименьшую ширину спектра сигнала при заданной скорости передачи информации N (Бит/с). Минимизировать величину постоянной составляющей в спектре линейного сигнала;
- обеспечивать приемнику возможность тактовой синхронизации (clocking). Так называемые самосинхронизирующиеся коды позволяют приемнику выделять из принимаемого цифрового потока колебание тактовой частоты и затем формировать из него тактовые импульсы при любой статистике битового потока на входе передатчика;
- обладать способностью распознавать ошибки;
- обладать низкой стоимостью реализации.

Далее рассмотрим методы физического цифрового кодирования сигналов.

Потенциальный код без возвращения к нулю NRZ (Non Return to Zero). Сигнал в линии передачи всегда имеет два уровня: нулю соответствует нижний уровень, единице – верхний. Переходы происходят на границе битового интервала. При передаче последовательности единиц сигнал не возвращается к нулю в течение битового интервала.

Подробнее рассмотрим некоторые частные случаи передачи данных кодом NRZ (рис. 1.6): чередующаяся последовательность нулей и единиц, последовательность нулей и последовательность единиц. Определим частоту основной гармоники спектра сигнала в каждом из этих случаев.

При чередовании единиц и нулей и скорости передачи N (бит/с) период основной гармоники в спектре сигнала равен $T = 2t_0 = 2/N$ (с). Частота основной гармоники f_0 равна $f_0 = N/2$ (Гц).

При передаче только единиц или только нулей сигнал в линии представляет собой постоянный ток.

Спектр реального сигнала постоянно меняется в зависимости от того, какова структура данных, передаваемых по линии связи. При передаче длинных последовательностей нулей или единиц спектр сигнала сдвигается в сторону низких частот. Линейный сигнал NRZ обычно содержит постоянную составляющую и не всегда обеспечивает приемнику возможность синхронизироваться с поступающим сигналом. При этом код NRZ прост в реализации, обладает хорошей помехоустойчивостью (из-за двух резко отличающихся уровней сигнала). Основная энергия сигнала в коде NRZ сосредоточена на частотах от 0 до $N/2$ (Гц).

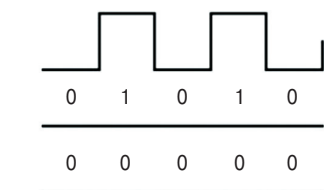
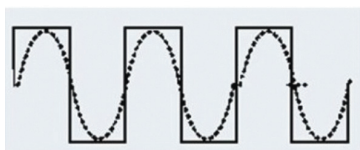
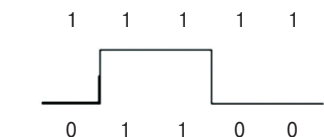


Рис. 1.6. Особенности кодирования по методу NRZ



В чистом виде код NRZ в сетях не используется. Тем не менее используются его различные модификации, в которых с успехом устраняют как плохую самосинхронизацию, так и наличие постоянной составляющей.

Потенциальный код с инверсией при единице NRZI (Non Return to Zero with ones Inverted, NRZI). При этом методе кодирования передаче нуля соответствует уровень сигнала, который был установлен в предыдущем битовом интервале (уровень сигнала не меняется), а при передаче единицы уровень изменяется на противоположный (рис. 1.7) [10].

Этот код используется при передаче по оптоволоконным кабелям, где приемник устойчиво распознает два состояния сигнала — свет и темнота.

Определим частоты основных гармоник линейного сигнала для частных случаев битовых последовательностей.

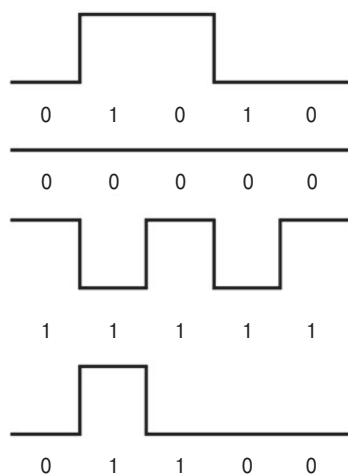


Рис. 1.7. Особенности кодирования по методу NRZI

Так, для последовательности чередующихся единиц и нулей период сигнала равен $T = 4t_0$ (с), основная частота сигнала $f_0 = N/4$ (Гц), при последовательности единиц $f_0 = N/2$ (Гц), при передаче последовательности нулей $f_0 = 0$ – постоянный ток в линии (или отсутствие света).

Код NRZI обычно использует только два уровня сигнала и поэтому обладает хорошей помехоустойчивостью. Максимальную энергию имеют спектральные составляющие сигнала около частоты $N/4$ (Гц). Следует отметить, что код NRZI стал основным при разработке улучшенных методов кодирования для высокоскоростных систем передачи данных.

Метод биполярного кодирования с альтернативной инверсией (Bipolar Alternate Mark Inversion, AMI, квазитроичный код). В этом методе используются уже не два, а три значения сигнала – «-1», «0» и «+1». Для различения этих трех уровней необходимо обеспечить лучшее соотношение сигнал/шум на входе приемника. Дополнительный уровень требует увеличения мощности передатчика примерно на 3 дБ для обеспечения той же достоверности приема бит на линии. Следует отметить, что это общий недостаток кодов с несколькими состояниями сигнала по сравнению с двухуровневыми кодами.

Для кодирования логического нуля всегда используется нулевой потенциал, логическая единица обычно кодируется попеременно либо положительным потенциалом, либо отрицательным (рис. 1.8) [10].

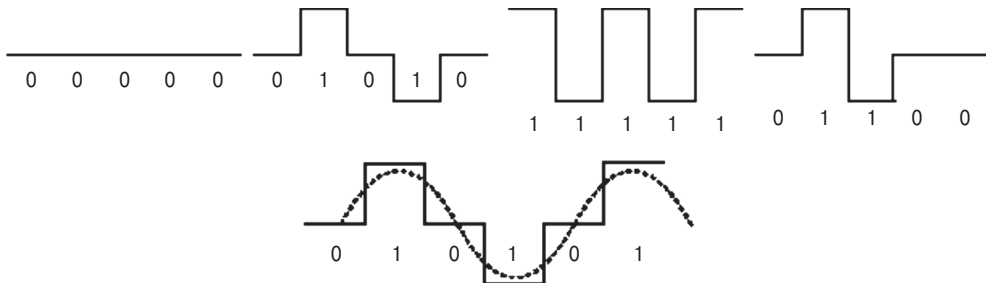


Рис. 1.8. Принципы квазитроичного кодирования (AMI)

Отметим, что здесь при передаче любой битовой последовательности сигнал в линии не содержит постоянную составляющую. При передаче единиц основная гармоника сигнала находится на частоте $f_0 = N/2$ (Гц). В случае чередующегося набора единиц и нулей основная гармоника находится на частоте $f_0 = N/4$ (Гц), что в два раза меньше, чем у кода NRZ. Но остается проблема синхронизации при передаче последовательности нулей.

В целом для различных комбинаций бит использование кода AMI приводит к более узкому спектру сигнала, чем для кода NRZ. Код AMI предоставляет также некоторые возможности по распознаванию ошибочных сигналов. Так, нарушение строгого чередования полярности сигналов говорит о ложном импульсе или исчезновении корректного импульса.

Манчестерский код (Manchester). Манчестерский код относится к самосинхронизирующимся кодам и имеет два уровня, что обеспечивает хорошую помехоза-

щищенность. Здесь каждый битовый интервал делится на две части. Информация кодируется перепадом уровня, происходящим в середине каждого интервала.

Единица кодируется перепадом от высокого уровня напряжения передаваемого сигнала к низкому, а ноль — обратным перепадом (рис. 1.8). В начале каждого битового интервала может происходить так называемый служебный перепад сигнала (при передаче нескольких единиц или нулей подряд) (рис. 1.9).



Рис. 1.9. Принцип манчестерского кодирования

Отметим, что при передаче любой битовой последовательности сигнал не содержит постоянную составляющую. Длительность единичного импульса линейного сигнала t_0 равна половине битового интервала, т.е. $B = 2N$. Частота основной гармоники сигнала зависит от характера битовой последовательности и находится в диапазоне $f_0 = N/2 - N$ (Гц).

Манчестерский код широко используется в сетях Ethernet со скоростью передачи 10 Мбит/с (спецификация 10Base-T).

В настоящее время разработчики пришли к выводу, что во многих случаях рациональнее применять потенциальное кодирование, ликвидируя его недостатки с помощью так называемого «логического кодирования».

Потенциальный код 2B1Q. Это потенциальный код с четырьмя уровнями сигнала для кодирования данных. Название отражает суть кодирования — каждые два бита (2В) передаются за один такт сигналом определенного уровня (1Q). При этом линейный сигнал имеет четыре состояния (рис. 1.10).

Дибиту «00» соответствует потенциал $-2,5$ В (-3), «01» — потенциал $-0,833$ В (-1), «11» — потенциал $+0,833$ В ($+1$), «10» — потенциал $+2,5$ В ($+3$). Скорость передачи сигнала B при таком кодировании в 2 раза меньше скорости передачи информации N .

Основная частота сигнала обычно не превышает $f_0 = N/4$ (Гц). Однако для реализации этого метода кодирования мощность передатчика должна быть выше, чтобы все четыре значения потенциала четко различались приемником на фоне помех.

Код MLT3 (Multi Level Transmission — 3). Здесь используются три уровня линейного сигнала: « -1 », « 0 », « $+1$ » (рис. 1.11). Логической единице соответствует обязательный переход с одного уровня сигнала на другой. При передаче логического нуля изменение уровня линейного сигнала не происходит.

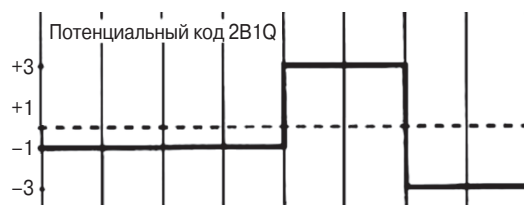


Рис. 1.10. Временная эпюра сигнала в коде 2B1Q

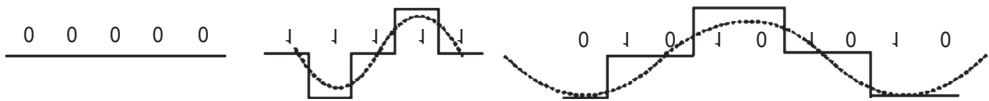


Рис. 1.11. Типовая форма сигнала в коде MLT-3

При передаче последовательности единиц период изменения уровня сигнала включает четыре бита. В этом случае $f_0 = N/4$ (Гц). Это максимальная основная частота сигнала в коде MLT-3. В случае чередующейся последовательности нулей и единиц основная гармоника сигнала находится на частоте $f_0 = N/8$ (Гц).

Логическое кодирование выполняется передатчиком до физического кодирования, рассмотренного выше, обычно средствами физического уровня. На этапе логического кодирования борются с недостатками методов физического цифрового кодирования – отсутствие синхронизации, наличие постоянной составляющей. Таким образом, сначала с помощью средств логического кодирования формируются исправленные последовательности данных, которые потом с помощью методов физического кодирования передаются по линиям связи.

Здесь логическое кодирование подразумевает замену бит исходной информационной последовательности новой последовательностью бит, несущей ту же информацию, но обладающей, кроме этого, дополнительными свойствами.

Различают два метода логического кодирования:

- избыточные коды;
- скремблирование.

Избыточные коды основаны на разбиении исходной последовательности бит на группы и замене каждой исходной группы в соответствии с заданной таблицей кодовым словом, которое содержит большее количество бит.

Логический код 4В/5В заменяет исходные группы (слова) длиной 4 бита словами длиной 5 бит. В результате общее количество возможных битовых комбинаций $25 = 32$ больше, чем для исходных групп $24 = 16$. В кодовую таблицу включают 16 кодовых слов, которые не содержат более двух нулей подряд, и используют их для передачи данных. Код гарантирует, что при любом сочетании кодовых слов на линии не могут встретиться более трех нулей подряд.

Остальные комбинации кода используются для передачи служебных сигналов (синхронизация передачи, начало блока данных, конец блока данных, управление передачей). Неиспользуемые кодовые слова могут быть задействованы приемником для обнаружения ошибок в потоке данных. Цена за полученные достоинства при таком способе кодирования данных – снижение скорости передачи полезной информации на 25%.

Имеются также коды с тремя состояниями сигнала, например, в коде 8В/6Т для кодирования 8 бит исходной информации используются кодовые слова из шести элементов, каждый из которых может принимать одно из трех значений. Избыточность кода 8В/6Т выше, чем кода 4В/5В, так как на $28 = 256$ исходных комбинаций приходится $36 = 729$ результирующих комбинаций.

В коде 8В/10В каждые 8 бит исходной последовательности заменяются десятью битами кодового слова. При этом на 256 исходных комбинаций приходится

1024 результирующих комбинаций. При замене в соответствии с кодовой таблицей соблюдаются следующие правила:

- ни одна результирующая комбинация не должна иметь более четырех одинаковых бит подряд;
- ни одна результирующая комбинация не должна содержать более шести нулей или шести единиц.

Все рассмотренные избыточные коды применяются в сетях Ethernet, которые нашли самое широкое распространение. Так, код 4В/5В используется в стандартах 100Base-TX/FX, а код 8В/6Т – в стандарте 100Base-T4, который в настоящее время практически уже не используется. Код 8В/10В используется в стандарте 1000Base-X, код 64/66 в стандарте 10 GbE (когда в качестве среды передачи данных используется оптоволокно).

Осуществляют логическое кодирование сетевые адаптеры. Поскольку использование таблицы перекодировки является очень простой операцией, метод логического кодирования избыточными кодами не усложняет функциональные требования к этому оборудованию.

Для обеспечения заданной пропускной способности линии передатчик, использующий избыточный код, должен работать с повышенной скоростью (тактовой частотой). Так, для обеспечения скорости передачи информации 100 Мбит/с с использованием кодирования 4В/5В + NRZI передатчик должен работать на скорости 125 МБод. При этом спектр линейного сигнала расширяется. Тем не менее спектр сигнала избыточного потенциального кода уже спектра сигнала в манчестерском коде, что оправдывает дополнительный этап логического кодирования, а также работу приемника и передатчика на повышенной скорости.

Скремблирование представляет собой «перемешивание» исходной последовательности данных таким образом, чтобы вероятность появления единиц и нулей на линии становилась близкой 0,5. Устройства (или программные модули), выполняющие такую операцию, называются скремблерами (scramble – свалка, беспорядочная сборка).

Скремблер в передатчике выполняет преобразование структуры исходного цифрового потока. Дескремблер в приемнике восстанавливает исходную последовательность бит. Практически единственной операцией, используемой в скремблерах и дескремблерах, является XOR – «побитное исключающее ИЛИ» (сложение по модулю 2).

Пусть, например, скремблер реализует соотношение $V_i = A_i + V_{i-5} + V_{i-7}$ (рис. 1.12).

Здесь V_i – бит результирующего кода, полученный на i -м такте работы скремблера; A_i – бит исходного кода, поступающий в передатчике на вход скремблера на i -м такте; V_{i-5} и V_{i-7} – биты результирующего кода, полученные на предыдущих тактах работы скремблера, соответственно на $i-5$ -м и $i-7$ -м тактах.

Дескремблер в приемнике восстанавливает исходную последовательность, используя соотношение

$$C_i = V_i + V_{i-5} + V_{i-7} = (A_i + V_{i-5} + V_{i-7}) + V_{i-5} + V_{i-7} = A_i.$$

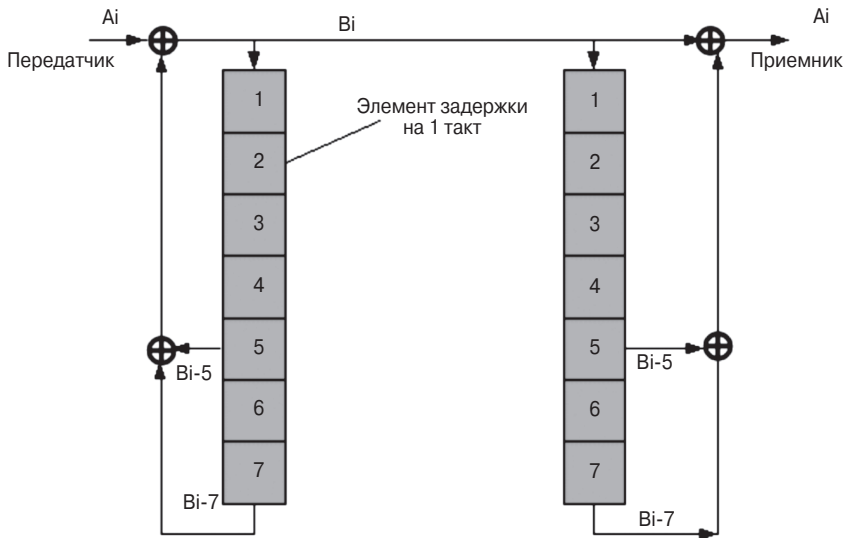


Рис. 1.12. Вариант реализации скремблирования [10]

1.7. Узкополосные и широкополосные системы с мультиплексированием данных

Узкополосная система (baseband) использует цифровой способ передачи сигнала. Хотя цифровой сигнал имеет широкий спектр и теоретически занимает бесконечную полосу частот, на практике ширина спектра передаваемого сигнала определяется частотами его основных гармоник. Именно они дают основной энергетический вклад в формирование сигнала. В узкополосной системе передача ведется в исходной полосе частот, не происходит переноса спектра сигнала в другие частотные области. Именно в этом смысле система называется узкополосной. Сигнал занимает практически всю полосу пропускания линии. Для регенерации сигнала и его усиления в сетях передачи данных используют специальные устройства – повторители (repeater, репитор).

Примером реализации узкополосной передачи являются локальные сети и соответствующие спецификации IEEE (например, 802.3 или 802.5) [10].

Ранее узкополосная передача из-за затухания сигналов использовалась на расстояниях порядка 1–2 км по коаксиальным кабелям, но в современных системах, благодаря различным видам кодирования и мультиплексирования сигналов и видам кабельных систем, ограничения отодвинуты до 40 км и более.

Термин широкополосная (broadband) передача изначально использовался в системах телефонной связи, где им обозначался аналоговый канал с диапазоном частот (шириной полосы пропускания) более 4 КГц. С целью экономии ресурсов при передаче большого числа телефонных сигналов с полосой частот 0,3–3,4 КГц были разработаны различные схемы уплотнения (мультиплексирования) этих сигналов, обеспечивающие их передачу по одному кабелю.

В высокоскоростных сетевых приложениях широкополосная передача означает, что для передачи данных используется не импульсная, а аналоговая несущая. По аналогии термин «широкополосный Интернет» означает, что вы используете

канал с пропускной способностью более 128 Кбит/с (в Европе) или 200 Кбит/с (в США). Широкополосная система обладает высокой пропускной способностью, обеспечивает высокоскоростную передачу данных и мультимедийной информации (голос, видео, данные). Примером являются сети ATM, B-ISDN, Frame Relay, сети кабельного вещания CATV.

Термин *мультиплексирование* используется в компьютерной технике во множестве аспектов. Мы под этим будем понимать объединение нескольких коммуникационных каналов в одном канале передачи данных.

Перечислим основные техники мультиплексирования: частотное уплотнение – Frequency Division Multiplexing (FDM), временное уплотнение – Time Division Multiplexing (TDM) и спектральное или уплотнение по длине волны (волновое) – Wavelength Division Multiplexing (WDM).

WDM применяется только в оптоволоконных системах. Кабельное телевидение, например, использует FDM.

FDM. При частотном мультиплексировании каждому каналу выделяется своя аналоговая несущая. При этом в FDM может применяться любой вид модуляции или их комбинация. Например, в кабельном телевидении по коаксиальному кабелю с шириной полосы пропускания 500 МГц обеспечивается передача 80 каналов по 6 МГц каждый. Каждый из таких каналов, в свою очередь, получен мультиплексированием подканалов для передачи звука и видеоизображения.

TDM. При этом виде мультиплексирования низкоскоростные каналы объединяются (сливаются) в один высокоскоростной, по которому передается смешанный поток данных, образованный в результате агрегирования исходных потоков. Каждому низкоскоростному каналу присваивается свой временной слот (отрезок времени) внутри цикла определенной длительности. Данные представляются как биты, байты или блоки бит или байт. Например, каналу А отводятся первые 10 бит внутри временного отрезка заданной длительности (фрейм, кадр), каналу В – следующие 10 бит и т.д. Кроме бит данных, фрейм включает служебные биты для синхронизации передачи и других целей. Фрейм имеет строго определенную длину, которая обычно выражается в битах (например, 193 бита), и структуру.

Устройства сети, которые выполняют мультиплексирование потоков данных низкоскоростных каналов (tributary, компонентные потоки) в общий агрегированный поток (aggregate) для передачи по одному физическому каналу, называются *мультиплексорами* (multiplexer, mux, мукс). Устройства, выполняющие разделение агрегированного потока на компонентные потоки, называются демультиплексорами. Синхронные мультиплексоры используют фиксированное разделение на временные слоты. Данные, принадлежащие определенному компонентному потоку, имеют одну и ту же длину и передаются в одном и том же временном слоте в каждом фрейме мультиплексированного канала. Если от некоторого устройства информация не передается, то его тайм-слот остается пустым. Статистические мультиплексоры (stat muxes) решают эту проблему, динамически присваивая свободный временной слот активному устройству.

WDM. WDM использует различные длины волн светового сигнала для организации каждого канала. Фактически это особый вид частотного уплотнения на очень высоких частотах. При этом виде мультиплексирования (рис. 1.13) [10] передающие устройства работают на разных длинах волн (например, 820 и 1300 нм).

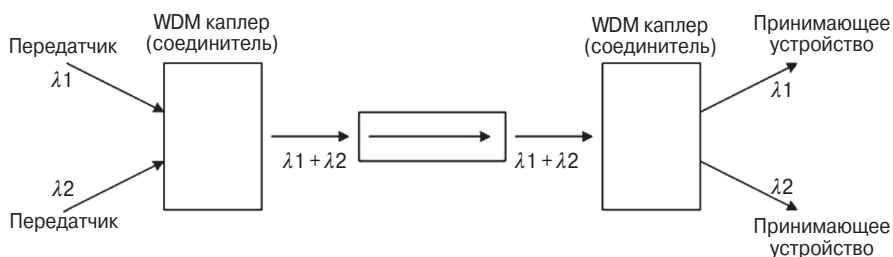


Рис. 1.13. Схема реализации WDM мультиплексирования

Затем лучи объединяются и передаются по одному оптоволоконному кабелю. Принимающее устройство разделяет передачу по длинам волн и направляет лучи в разные приемники. Для слияния/разделения каналов по длинам волн используются специальные устройства – каплеры (coupler). Ниже приведен пример такого мультиплексирования.

Среди основных конструкций каплеров различают передающие, отражающие каплеры и центрально-симметричные отражающие каплеры (SCR). Передающие и отражающие каплеры представляют собой крошечные «перекрученные» в центре кусочки стекла в виде звезды (рис. 1.14 и 1.15). Количество выходных лучей соответствует количеству портов каплера, а число портов определяет количество устройств, передающих на разных длинах волн. Далее показаны два вида отражающих каплеров.

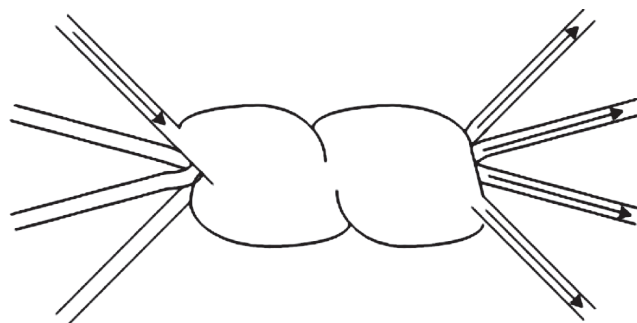


Рис. 1.14. Эскиз системы типа «передающая звезда»

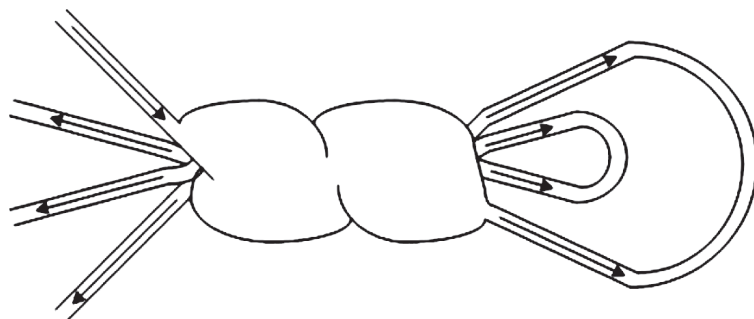


Рис. 1.15. Эскиз системы типа «отражающая звезда»

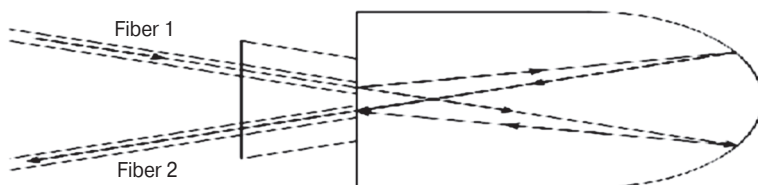


Рис. 1.16. Принцип работы центрально-симметричного отражающего каплера

Центрально-симметричный отражающий каплер (рис. 1.16) использует отражение света от сферического зеркала. При этом поступающий луч разделяется на два луча симметрично центра изгиба сферы зеркала. При повороте зеркала меняется положение изгиба сферы и соответственно путь отраженного луча. Можно добавить третий оптоволоконный кабель (fiber) и перенаправить отраженный луч еще на один порт. На этой идее основана реализация WDM-мультиплексоров и оптоволоконных коммутаторов.

Оптические мультиплексоры могут реализовываться не только при помощи CSR-каплеров, но и при помощи отражающих фильтров и дифракционных решеток.

Основными факторами, определяющими возможности различных реализаций, являются мешающие наводки и разделение каналов. Величина наводки определяет, насколько хорошо разделены каналы, и, например, показывает, какая часть мощности 820-нм луча оказалась на 1300-нм порту. Наводка в 20 дБ означает, что 1% сигнала появился на непредназначенном порту. Чтобы обеспечить надежное разделение сигналов, длины волн должны быть разнесены «широко». Трудно распознать близкие длины волн, например 1290 и 1310 нм. Обычно используют четыре схемы мультиплексирования: 850/1300, 1300/1550, 1480/1550 и 985/1550 нм. Лучшими характеристиками пока обладают CSR-каплеры с системой зеркал, например двумя (рис. 1.17).

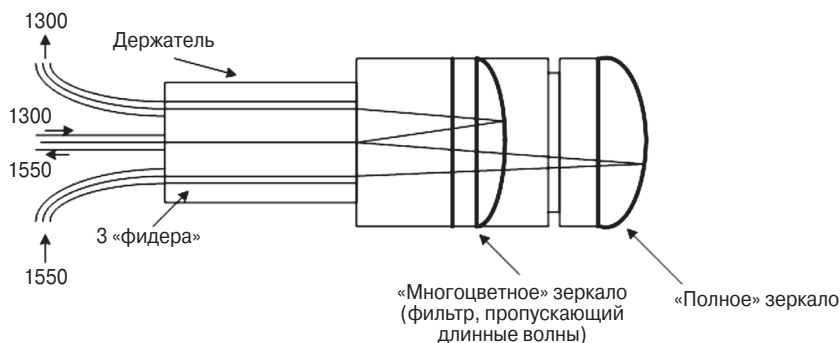


Рис. 1.17. Принцип построения SCR-каплера с двумя зеркалами

Технология WDM, представляющая собой одну из трех разновидностей спектрального уплотнения, занимает среднее положение в смысле эффективности использования спектра. В системах WDM объединяются спектральные каналы, длины волн которых отличаются одна от другой на 10 нм. Самой производительной является технология DWDM (Dense WDM). Она предусматривает объединение ка-

налов, разнесенных по спектру не более чем на 1 нм, а в некоторых системах даже на 0,1 нм. Вследствие такого плотного размещения сигналов по спектру стоимость оборудования DWDM обычно очень высока. Наименее эффективно спектральные ресурсы используются в новых системах на основе технологии CWDM (Coarse WDM, разреженные системы WDM). Здесь спектральные каналы разнесены не менее чем на 20 нм (в некоторых случаях эта величина достигает 35 нм). Системы CWDM обычно используются в городских сетях и в LAN, где низкая цена оборудования является важным фактором и требуется организация 8–16 каналов WDM. Оборудование CWDM не ограничено одним участком спектра и может работать в диапазоне от 1300 до 1600 нм, в то время как аппаратура DWDM привязана к более узкому диапазону 1530–1565 нм.

1.8. Режимы и среды передачи данных

Стандартная линия связи между удаленными компьютерами обычно состоит из физической среды, по которой передаются сигналы, аппаратуры передачи данных АПД (или аппаратуры окончания канала данных АКД) и промежуточного оборудования коммуникационной сети (рис. 1.18) [10]. Промежуточное оборудование может включать мультиплексоры, демультимплексоры, коммутаторы, маршрутизаторы, повторители и пр.

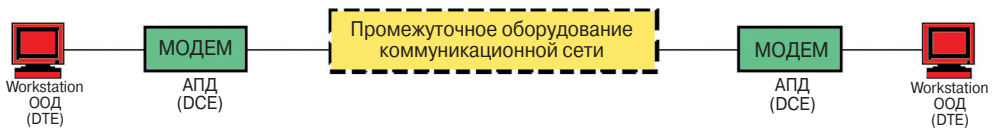


Рис. 1.18. Упрощенная структура линии связи между удаленными компьютерами ТКС

В общем случае в комплексе аппаратно-программных средств, подключаемых к среде передачи, можно выделить следующие элементы [10]:

- DTE (data terminal equipment) – оконечное оборудование для ввода, вывода, обработки и хранения данных. Чаще всего это компьютер, где работает приложение;
- DCE (data circuit-terminating equipment) – аппаратура передачи данных (модем, сетевой адаптер), устройство физического и канального уровня, соединяющее DTE с линией связи. Фактически DCE служит интерфейсом между компьютером и средой передачи (например, между компьютером и оптоволоконным кабелем или между компьютером и телефонной линией). На DCE возлагаются функции преобразования сигнала от DTE в вид, подходящий для передачи по линии связи, – формат среды передачи. Именно среда передачи определяет способы и возможности передачи данных. Существуют специальные протоколы взаимодействия DTE и DCE. Примером DTE-to-DCE интерфейса является последовательный интерфейс RS-232.

Модем – это специальный тип DCE-устройства, применяемый для передачи данных от DTE в аналоговую среду передачи (например, от компьютера в телефонную линию или микроволновому передатчику). Модем модулирует сигнал ана-

логовой несущей последовательностью данных на передаче и выполняет обратное преобразование на приеме. Применяются модемы при необходимости передачи на достаточно большие расстояния. Другим случаем применения модемов может служить необходимость иметь несколько каналов передачи в одной среде (например, по одному кабелю).

Для соединения двух компьютеров на небольшом расстоянии можно использовать их соединение нуль-модемным кабелем (null modem). Он осуществит электрическое и механическое соединение передающего порта одного компьютера и принимающего порта другого. При этом нет необходимости преобразования цифрового сигнала в аналоговый.

При взаимодействии компьютеров возможны симплексная, дуплексная, асинхронная и синхронная передача. Симплексная передача (simplex) означает возможность передачи данных по линии связи только в одну сторону. Полудуплексная передача (half duplex) – это передача данных устройствами в обе стороны, но поочередно. Дуплексная передача (full duplex) подразумевает возможность одновременной передачи взаимодействующими устройствами. В современных высокоскоростных системах используется дуплексная передача.

С точки зрения организации синхронизации передачи данных различают *асинхронные* и *синхронные протоколы передачи данных*. При асинхронной (стартстопной) передаче (рис. 1.19) [10] комбинация бит каждого символа алфавита предваряется стартовым битом, а заканчивается стоповым битом (или двумя стоповыми битами). Стартовый и стоповый биты синхронизируют передачу байта. Контроль ошибок осуществляется добавляемым битом контроля четности (или нечетности) числа единиц в байте.

Контроллер в принимающем устройстве выполняет следующие основные функции:

- обнаруживает на линии соответствующий стартовый бит (стартстопный переход – это сигнал, обозначающий момент начала приема комбинации бит);
- начинает регистрировать через определенные интервалы времени поступающие информационные биты;
- формирует байт в приемном буфере, выполняет проверку правильности приема.

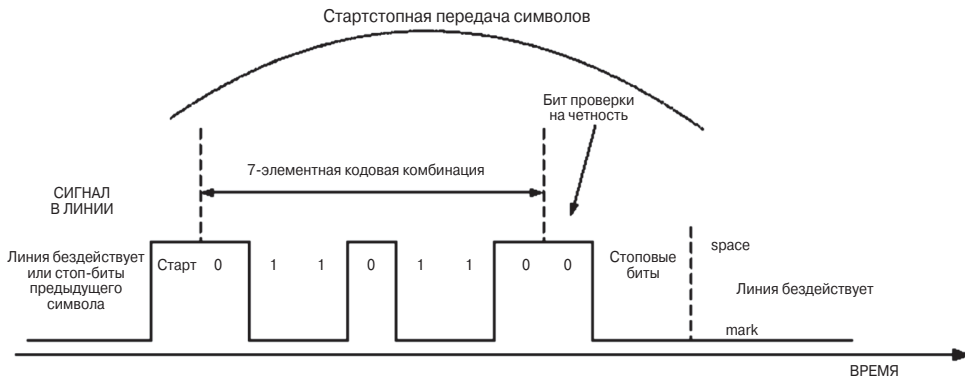


Рис. 1.19. Типовая временная диаграмма сигнала в линии при стартстопной передаче контроллера

Такая синхронизация является достаточно простой в реализации, но замедляет передачу сигналов.

В современных высокоскоростных сетях применяются синхронные протоколы передачи, при которой синхронизируются блоки передаваемых данных. Перед блоком должен передаваться специальный сигнал, который обеспечит вхождение принимающего устройства в синхронный режим. Передаваемый блок данных имеет установленный формат. Контроль ошибок осуществляется за счет добавления к блоку данных контрольной последовательности, получаемой в результате кодирования пакета помехоустойчивым циклическим кодом (CRC). Длина контрольной последовательности может составлять 16 бит (CRC-16) или 32 бита (CRC-32). Принимающее устройство вычисляет значение контрольной последовательности в соответствии с известным алгоритмом по содержимому принятого блока. В случае совпадения вычисленной и принятой контрольной последовательности считается, что принятый блок данных не содержит ошибок. Действия по контролю ошибок в принятом блоке данных выполняет протокол канального уровня (масподуровень). Пример синхронной передачи (интерфейс USB) показан на рис. 1.20.

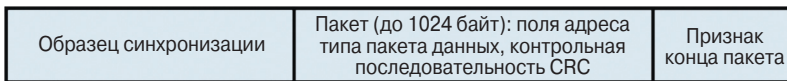


Рис. 1.20. Структура синхронной передачи пакета данных

Далее кратко рассмотрим *среды передачи*, используемые в сетях передачи данных. Каждая среда обладает своими достоинствами и недостатками. Обычно принимают во внимание цену, простоту реализации, возможную скорость передачи и помехоустойчивость, возможность защиты передаваемых данных от несанкционированного доступа.

Все среды разделяют на *ограниченные* и *неограниченные*.

Ограниченные среды представляют собой кабели (витая пара, коаксиальный кабель, оптоволоконный кабель), которые передают электрические и световые сигналы. Возможности передачи данных ограничены возможностями кабеля. При этом различные производители компьютерной техники предъявляют различные требования к реализации кабельных систем. Например, кабельные системы для подключения терминалов к IBM AS/400 отличаются от кабельных систем, используемых для подключения персональных компьютеров к AS/400. Кабельные системы компаний AMP и RID имеют разные возможности.

Неограниченные среды (wireless media) обеспечивают микроволновую, лазерную, инфракрасную и радиопередачу.

Обычно ограниченные среды применяются в высокоскоростной передаче данных на ограниченных расстояниях. При построении мобильных сетей, больших корпоративных сетей или глобальных сетей применяется комбинация ограниченных и неограниченных сред.

Ниже более конкретно рассмотрим виды ограниченных сред, типичным представителем которых является витая пара.

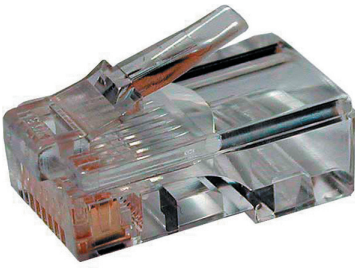


Рис. 1.21. Внешний вид разъема RJ-45

Витую пару образует пара изолированных перекрученных медных проводников (жил). Эти жилы объединяются в одном кабеле изолирующей оплеткой. Для подключения сетевых устройств посредством витой пары используются разъемы RJ-11 (4 пина), RJ-45 (8 пинов – 4 пары) (рис. 1.21) и мультипиновые разъемы RS-232, RS-449. Витая пара бывает экранированной (Shielded Twisted Pair – STP, Foil Twisted Pair – FTP) и неэкранированной (Unshielded Twisted Pair – UTP).

Экранированная витая пара имеет дополнительный экран в виде фольги или металлической сетки. STP была разработана компанией IBM для сетей Token Ring (например, STP IBM Type 1). До сих пор не утвержден стандарт на экран из-за сложности заземления и высокой стоимости.

Еще с прошлого века в сетях передачи данных используется неэкранированная витая пара. EIA/TIA опубликовала документ – бюллетень TSB-36, где описала категории UTP в соответствии с частотными характеристиками полосы пропускания и параметры измерения этих кабелей (табл. 1.5) [10]. Применяемые в высокоскоростной передаче данных кабели UTP, согласно стандартам EIA/TIA 568, имеют 8 жил (4 пары) и определенные характеристики. Сертификацию кабельных систем производителей на соответствие этим характеристикам проводит с 1991 года специальная лаборатория – Underwriter’s Laboratories.

Таблица 1.5. Стандартные категории неэкранированной витой пары

Категория UTP	Полоса пропускания, МГц
3-cat3	16
4-cat4	20
5-cat6	100
5e-cat5e	125
6-cat6	250

Все кабели обычно имеют одинаковую конструкцию и отличаются плотностью и качеством навивки. Следует отметить, что измерения характеристик кабеля проводятся по 70 параметрам, на определенных частотах и при определенной температуре. Разработчикам ТКС необходимо обратить основное внимание на такие измеряемые характеристики неэкранированной витой пары, как:

- Attenuation (затухание);
- NEXT – near end crosstalk (перекрестное влияние на ближний конец);
- Impedance (полное сопротивление); 100 Ом для всех категорий $\pm 15\%$ на всех частотах (табл. 1.6) [10].

Таблица 1.6. Основные технические характеристики витой пары типа UTP

Частота, МГц	Cat3		Cat4		Cat5	
	Attenuation, дБ	Next, дБ	Attenuation, дБ	Next, дБ	Attenuation, дБ	Next, дБ
10	30	26	20	41	20	47
16	46	23	21	33	25	44
100	–	–	–	–	67	32

Общепризнанными достоинствами неэкранированной витой пары типа UTP являются дешевизна, совместимость с существующими телефонными кабельными системами, наличие множества стандартов, относительная простота инсталляции и относительно низкая стоимость диагностического оборудования.

Недостатком UTP является подверженность электромагнитным влияниям, что приводит к необходимости применения множества средств кодирования и скремблирования для обеспечения высокоскоростной передачи.

В ограниченных средах необходимо рассмотреть еще две категории.

Коаксиальный кабель состоит из двух проводников, находящихся на одной оси («со», «axis» – ось) и разделенных изолирующей оплеткой. В системах передачи данных больших компьютеров также применяются кабели, состоящие из трех проводников, – твинаксиальные (twinax). По своим характеристикам (полоса пропускания, максимальные расстояния) эти кабели находятся посередине между UTP и оптоволоконном. Для кабельного телевидения применяется 75-омный кабель RG-59 (PK-75). Для «старых» Ethernet-сетей, рассчитанных на скорость передачи 10 Мбит/с, использовали кабели RG-11 и RG-58. В современных высокоскоростных системах коаксиальные кабели не используются, т.к. являются более дорогими и более тяжелыми, чем UTP, однако приближаются по стоимости к оптоволокну.

Оптоволоконный кабель (Fiber) представляет собой тонкие светопроводящие стеклянные или пластиковые сердечники (core) в стеклянной светоотражающей оболочке (cladding), заключенной в защитную оплетку (jacket). Имеется множество конструкций оптоволоконного кабеля в зависимости от вида прокладки и требований по скорости передачи. В отличие от предыдущих видов кабельных систем оптоволокну невосприимчиво к электромагнитным воздействиям.

Существует два основных вида оптического волокна в зависимости от диаметра стеклянного сердечника и стеклянной отражающей оболочки:

- многомодовое волокно (multimode, MM; 62,5/125 и 50/125 мкм) рис. 1.22а);
- одномодовое волокно (singlemode, SM; 8–10/125 мкм) (рис. 1.22б).

На небольших расстояниях и относительно низких скоростях передачи применяются многомодовые кабели типа MM, на больших расстояниях и высоких скоростях – одномодовые типа SM. Световой пучок передается по разным видам оптоволоконна на разных длинах волн:

- многомодовое волокно – 850 и 1310 нм с затуханием 2,4 и 0,5 дБ/км соответственно;
- одномодовое волокно – 1310 и 1550 нм с затуханием 0,17–0,5 дБ/км.

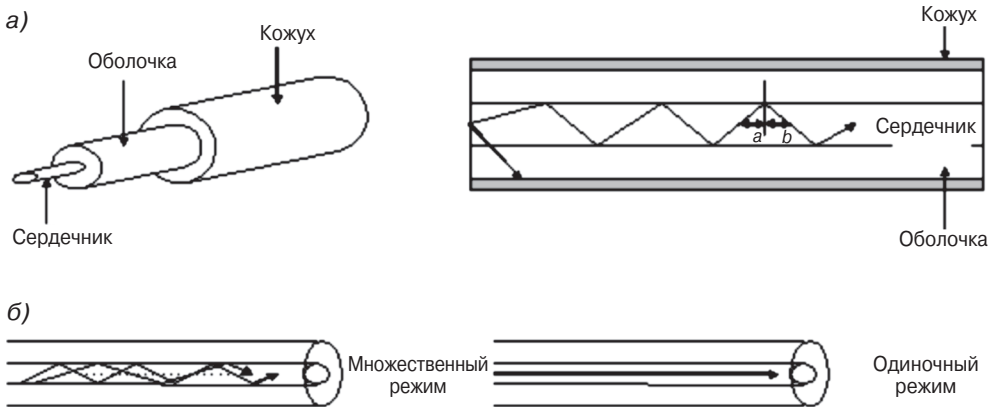


Рис. 1.22. Эскиз конструкции оптоволоконного кабеля типа ММ (а) и SM (б)

По одномодовому кабелю типа SM сигналы способны передаваться на сотни и даже тысячи километров, в зависимости от типа источника излучения, длины волны и скорости передачи данных. Поскольку визуально отличить многомодовое волокно от одномодового практически невозможно, большинство производителей стремятся облегчить эту задачу. Многомодовые кабели обычно имеют оранжевую оболочку, а одномодовые – желтую.

Оптоволоконные кабели имеют очень большую полосу пропускания и соответственно допускают высокую скорость передачи сигнала. Одномодовое волокно пропускает частоты до 50–100 ТГц. Свет по нему передается тонким пучком (одна мода), источником света является лазер. Потенциально лазеры могут генерировать световую несущую с частотой до 100 ТГц, а оптоволоконно может передавать сигнал с частотой до 1 ТГц, перекрываемое расстояние без регенерации может достигать 300 км в реальных условиях и 10 000 км в лабораторных.

Пластиковые оптоволоконные кабели имеют несколько другие конструкции, используют длину волны 660 нм и источники красного света, обеспечивают передачу максимум на скорости 50 Мбит/с на 100 м. Они не применяются для высокоскоростной передачи данных.

Достоинствами современных оптоволоконных кабелей являются: низкая стоимость (стеклянные компоненты значительно дешевле медных), легкость кабеля, очень высокая скорость передачи по сравнению с медными кабелями, нечувствительность к интерференциям и высокая защищенность от несанкционированного доступа.

Недостатками являются пока еще высокая стоимость соответствующего сетевого и диагностического оборудования, квалификационные требования к устанавливающему персоналу.

Надо отметить, что современные оптоволоконные системы передачи, помимо кабелей, включают целый ряд важных элементов:

- передатчики (transmitter, transceiver) – устройства, конвертирующие электрические сигналы в световые. Источником света может являться светодиод или лазер;

- приемники (receiver, transceiver) – устройства, конвертирующие световой сигнал в электрический. Основными его элементами являются обычно фотодиод и чип, регенерирующий и усиливающий сигнал;
- коннекторы и сплайс-разъемы, которые обеспечивают соединение оптоволоконных кабелей между собой, подключение к передатчикам и приемникам. Коннекторы бывают различных видов в зависимости от возникающих на них потерь мощности сигнала, неизменности этих потерь во времени, стоимости, возможности переустановки, видов оптоволокна.

В настоящее время широко применяют *ST-коннекторы* (рис. 1.23) [10]. Разъем ST впервые был разработан компанией AT&T в середине 1980-х годов и получил наибольшее распространение в оптических подсистемах локальных сетей. Он используется для соединения всех видов многомодового и одномодового оптоволокна, подключения старого сетевого оборудования. Коннектор прост, относительно дешев и легко устанавливается. Основным недостатком ST-коннектора считается необходимость вращательного движения при подключении к розетке соединителя. Для преодоления этого недостатка был разработан коннектор типа SC (корпорация NTT). *SC-коннектор* имеет механическую развязку наконечника, фиксирующего элемента и кабеля. Подключение и отключение производится линейно (push-pull). Коннекторы SC нашли широкое применение в одномодовых и многомодовых сетях с передачей данных на скорости от 100 Мбит/с. Новое оптическое активное оборудование, разработанное после 1995 года, выпускается только в вариантах с SC-портами.

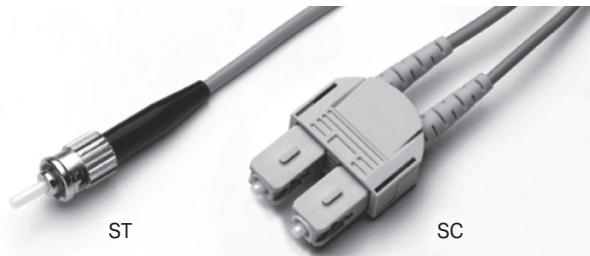


Рис. 1.23. Внешний вид коннекторов оптоволоконных кабелей

Коннекторы FC (корпорация NTT) ориентированы на применение в одномодовых линиях дальней связи и специализированных системах, а также в сетях кабельного телевидения. Соединители FC хорошо выдерживают вибрацию и удары.

В категории «неограниченные среды» принята более широкая классификация. Кратко рассмотрим основные виды.

Микроволновые системы передачи данных существуют в двух вариантах — спутниковые и наземные. Последние организуются, например, при помощи двух параболических антенн на крыше зданий, работают в нижней части гигагерцового диапазона и в условиях прямой видимости. Микроволновые системы являются дешевыми и высокоскоростными. Они чувствительны к интерференциям, прослушиваниям, атмосферным явлениям.

Лазерная передача осуществляется при помощи узкого пучка света, генерируемого лазером. Система работает на более высоких частотах, чем микроволновая

передача, и является более узконаправленной. В качестве излучателей используют лазеры, а в качестве приемников – фотодиоды. Лазерная передача устойчива к интерференциям, прослушиваниям, но сильно зависит от атмосферных явлений и работает на коротких расстояниях в условиях прямой видимости.

Для *инфракрасной передачи* данных используются инфракрасные диоды и фотодиоды с частотой выше 1000 ГГц. Скорости передачи данных близки к оптоволоконным системам, но перекрываемое расстояние не превышает 25 м при прямой видимости.

Под *радиопередачей* понимают передачу данных в диапазоне частот от 3 МГц до 3 ГГц. Радиосистемы широко распространены, имеют низкую стоимость и применяются для мобильных технологических приложений, радио (FM – передаваемый диапазон частот до 15 КГц), телевидения (передаваемый диапазон частот до 6 МГц). Скорости передачи данных относительно невысокие, и передача чувствительна к помехам и прослушиваниям.

В *беспроводных сетях (wireless)* – стремительно развивающийся класс категории «неограниченные среды» – передача данных осуществляется в ISM-диапазоне. ISM-диапазон (ISM – Industrial, Scientific and Medical) – это частоты, которые были зарезервированы разработчиками (правительственными органами США в 1985 году в гражданских целях и в 1950 году в военных целях) для промышленных (902–928 МГц), научных (2400–2483 МГц) и медицинских (5725–5850 МГц) целей. Осуществляется эта передача данных при помощи широкополосного, шумоподобного сигнала. В каждой сети есть свой уникальный код такого сигнала (реализуется при помощи чипа), позволяющий работать в данном регионе только тем, кто имеет такой же чип. Этот код (расширяющая псевдослучайная последовательность) добавляется к любому сообщению. Каждое сообщение может передаваться на целом спектре частот диапазона (spreading spectrum), которые могут быть несущими (spread sequence). Передающие устройства работают со скачкообразной псевдослучайной перестройкой частоты (hops). При получении сигнала из других таких сетей в данной сети он воспринимается как шум. Для беспроводных локальных сетей и решений последней мили утверждены стандарты IEEE 802.11 и 802.16. Диапазон используемых частот при этом был расширен до 11 ГГц, скорость до 135 Мбит/с, а радиус действия до 50 км.

Подводя итоги, можно сказать, что для ограниченных сред наиболее перспективной и очень интенсивно развивающейся технологией является оптоволоконная передача. Неограниченные среды используются при неэффективности прокладки кабельных систем (мобильные системы, высокая стоимость прокладки). В любых средах возможны симплексная, дуплексная, асинхронная и синхронная передача.

1.9. Структурированные кабельные системы

Для организации высокоскоростной передачи данных применяются два основных вида специализированных кабелей – витая пара и оптоволокно. Еще в 80-е годы прошлого века было обнаружено, что при уменьшающихся стоимостях таких кабелей и разъемов стоимость создания кабельных систем и особенно их модификация при переездах сотрудников растет и при этом резко превышает стоимость

систем телефонной связи. Решение проблемы нашла известная консультационная компания Gartner Group. Она предложила строить системы передачи данных по аналогии с телефонными системами — топология «звезда», структурированность системы (разбиение на функциональные модули) и кабелирование зданий не по числу сотрудников, а согласно эргономическим требованиям (в России это 6 кв. м на человека). Таким образом, число рабочих мест определяется делением площади здания, предназначенной для работы, на 6. Тогда же появилось понятие структурированных кабельных систем и соответственно стандарты EIA/TIA. Так как по кабельным системам зданий ведется передача данных и они подключены к компьютерам, возникли жесткие требования по пожарной безопасности и специальные тесты, которые проводит упомянутая выше UL (Underwriters Laboratories). Это тесты на соответствие следующим требованиям:

- предотвращение горения (изоляция и оболочка кабельной системы должны быть негорючими);
- отсутствие выделения дыма при пожаре;
- отсутствие токсичных выделений при пожаре (галогенов).

Кабелям, прошедшим этот тест, присваивается маркировка L(ow)S(moke)Z(ero)H(alogen). Существуют маркировки для коммуникационных кабелей, частично прошедших тесты (например, CMR или OFNR).

Подсистемы кабельной системы здания. Стандартная структурированная кабельная система (СКС) [10] состоит из совокупности подсистем, каждая из которых представляет набор кабелей, разъемов, соединителей и других продуктов, необходимых для экономичного решения проблемы передачи данных на данной территории. Согласно стандарту построения кабельных систем TIA/EIA 568 СКС имеет следующие характеристики:

- 1) топология любых подсистем: «звезда»;
- 2) типы устройств, соединяющих кабельные подсистемы: горизонтальный кросс (НС), промежуточный кросс (IC), главный кросс (МС) и аппаратная (ER) — помещение для активного сетевого оборудования (рис. 1.24);
- 3) между главным и горизонтальным кроссом должно быть не более одного кросса. Между любыми двумя горизонтальными кроссами должно быть не более трех кроссов;
- 4) максимальная длина горизонтального сегмента для витой пары не зависит от типа кабеля и составляет 90 м;
- 5) максимальная длина магистрального сегмента зависит от типа кабеля (табл. 1.7) [10].

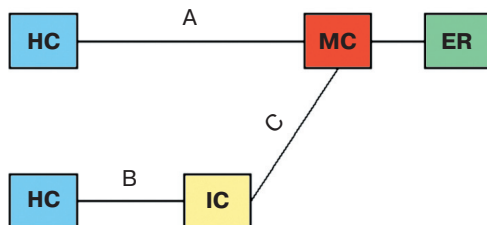


Рис. 1.24. Основные типы устройств, соединяющих кабельные подсистемы

Таблица 1.7. Максимальная длина магистрального сегмента

Вид кабеля	Максимально допустимое расстояние		
	А(НС-МС)	В(НС-МС)	С(ИС-МС)
Витая пара	90 м	90 м	90 м
Многомодовое волокно	2000 м	500 м	1500 м
Одномодовое волокно	3000 м	500 м	2500 м

При использовании промежуточного кросса ИС суммарное расстояние от НС до МС не должно превышать максимальной длины магистрального сегмента.

В стандарте TIA/EIA 568A определены следующие подсистемы структурированных кабельных систем:

- магистральная подсистема здания (building backbone);
- магистральная подсистема кампуса (campus backbone); кампус – это совокупность зданий, разнесенных на расстояния, не превышающие указанных в табл. 1.7 [10];
- горизонтальная подсистема здания (horizontal subsystem);
- административная подсистема (administrative subsystem);
- подсистема рабочих мест (workplace subsystem).

Помещения (НС, ИС, МС), где находятся кабельные соединительные устройства, называют телекоммуникационными клозетом – ТС, а помещения, где находится сетевое оборудование, называют аппаратными – ER (в небольших системах их объединяют с телекоммуникационным шкафом). Покажем эти подсистемы на схеме и опишем подробнее.

Подсистема рабочего места (рис. 1.25) служит для присоединения терминала, компьютера или телефона к горизонтальной подсистеме. Среда передачи – кабель UTP/STP/Coaxial. Присоединение осуществляется при помощи розетки рабочего места. Розетка может содержать специальный адаптер, согласующий сопротивление различных кабельных систем (balun).

Горизонтальная подсистема – это горизонтальная часть кабельной системы. Она соединяет телекоммуникационную розетку в зоне рабочих мест с административной подсистемой этажа в телекоммуникационном клозете. Среда передачи – STP/UTP/Coaxial/Fiber.

Административная подсистема состоит из совокупности коммутационных кабелей (патчкордов), устройств (патчпанелей), соединительных разъемов и блоков, которые подсоединяют горизонтальную подсистему к вертикальной системе здания. Административная подсистема располагается в телекоммуникационных шкафах.

Магистральная подсистема здания (Building Backbone) – вертикальная магистраль здания. Она обеспечивает соединение между узлами административной подсистемы. Среда передачи – UTP/Coaxial/Fiber. Подсистема имеет топологию «звезда», в которой каждый горизонтальный клозет (НС) соединен кабелем с главным (МС) или промежуточным (ИС) клозетом.

Campus Backbone (Metropolitan Backbone) – кампусная магистраль соединяет различные здания на ограниченной территории. В табл. 1.7 показано, что согласно стандартам протяженность этой магистрали определяется видом оптоволокна и составляет 2500 м для многомодового волокна и 3000 м для одномодового.

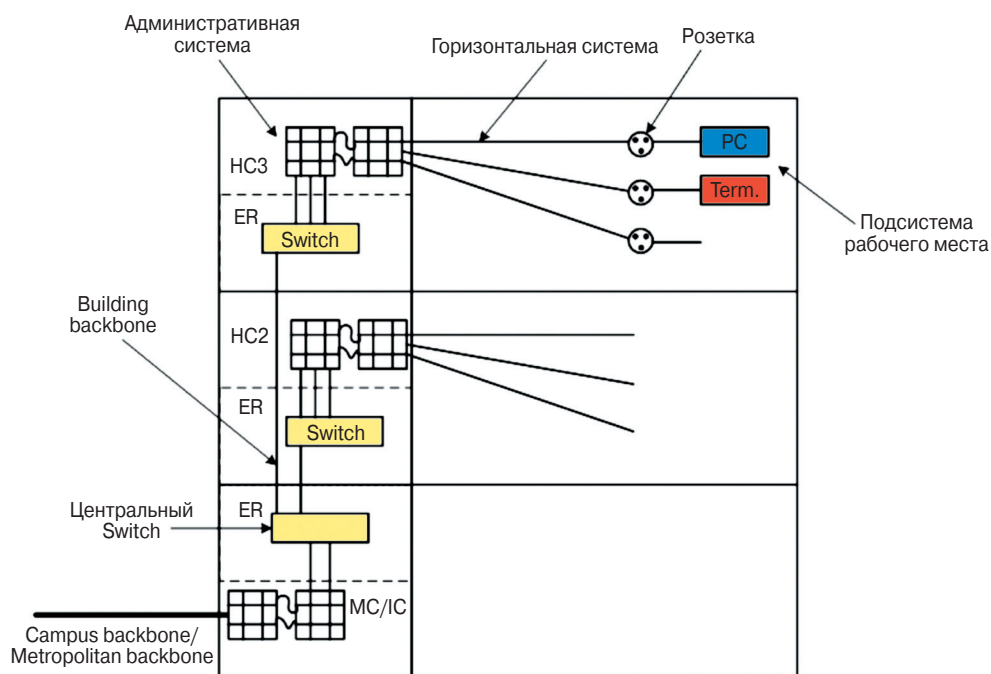


Рис. 1.25. Типовая подсистема СКС

В общем, такая ограниченная территория соответствует территории локальной сети. Средой передачи обычно является оптоволокно. Топология подсистемы – «звезда», в центральном здании находится главный кросс. В главном кроссете здания или кампуса осуществляется подключение к городской магистрали или глобальной сети (WAN). Если в кампусе несколько зданий, то главный кроссет устраивают в том здании, к которому подходит городская магистраль, а в каждом из остальных зданий устраивается промежуточный кроссет.

Стандарты EIA/TIA. Создание кабельных систем основывается на множестве стандартов. Здесь приведем только основные стандарты, необходимые для осуществления высокоскоростной передачи данных [10]:



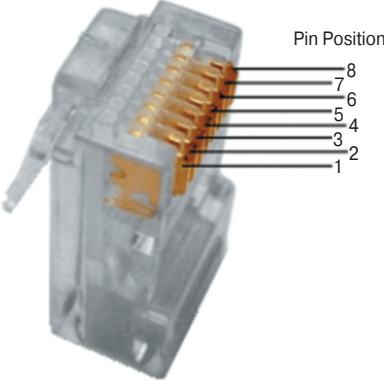













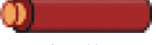
- EIA/TIA 568 – стандарт создания телекоммуникаций служебных и производственных зданий, планирование кабельных систем зданий, методика построения системы телекоммуникаций служебных и производственных зданий;
- EIA/TIA 569 – стандарт описывает требования к помещениям, в которых устанавливается структурированная кабельная система и оборудование связи;
- EIA/TIA 606 – стандарт администрирования телекоммуникационной инфраструктуры в служебных и производственных зданиях;
- EIA/TIA 607 – описывает требования к инфраструктуре телекоммуникационной системы заземления и выравнивания потенциалов в служебных и производственных зданиях.

Чаще всего при подключении компьютеров используются патчкорды и разъемы RJ-45 для UTP. Существует два стандарта правильного присоединения витой

пары (8 жил) к разъему RJ-45: TIA-568A и TIA-568B. С точки зрения электрических характеристик они идентичны. Разница заключается только в цветовой раскладке жил кабеля. Во всем новом сетевом оборудовании обычно используется стандарт TIA-568A.

Приведенный в табл. 1.8 стандарт указан для разъемов и кабелей любых производителей. При этом надо учесть, что для патчпанелей или модулей розеток цветовая раскладка у каждого производителя своя и надо выяснять по конкретной технической документации производителя, что соответствует раскладке 568A для данного устройства.

Таблица 1.8. Раскладка стандарта TIA-568A/B [10]

Раскладка T568A/B RJ-45					
Пин	T568A Пара	T568B Пара	T568A Цвет	T568B Цвет	Пины на лицевой стороне коннектора (в гнезде – наоборот)
1	3	2	 бело-зеленая полоса	 бело-оранжевая полоса	
2	3	2	 целиком зеленый	 целиком оранжевый	
3	2	3	 бело-оранжевая полоса	 бело-зеленая полоса	
4	1	1	 целиком синий	 целиком синий	
5	1	1	 бело-синяя полоса	 бело-синяя полоса	
6	2	3	 целиком оранжевый	 целиком зеленый	
7	4	4	 бело-коричневая полоса	 бело-коричневая полоса	
8	4	4	 целиком коричневый	 целиком коричневый	

Patch cord (патчкорд) – это кабель, присоединяющий компьютер к розетке или сетевое оборудование к коммутационной панели (патчпанели). Чаще всего для этого используют UTP кабель с RJ-45-разъемом или оптоволокну с SC-разъемом. Максимальная длина патчкорда UTP рабочего места не должна превышать 3 м, а длина патчкордов в кроссе – 6 м.

Если нужно просто соединить рабочую станцию (PC) и коммутатор (switch) или подсоединить компьютер к розетке, то всегда используется «direct»-разводка. Это означает, что оба разъема патчкорда присоединяются к отрезку кабеля UTP

по TIA-568A раскладке (1-й и 2-й пины – передача, 3-й и 6-й – прием). При соединении коммутаторов (маршрутизаторов) между собой патчкорды делают с «crossover»-разводкой TIA-568B (1-й пин подсоединен к 3-й жиле, а 2-й пин к 6-й). Современное высокоскоростное сетевое оборудование имеет специальные порты – MDI-X (media dependent interface cross), в которых на микросхемном уровне выполнено соединение цепи передачи на вход приемника и наоборот. В этом случае нет необходимости иметь «crossover»-патчкорды.

Для высокоскоростной передачи данных очень важна среда передачи. Группы компьютеров должны соединяться между собой структурированными кабельными системами. Такие системы состоят из модулей-подсистем (горизонтальная, административная, магистраль здания, магистраль кампуса, подсистема рабочего места) и строятся по стандартам EIA/TIA.

1.10. Топологии высокоскоростных систем передачи данных

В общем случае различают два типа топологий системы: физическая и логическая. Физическая топология – это расположение физических устройств и связь между ними. Логическая топология отражает путь передачи данных по сети.

В сетях передачи данных используются понятия «точка-точка» (непосредственное взаимодействие двух устройств по линии связи) и «точка-мультиточка» (взаимодействие трех и более устройств, причем одно из них действует в качестве корневого узла). В первом случае не требуется адресация устройств (она и так понятна), во втором случае требуется разделять канал передачи данных между устройствами, указывать адреса устройств и определить метод доступа в канал передачи данных.

Можно выделить следующие классы сетевых топологий [10]: полносвязная, смешанная, радиально-узловая («звезда», иерархическая «звезда»), кольцо, шина, гибридная. Следует обратить внимание на то, что не существует стандарта на эти понятия.

При использовании *полносвязной топологии* устройства в сети (nodes, узлы) соединяются по принципу «каждый с каждым». Эта топология не используется в современных сетях, так как при наличии N узлов каждый узел должен иметь $(N - 1)$ интерфейс, что абсолютно не реально.

В сети на основе *смешанной топологии* (рис. 1.26) каждый узел соединяется с несколькими соседними узлами, так что в сети образуются петли. Смешанная топология используется при построении крупных, территориально распределенных сетей.

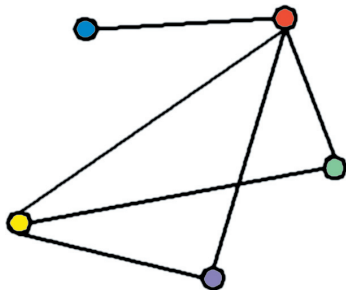


Рис. 1.26. Пример смешанной топологии

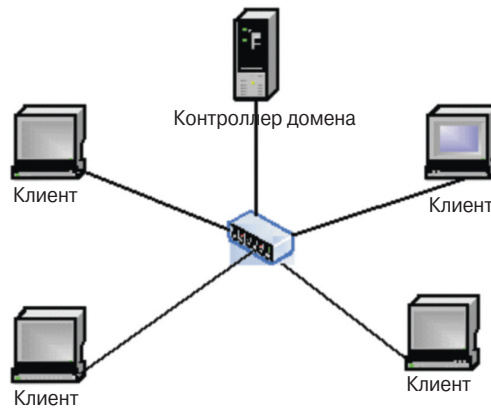


Рис. 1.27. Сеть с физической топологией «звезда»

Все устройства сети с топологией «звезда» (рис. 1.27) подключены по топологии «точка-точка» к центральному устройству. Центральным устройством в такой сети является хаб (hub – повторитель, концентратор) или коммутатор (switch). Хабы и коммутаторы могут соединяться друг с другом по топологии «иерархическая звезда».

Пассивный концентратор осуществляет простое соединение без регенерации и усиления сигнала (в оптоволоконных системах это сплиттеры). Активные концентраторы, помимо соединения всех устройств, регенерируют и усиливают сигнал (физический уровень).

Современные коммутаторы выполняют в сети функции до 3–4-го уровня ЭМВОС. В сетях топологии «звезда» легко обнаруживать ошибки (именно поэтому она используется во всех современных вариантах Ethernet). Однако такая сеть требует большого количества кабеля, и поэтому стремятся использовать относительно дешевую витую пару UTP. В случае выхода из строя центрального устройства вся сеть перестает функционировать.

В сети с топологией «шина» используется линейное подключение устройств к отрезку кабеля (рис. 1.28). Очень экономная и простая топология, но трудно локализовать неисправности оборудования и сбой МО. Сеть неэффективна с точки зрения модификации (расширения) системы. Примером являются старые версии Ethernet на коаксиальном кабеле (10Base-5 и 10Base-2).



Рис. 1.28. Сеть с физической топологией «шина»

Топология «кольцо» представляет собой кольцо повторителей или коммутаторов. Такая сеть обеспечивает соединение «точка-точка» между двумя соседними узлами. Подчеркнем, что это не кольцо рабочих станций. Примером может служить сеть FDDI.

И наконец, *гибридные топологии* комбинируют топологии «звезда», «шина», «кольцо». Это наиболее часто реально используемая топология. Примером является сеть Token Ring, которая в общем случае имеет комбинированную звездно-кольцевую конфигурацию. Гибридные топологии наиболее распространенные в современных системах передачи данных.

1.11. Методы организации доступа в высокоскоростные каналы

Если два устройства соединены друг с другом в варианте точка – точка, то нет необходимости использовать сложные правила передачи данных. Передающее устройство передает данные в любое нужное время. Но, если несколько устройств разделяют канал передачи (сеть с топологией «шина»), нужен метод, который позволит каждому из устройств передавать информацию без наложения на передачу другого устройства. *Метод доступа* в канал – это правила, которые описывают, как устройства разделяют канал связи, обращаются к каналу и освобождают его. Существует три основных метода доступа в канал: соревнование, голосование, передача маркера. Теоретически метод доступа в канал не зависит от топологии сети. Но практически в каждой топологии реализуется определенный метод доступа. При этом метод доступа влияет на эффективную скорость передачи данных, т.е. реальную пропускную способность сети.

Кратко рассмотрим эти методы [10].

При *соревновательном методе* доступа любое устройство пытается начать передачу тогда, когда захочет. Нет арбитра, который бы разрешал или запрещал работу. Естественно, если два или более устройства передают одновременно, то происходит искажение передаваемых кадров – коллизия. Существуют протоколы, при использовании которых устройства прослушивают сигнал в канале связи (несущую) до начала передачи и определяют, можно ли передавать кадр в данный момент или следует отложить передачу во избежание коллизии. Такие протоколы называются CSMA (carrier sense multiple access, множественный доступ с контролем несущей). При этом существует два типа множественного доступа: с обнаружением коллизий CSMA/CD (например, IEEE 802.3 Ethernet) и с предупреждением коллизий CSMA/CA (IEEE 802.11 Wi-Fi). В современных приложениях обычно CSMA/CA используется в неограниченных средах, а CSMA/CD в ограниченных. Топологией сети является «звезда». Достоинством этих методов доступа является их простота, а недостатком то, что время доступа предсказуемо только исходя из статистических соображений, и сложность задания приоритетов устройствам для ускорения доступа. На рис. 1.29 приведена временная диаграмма, иллюстрирующая метод доступа CSMA/CD в сети с равноправными устройствами. Рассмотрим понятие коллизии для сетей Ethernet с топологией «шина».

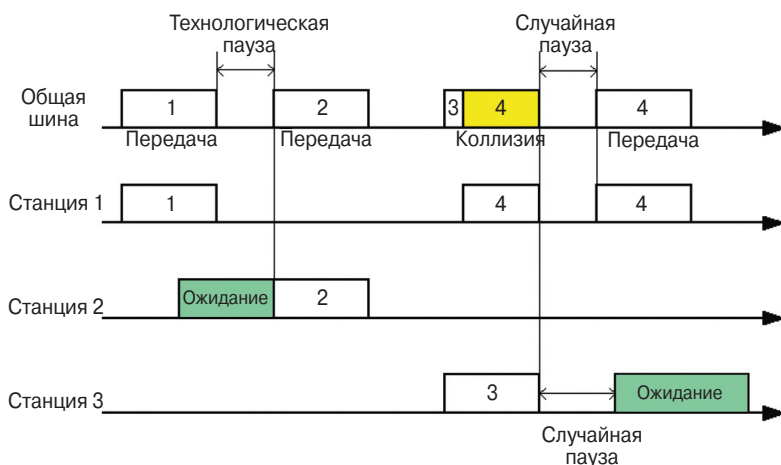


Рис. 1.29. Метод доступа CSMA/CD

Все подключенные устройства (рабочие станции) «прослушивают» общий канал связи (шину) с целью определения его состояния — занят или свободен и копирования передаваемого по шине кадра в приемный буфер, если кадр адресован данному устройству сети.

Станция может начать передачу кадра, если канал свободен. Если канал занят, передача кадра откладывается. Начав передачу, станция продолжает контролировать состояние канала, сравнивая вид отправленного сигнала с тем, который присутствует в линии связи. При обнаружении конфликта (коллизии) станции, участвующие в коллизии, должны прекратить передачу. Передача может быть возобновлена по истечении случайного промежутка времени. Конфликты являются нормальным, хотя и нежелательным явлением в сетях с множественным (коллективным) доступом к общей среде передачи.

При *методе доступа «голосование» (polling)* одно устройство опрашивает и контролирует остальные устройства сети, выступая как администратор доступа (master, controller). Обычно топологией сети является «звезда» или «шина». Примером реализации может служить контроллер мейнфрейм, опрашивающий терминалы, или кластер-контроллер сервера. В неограниченных средах метод частично используют протоколы семейства 802.16d (Wi-Max). При этом базовая станция выделяет каждому из устройств полосу частот для работы при входе в сеть (соревнование устройств имеет место только при первоначальном входе в сеть) и может задать приоритеты устройствам согласно выделяемой полосе. Достоинством доступа голосованием является предсказуемость минимального и максимального времени доступа, возможность присвоения приоритетов трафику.

При *маркерном (token) способе передачи данных* можно начать при получении маркера — специфического маленького пакета определенного формата. Обычно он вырабатывается устройством сети с наименьшим адресом. Устройство, получившее маркер, контролирует канал, пока владеет маркером. По очереди контроль канала осуществляется каждым из устройств в сети по правилам, установленным протоколом. Примером реализации этого метода доступа является сеть IEEE 802.5

Token Ring (маркерное кольцо). Обычно логической топологией сети является кольцо. Достоинством маркерных методов доступа является предсказуемость времени передачи, множество возможностей по управлению трафиком. Недостатком является их сложность, так как каждое устройство в сети должно уметь делать все, иметь полную функциональность. Поэтому устройства сети имеют сложное МО.

В современных высокоскоростных сетях используется комбинация возможностей описанных методов доступа (например, IEEE 802.3 Ethernet – CSMA/CD сети с дополнительными функциями управления 802.1).

Подводя кратко итоги вышеизложенного, следует отметить, что методы доступа к среде передачи можно разделить на *вероятностные* (CSMA) и *детерминированные* (голосование, маркерный доступ). Общий недостаток вероятностных методов доступа – неопределенное время прохождения кадра через сеть, резко возрастающее при увеличении поступающей в сеть нагрузки. При детерминированном методе узлы получают доступ к среде в predetermined порядке. Этот порядок определяется контроллером сети, который может быть централизованным (его функции может выполнять, например, сервер) или/и распределенным (функции выполняются оборудованием всех узлов).

1.12. Технологии коммутации

В телекоммуникационных сетях используют три основные технологии коммутации: коммутация каналов (КК), коммутация сообщений (КС) и коммутация пакетов (КП) [10].

При «коммутации каналов» (*circuit switching*) устанавливается физическое соединение между передающим и принимающим устройствами (А и М) (рис. 1.30). Примером является соединение в телефонной сети ТФ-ОП или сети ISDN. Соединение, установленное в сети с коммутацией каналов, сохраняется до конца сеанса связи, независимо от того, ведется передача информации или нет, и разрушается по инициативе одного из оконечных устройств. Достоинствами такого метода коммутации является его простота и отсутствие задержек при передаче информации после установления соединения. К недостаткам можно отнести неэффективное использование пропускной способности канала из-за наличия временных пауз в информационном потоке между оконечными устройствами и возможные отказы сети на запрос установления соединения. При строительстве современных высокоскоростных сетей такая коммутация практически не применяется.

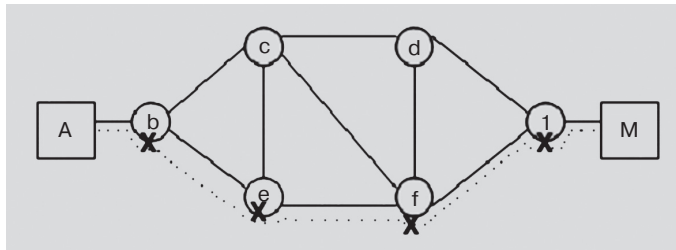


Рис. 1.30. Схема передачи информации в сети с КК

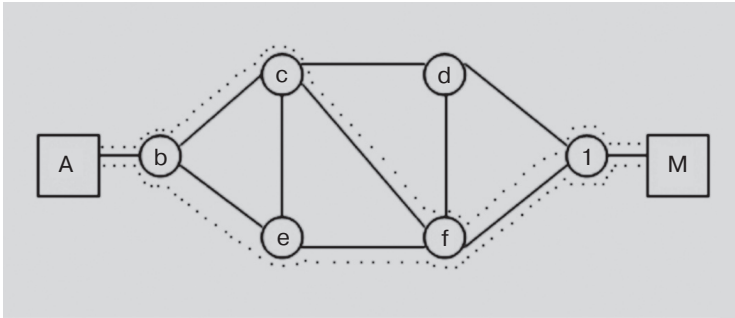


Рис. 1.31. Схема передачи информации в сети с КС

«Коммутацией сообщений» (*message switching*) называется совокупность операций по приему узлом сети от оконечного устройства или другого узла целого сообщения (файла, блока данных), хранению принятого сообщения в памяти узла и последующей передаче в соответствии с содержащимся в нем адресом. Таким образом, сообщение поэтапно, с переприемом в каждом узле, передается через ряд узлов в пункт назначения. Передающая станция (источник) (рис. 1.31) [10] снабжает сообщение адресом получателя (Destination Address, DA) и собственным адресом (Source Address, SA). Разные сообщения между отправителем и получателем (А и М) могут проходить в сети разными путями.

Примером реализации данного метода коммутации может служить телеграфная сеть. В компьютерных сетях в чистом виде этот вид коммутации не применяется, хотя сама идея «store and forward» (запомни и отправь) используется в системах передачи почты (MHS-message handle systems).

Узлы сети с коммутацией сообщений должны иметь буферную память неопределенного размера и большое дисковое пространство для временного хранения данных. Возникают сложности при работе в режиме реального времени из-за непредсказуемых и больших задержек сообщения в сети. К достоинствам такого метода коммутации можно отнести более эффективное, чем при коммутации каналов, использование каналов сети (сообщения передаются по очереди, использование каналов достигает 95–98%), широкие возможности по управлению трафиком, возможность отправить одно сообщение многим (broadcast messages).

Метод коммутации пакетов (*packet switching*) является основным в компьютерных сетях и впервые был предложен Rand Corporation, а затем широко внедрен при реализации сети ARPANET (1964–1967 гг.). Передаваемое сообщение (рис. 1.32) [10] разбивается на относительно короткие части (пакеты), каждый из которых снабжается заголовком (служебная информация). Предполагается, что такой пакет имеет адрес источника и адрес отправителя (SA и DA). Так как пакет имеет фиксированную максимальную длину, то не требуется дисковой памяти для его хранения, достаточно оперативной памяти, что значительно сокращает задержки передачи.

Существует два метода пакетной коммутации: *передача дейтаграмм (datagram)* и *передача по виртуальным каналам (virtual circuit)*. Рассмотрим разницу между этими методами.

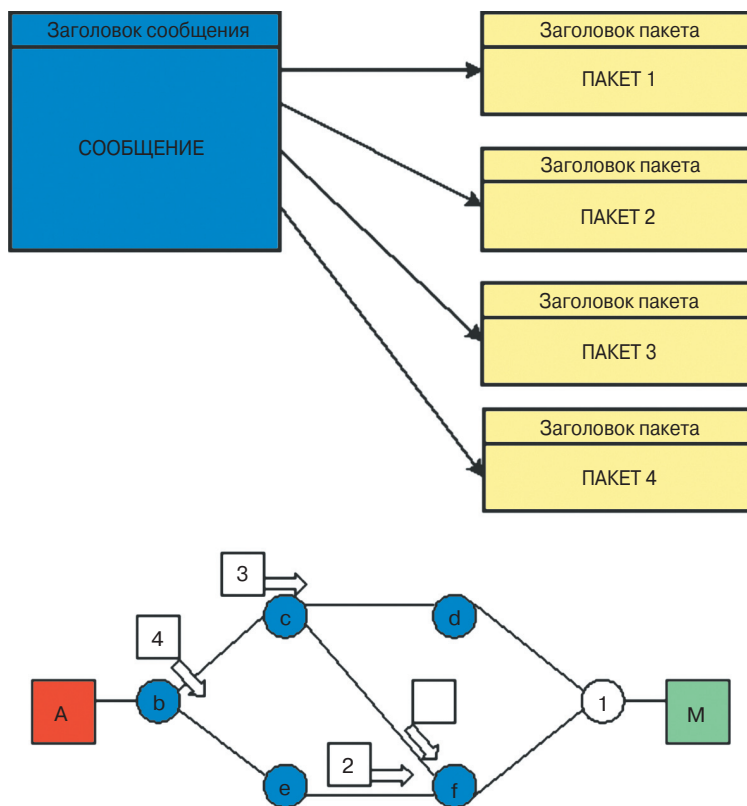


Рис. 1.32. Схема передачи информации в сети с КП

При передаче в дейтаграммном режиме каждый пакет содержит адреса отправителя и получателя, служебную информацию и последовательный номер пакета в сообщении. Дейтаграммы, принадлежащие одному сообщению, движутся в сети независимо друг от друга. Принимающее устройство собирает сообщение из пакетов согласно их номерам. Длина пакета достаточно существенна. Можно осуществлять передачу длинными пакетами (применяется в сетях Ethernet) или короткими пакетами (сети АТМ). Слишком длинные пакеты приближают сеть к сети с коммутацией сообщений. Время задержки в сети увеличивается, эффективность сети падает. Слишком короткие пакеты заметно увеличивают долю служебной информации (накладные расходы), так как каждый пакет имеет заголовок фиксированной длины.

При передаче по виртуальным каналам создается логическое соединение между устройствами (logical connection), т.е. в сети организуется маршрут для передачи пакетов определенного информационного потока (сообщения). Соединение устанавливается до начала передачи данных путем обмена служебными пакетами между отправителем и получателем. В них содержатся параметры передачи (максимальный размер пакета с данными, путь передачи, скорость передачи, необходимость подтверждения о доставке (acknowledgement), согласование процедуры контроля над ошибками и процедуры управления соединением). В оперативной памяти каждого узла, через который проходит служебный пакет, резервируется буферная зона для

промежуточного накопления пакетов данных, которые будут передаваться по данному виртуальному соединению. В маршрутной таблице каждого узла служебный пакет оставляет распоряжение, имеющее следующий смысл: пакеты, имеющие в заголовке логический номер (номер виртуального канала) *K*, поступающие по входящей физической линии *a*, следует направлять в исходящую физическую линию *b* и присвоить им номер виртуального канала *L*. На каждом участке сети (между узлами или между узлом и присоединенным компьютером) имеет место свой номер виртуального канала, который устанавливает отправитель пакета на этом участке. Таким образом, виртуальное, т.е. условное, логическое соединение существует только в памяти узла коммутации. Практически в одном физическом канале может быть организовано несколько сот и даже тысяч виртуальных каналов.

Логическое соединение может быть временным (*SVC*, устанавливается на один сеанс связи) или постоянным (*PVC*, сохраняется длительное время, обычно до нескольких месяцев).

Передача при помощи дейтаграмм более гибкая, требует меньше затрат на администрирование, но менее надежна, чем передача по виртуальным каналам.

Пакетная коммутация требует сложных программных решений и быстрых устройств коммутации, и это сдерживало ее развитие раньше. При пакетной коммутации обеспечиваются малые задержки пакетов внутри сети, так как нет длинных сообщений и, следовательно, нет задержек в буферной памяти узлов. Имеются широкие возможности управления трафиком (можно иметь различные алгоритмы поиска маршрутов и обходить загруженные участки сети). Поэтому пакетная коммутация реализована во всех современных высокоскоростных системах передачи данных.

Итак, подводя итоги, следует констатировать, что существуют три основных метода коммутации: коммутация каналов, коммутация сообщений и коммутация пакетов. Коммутация каналов характеризуется минимальными задержками после выделения канала, но неэффективным использованием пропускной способности канала. Коммутация сообщений использует переприем сообщения в каждом узле. Задержки могут быть значительными, хотя каналы сети используются намного эффективнее. Коммутация пакетов подразумевает баланс между параметрами задержки и эффективностью использования канала. С появлением высокоскоростных и управляемых коммутирующих устройств коммутация пакетов является основным методом коммутации в сетях.

1.13. Особенности организации связи сегментов телекоммуникационных сетей

После решения проблемы объединения отдельных компьютеров в сети (80-е годы прошлого века) возникла необходимость соединять сети компьютеров между собой [10]. Это соединение осуществляется при помощи специальных устройств – коммутаторов, маршрутизаторов и других устройств. Возник термин «сегмент сети» – часть сети, которая не содержит соединяющих устройств. Устройства, соединяющие сети (сегменты одной большой сети), подразделяются на виды в зависимости от уровня ЭМВОС, на котором они работают (табл. 1.9).

Таблица 1.9. Функциональный уровень представления сетевых устройств

1 уровень	Усилители/репитеры/хабы
1 уровень	Усилители/репитеры/хабы
3 уровень	Маршрутизаторы (роутеры)/ шлюзы

Как известно, сигнал, проходя по кабельной системе, изменяется под действием различных помех и затухает, из-за чего кабельная система ограничивает передачу данных по расстоянию. Поэтому в сетях применяют устройства, способные усилить и восстановить форму сигнала.

Структура, известная как хаб (hub), не производит анализа информации. Она на мгновение запоминает значения сигнала «0» или «1», соответствующим образом их регенерирует, усиливает и отправляет во все присоединенные сегменты сети. Теоретически эти функции должны выполняться на пути от источника до получателя столько раз, сколько необходимо. На практике многие сети ограничивают количество хабов. Например, в версиях 10Base Ethernet на коаксиальном кабеле число хабов не должно превышать четырех (пять сегментов сети).

Если в сети большой трафик, то целесообразно разделить ее на сегменты, в которых компьютеры чаще всего работают между собой. Для этого применяют так называемые мосты (*bridge*), которые пересылают сообщение не всем устройствам сети, а только в тот сегмент сети, в котором находится получатель. Мосты – это устройства, разделяющие сети. Они работают с физическими адресами станций на канальном уровне протоколов ЭМВОС. В отличие от хаба мост может разрешать доступ к физическим устройствам либо запрещать его, т.е. способен регулировать трафик. В процессе работы мост опрашивает устройства сети, записывая в специальной хэш-таблице в оперативной памяти адреса новых устройств.

Работая в сегменте 1 (рис. 1.33) [10], каждый такой мост получает все кадры этого сегмента, игнорирует кадры, адресованные станциям сегмента 1, а кадры, адресованные станциям сегмента 2, передает на соответствующий порт.

При соединении нескольких сетевых сегментов (рис. 1.34) мосты должны осуществлять маршрутизацию кадров. Существует три типа протоколов маршрутизации мостов [10]:

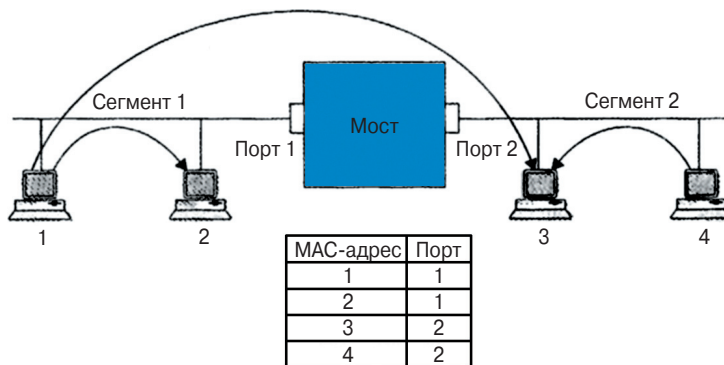


Рис. 1.33. Схема соединения двух сегментов сети при помощи моста

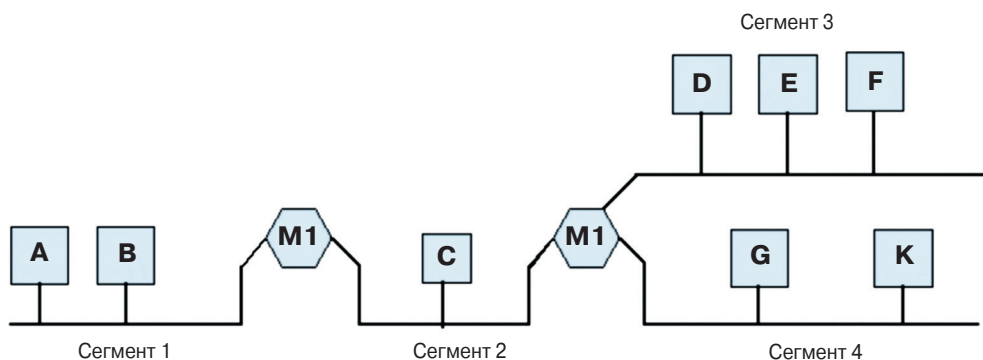


Рис. 1.34. Структура из четырех сегментов (сегменты 1–4) и двух мостов (M1 и M2)

- TR или STA (transparent, прозрачный или обучающийся) – использует алгоритм STA (Spanning Tree Algorithm), который применяется, например, во всех версиях коммутируемого Ethernet;
- SR (source routing, маршрутизация от источника) – информация о маршруте содержится в каждом передаваемом пакете; используется в сети Token Ring IBM;
- SRT (source routing transparent) – комбинация двух перечисленных выше типов.

TR или STA мосты не требуют какого-то начального программирования при включении (инициализации). Они анализируют трафик и «выучивают» принадлежность адресов устройств к сегментам сети (каждый порт ассоциируется с одним сегментом). Такой мост создает динамическую базу данных адресов устройств и определяет, передать или удалить кадр согласно адресу получателя. Обычно эти мосты применяются в сетях, имеющих топологию «иерархическая звезда»: центральный мост и каждый луч «звезды» представляют собой дерево мостов. Такое объединение называют «collapsed backbone». Протокол называют прозрачным, так как он прозрачен для станций сети (каждая станция может связываться с любой другой как в одном большом сегменте, не думая о маршруте) и при этом прозрачен для протоколов, начиная с сетевого уровня и выше.

Мосты с маршрутизацией от источника SR (рис. 1.35) [10] применяются для соединения колец Token Ring и FDDI. Мосты объединяются в кольцо, а к каждому мосту, в свою очередь, присоединяется еще кольцо станций. Такое объединение называют «token backbone». Отправитель помещает в каждый посылаемый кадр всю адресную информацию о промежуточных мостах и кольцах, которые должен пройти кадр, перед тем как попасть в кольцо, к которому подключена станция-получатель. Для задания маршрута мосты и кольца имеют идентификаторы.

SR-мосты при продвижении кадров используют информацию из соответствующих полей кадра данных. Для работы алгоритма маршрутизации от источника используются два дополнительных типа кадра: SRBF (single-route broadcast frame, одномаршрутный кадр-исследователь) и ARBF (all-route broadcast frame, многомаршрутный кадр-исследователь). SR-мосты конфигурируются администратором, чтобы передавать кадры ARBF на все порты, кроме порта-источника кадра, а для кадров SRBF некоторые порты мостов нужно заблокировать, чтобы в сети не было петель.

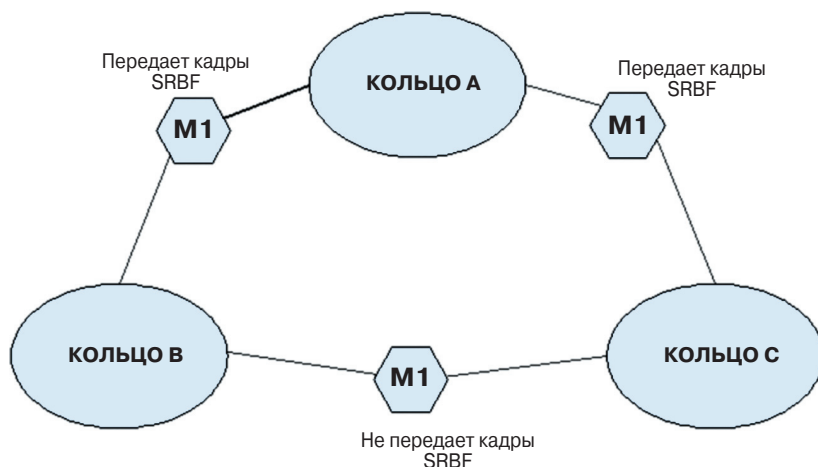


Рис. 1.35. Схема соединения кольцевых сегментов с помощью SR-мостов M1

Кадр-исследователь SRBF посылается станцией-отправителем, если станция-получатель находится в другом кольце и неизвестно, через какие мосты и кольца пролегает путь до этой станции. SRBF, распространяясь по всем кольцам сети, доходит до станции-получателя. В ответ станция-получатель отправляет многомаршрутный широковещательный кадр-исследователь ARBF. Этот кадр передается мостами через все порты. Станция-отправитель получает в общем случае несколько кадров-ответов, прошедших по всем возможным маршрутам составной сети, и выбирает наилучший маршрут (обычно по количеству пересечений промежуточных мостов).

SRT-мосты работают как TR, если в кадре нет маршрутизирующей информации, и как SR – если такая информация есть.

Мосты очень быстрые и дешевые устройства, но в целях обеспечения прозрачности они вынуждены передавать весь общий служебный (broadcast, multicast) трафик во все сегменты сети. Кроме того, при работе с сегментами, где имеется различная скорость передачи данных, мосты становятся узким местом, так как не умеют ею управлять. Применимы они только в небольших сетях (до 50 пользователей).

Коммутатор – это мультипортовый мост. Он обеспечивает передачу кадров (ячеек в сети ATM) от станции к станции в режиме точка-точка (point to point). При этом станции в сети работают параллельно, т.е. передача может вестись одновременно между всеми парами портов. Коммутация осуществляется по физическим адресам устройств (MAC-адресам). При этом при помощи специальных протоколов третьего уровня ЭМВОС осуществляется масса функций управления сетевым трафиком.

Различают два типа коммутации [10]:

- «буферная» (store and forward), если скорость передачи кадров по каналу превысит максимальную скорость их обработки, при этом буфер может переполниться, и продолжающие приходить кадры будут отвергаться;
- «обрезная», «сквозная» (cut-through); коммутаторы, использующие эту форму коммутации, называются сквозными, и они начинают транслировать кадр в выходной порт сразу по получении заголовка, не дожидаясь окончания приема фрейма. Приведем пример работы коммутатора.

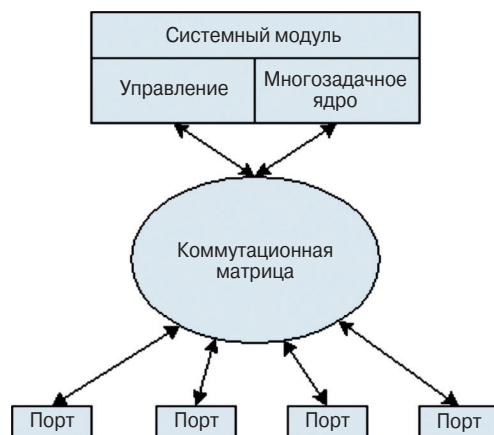


Рис. 1.36. Функциональная схема коммутатора фирмы Kalpana

На рис. 1.36 [10] показана функциональная схема коммутатора EtherSwitch, предложенного фирмой Kalpana в 1990 году.

В этом коммутаторе системный модуль поддерживает общую адресную таблицу коммутатора. Коммутационная матрица отвечает за пересылку кадров между портами. Каждый порт имеет свой процессор кадров. При поступлении кадра в один из портов его процессор отправляет в буфер несколько первых байт, чтобы прочитать адрес назначения. После определения адреса процессор принимает решение о передаче кадра, не анализируя остальные байты. По адресной таблице выбирается соответствующий выходной порт. Коммутационная матрица формирует соединение входного и выходного портов. Если полученный адрес отсутствует в адресной таблице, он записывается в новой строке, а кадр передается методом широкого вещания через все порты, за исключением принявшего.

Отдельного рассмотрения требуют устройства маршрутизаторов (роутеров). *Маршрутизатор (router)* – это устройство, работающее на сетевом уровне ЭМВОС и использующее одну или более метрик для определения оптимального пути передачи сетевого трафика на основании информации (заголовка пакета) сетевого уровня. Путь оценивается количественными показателями, которые называются метриками. Лучший путь – это путь с наименьшей метрикой.

На основании информации об устройствах в сети (таблицы маршрутизации) и определенных правил (протоколы маршрутизации) маршрутизатор выбирает выходной физический порт для пересылки пакета сетевого уровня получателю или следующему на пути маршрутизатору.

На сетевом уровне создается логический адрес сети. Этот адрес присваивается операционной системой или администратором системы просто для идентификации группы компьютеров. Такую группу иначе называют «subnet» (подсеть). Подсеть может совпадать с физическим сегментом, а может не совпадать. Надо помнить, что физические адреса устройств задаются производителем аппаратуры (аппаратно или при помощи программного обеспечения). Например, физический адрес рабочей станции – это уникальный адрес сетевого адаптера, который прошивается производителем. База данных физических адресов ведется компанией Хехох. Двух

устройств с одним физическим адресом в сети не может быть. Маршрутизаторы не видят физических адресов, они пересылают информацию по логическим адресам подсетей.

Определение маршрута передачи данных происходит программно. Соответствующие программные средства носят названия протоколов маршрутизации. Логика их работы основана на алгоритмах маршрутизации. Простейшие алгоритмы маршрутизации определяют маршрут на основании наименьшего числа транзитных узлов на пути к адресату. Более сложные алгоритмы учитывают несколько показателей, например задержку при передаче пакетов, пропускную способность каналов связи или денежную стоимость связи. Основным результатом работы алгоритма маршрутизации является создание и поддержка таблицы маршрутизации, в которую записывается вся маршрутная информация.

Наиболее известные протоколы динамической маршрутизации, которые есть обычно у всех маршрутизаторов, это *протокол RIP (Routing Internet Protocol)* и *протокол OSPF (Open Shortest Path First)*.

RIP использует в качестве метрики пути число переходов через маршрутизаторы (hops). Максимально разрешенное число переходов – 15. Маршрутизатор с определенной периодичностью (по умолчанию через каждые 30 с) извлекает адреса получателей информации и метрики из своей таблицы маршрутизации и помещает эти данные в рассылаемые соседним маршрутизаторам сообщения об обновлении. Соседние маршрутизаторы сверяют полученные данные со своими собственными таблицами маршрутизации и вносят необходимые изменения. После этого они сами рассылают сообщения об обновлении. Таким образом, каждый маршрутизатор получает информацию о маршрутах всей сети. Протокол RIP может работать эффективно только в небольших сетях.

OSPF более сложный протокол, относится к протоколам состояния канала и ориентирован на применение в больших гетерогенных сетях. Для выяснения состояния связей соседние OSPF-маршрутизаторы достаточно часто обмениваются короткими сообщениями HELLO. Для распространения по сети данных о состоянии связей маршрутизаторы используют широковещательную рассылку сообщений другого типа, которые называются *router links advertisement* – объявление о связях маршрутизатора (точнее, о состоянии связей). Таким образом, OSPF-маршрутизаторы получают, в конце концов, информацию о состоянии всех связей сети. Эта информация используется для построения графа связей сети, который, естественно, один и тот же для всех маршрутизаторов сети. Кроме информации о соседях, маршрутизатор в своем объявлении перечисляет подсети, с которыми он связан непосредственно. Вычисление маршрута с минимальной метрикой до каждой подсети производится непосредственно по этому графу по алгоритму Дэйкстры.

Протоколы состояния канала трудны в реализации и нуждаются в значительном объеме памяти для хранения информации о состоянии каналов. Примерами этих протоколов являются OSPF, IS–IS, Nowell NLSP и Cisco EIGRP. Существует множество других протоколов маршрутизации: BGP, IGRP, SNA APPN, NLSP, RSVP, SMRP. Протоколы маршрутизации совершенствуются постоянно.

Маршрутизаторы позволяют достичь получателя при помощи множества путей, управлять трафиком на основе метрик, осуществлять в целях безопасности

фильтрацию трафика, работать с сегментами сетей различных технологий (например, одновременно с Ethernet, ATM и FDDI). Но они не являются быстрыми устройствами и сложны в поддержке. Применяются маршрутизаторы в больших корпоративных и глобальных сетях для соединения сегментов.

Шлюз (Gateway) – это устройство для соединения подсетей по протоколам выше 3-го уровня ЭМВОС. Они применяются в сложных гетерогенных сетях. Например, если мы хотим присоединить сегмент с персональными компьютерами, представляющими символы в коде ASCII, к мейнфрейм, представляющей символы в коде EBCDIC. Существуют шлюзы, выполняющие конвертацию всех семи уровней протоколов ЭМВОС (обычно это аппаратные средства на первых двух уровнях и программное обеспечение на остальных уровнях). При этом они могут быть выделены только для осуществления функций соответствия различных протоколов друг другу, а могут выполнять еще и другие функции. Например, шлюз и одновременно файл-сервер сети.

Для связи сегментов сетей предназначен алгоритм *Spanning Tree (Spanning Tree Algorithm)*.

Чтобы предотвратить потерю работоспособности сети при выходе из строя устройства, соединяющего сегменты сети, необходимо организовывать между сегментами резервные связи. Например, в один и тот же сегмент сети можно попасть через три моста/коммутатора. Но тогда следует предусмотреть алгоритм, который предотвращал бы наличие замкнутых путей-петель. Такой алгоритм стандартизован IEEE для TR-мостов и коммутаторов и называется IEEE 802.1d STA (Spanning Tree Algorithm).

Алгоритм STA формализует сеть в виде графа, вершинами которого являются коммутаторы в сегменте сети (рис. 1.37). Алгоритм обеспечивает поиск древовидной топологии связей с единственным путем от каждого коммутатора и от каждого сегмента до некоторого выделенного коммутатора (корня дерева, Root Switch) при минимально возможном расстоянии. В качестве корневого коммутатора выбирается коммутатор с минимальным адресом, ему присваивается максимальный приоритет.

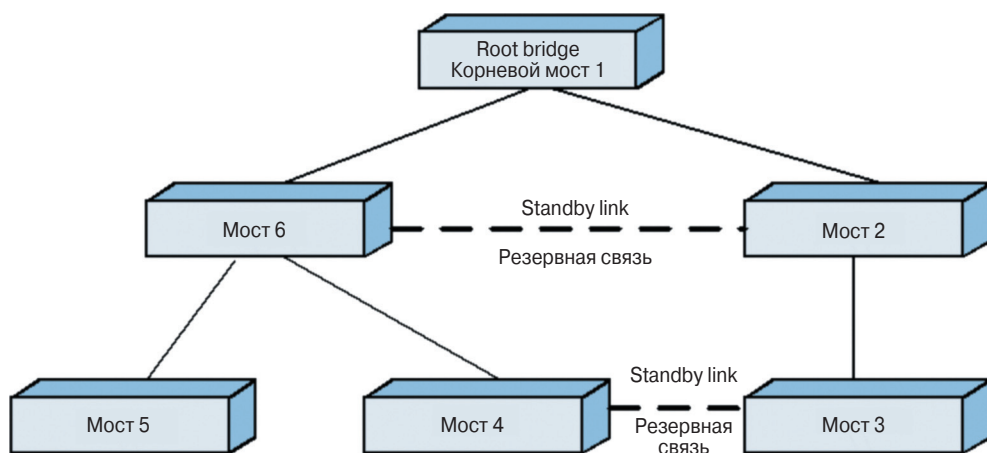


Рис. 1.37. Дерево мостов в соответствии с алгоритмом STA [10]

В качестве расстояния в СТА используется метрика – величина, обратно пропорциональная пропускной способности сегмента. Метрика – это время передачи одного бита, измеренное в 10-наносекундных единицах (условное время сегмента). Например, для сегмента Ethernet 10 Мбит/с метрика равна 10 условным единицам.

Корневой коммутатор рассылает остальным коммутаторам специальный «hello-пакет». Коммутаторы ретранслируют этот пакет, для того чтобы каждый коммутатор определил минимальные расстояния от всех своих портов до корневого коммутатора. Алгоритм определяет, какой коммутатор или связь между коммутаторами являются основными, а какие резервными. Основные метятся как «передающие» (forward), а резервные – как «заблокированные» (standby). Если основная связь или коммутатор вышли из строя, они заменяются резервными. Таким образом, существует один путь для каждого сегмента, а резервные пути ждут своего часа в случае выхода из строя коммутатора или связи между коммутаторами.

Алгоритм выделяет корневые порты на коммутаторах (это порт с кратчайшим расстоянием до корневого коммутатора) и ограничивает количество коммутаторов (hops) величиной 7, а сегментов соответственно 8.

Итак, для соединения сегментов сети или разбиения сети на сегменты используются специализированные устройства: хабы, мосты, коммутаторы, маршрутизаторы и шлюзы. В высокоскоростной передаче данных используются коммутаторы, а для присоединения сетей, имеющих различные протоколы выше 3-го и 4-го уровней ЭМВОС, используются шлюзы. Коммутаторы работают гораздо быстрее, чем маршрутизаторы (роутеры) и, выполняя функции протоколов 2-го и 3-го уровней ЭМВОС, сравнимы с ними по функциональности, проще в управлении и применяются в сетях любых размеров.

1.14. Полупроводниковая элементная база для телекоммуникационных систем нового поколения

Ниже приведем результаты анализа состава и основных технических характеристик базовых элементов перспективных ТКС на примере одного из мировых лидеров в этой области – фирмы с коротким названием e2v (France, Grenoble) [11].

Эта компания много лет сотрудничает с техническими специалистами военных ведомств США, Англии и Канады, участвует в перспективных НИОКР и ее продукция широко используется в самых разных телекоммуникационных системах военного и коммерческого назначения.

Несколько слов о самой компании, точнее – о «полупроводниковом» направлении.

Подразделение полупроводниковых компонентов компании e2v проектирует и поставляет АЦП и ЦАП с очень высоким быстродействием порядка нескольких Гвыб/с. Это подразделение также производит процессоры и ИС памяти с высокой надежностью для ответственных приложений, в т.ч. для авионики, космической и военной техники.

К традиционным рынкам изделий компании e2v относится сегмент оборонной техники, в т.ч. радары и средства радиоэлектронного противодействия, которым требуются высокая частота выборки и широкая полоса пропускания.

Некоторым другим, намного более емким рынкам требуются преобразователи данных, работающие на частоте в несколько гигагерц, чтобы обеспечить передачу сигналов для реализации новых широкополосных сервисов. Компания e2v поставляет высокоскоростные широкополосные преобразователи данных для оборудования, предназначенного для испытания телекоммуникационных систем. Эти устройства применяются также в сетевом оборудовании базовых станций, сетях 3G/4G, WiMax, в оптоволоконных сетях Giga-Ethernet.

На многих из указанных рынков с компанией e2v конкурируют мощные коммуникационные процессоры семейства QorIQ от компаний Freescale, Micron, EVERSPIN TECHNOLOGIES, которые применяются в приложениях, требующих большой вычислительной мощности или работающих с большими объемами данных, — маршрутизаторах, переключателях, сетевых шлюзах, контроллерах для базовых станций и радиосетей, шлюзах доступа для LTE-сетей.

В статье [11] описывается несколько новых телекоммуникационных приложений, в которых полупроводниковые компоненты компании e2v, обеспечивающие качественно новый уровень решений, позволяют расширить возможности проектируемых перспективных систем.

Если провести анализ состава как уже выпускаемой, так и разрабатываемой новой продукции этой фирмы, можно только на этом примере сформулировать глобальные мировые тенденции развития телекоммуникационных систем на ближайшую (2017–2020 годы) и среднесрочную (до 2030 года) перспективы. Эти тенденции в графическом виде представлены на рис. 1.38.

Прежде всего это глубокая модификация систем военного назначения (радары, средства радиолокационной борьбы), стандартных радиоприемных и радиопередающих устройств, модернизация средств спутниковой связи с использованием принципов прямого преобразования ВЧ-сигналов, замена стандартных преобразователей частоты на высокопроизводительные широкополосные ЦАП, развитие направления так называемых программно-аппаратных систем (Software Defined Radio — SDR) и многое другое.

Подразделение полупроводниковых компонентов компании e2v поставляет полный набор электронных компонентов военного назначения для систем обработки сигналов, начиная с входных аналоговых блоков, преобразователей данных, блоков обработки данных и заканчивая интерфейсами.

На рис. 1.39 [11] показана вся номенклатура высокоскоростных преобразователей данных и микропроцессоров для высоконадежных систем, которые выпускает полупроводниковое отделение e2v.

Несколько слов следует сказать об особенностях использования прямого преобразования частоты в современных высокоскоростных электронных устройствах.

Так, например, в современных модемах телекоммуникационных систем используется аналого-цифровая архитектура, для реализации которой необходимы преобразователи частоты. Однако один высокопроизводительный широкополосный ЦАП в принципе позволяет заменить большое количество этих преобразователей.

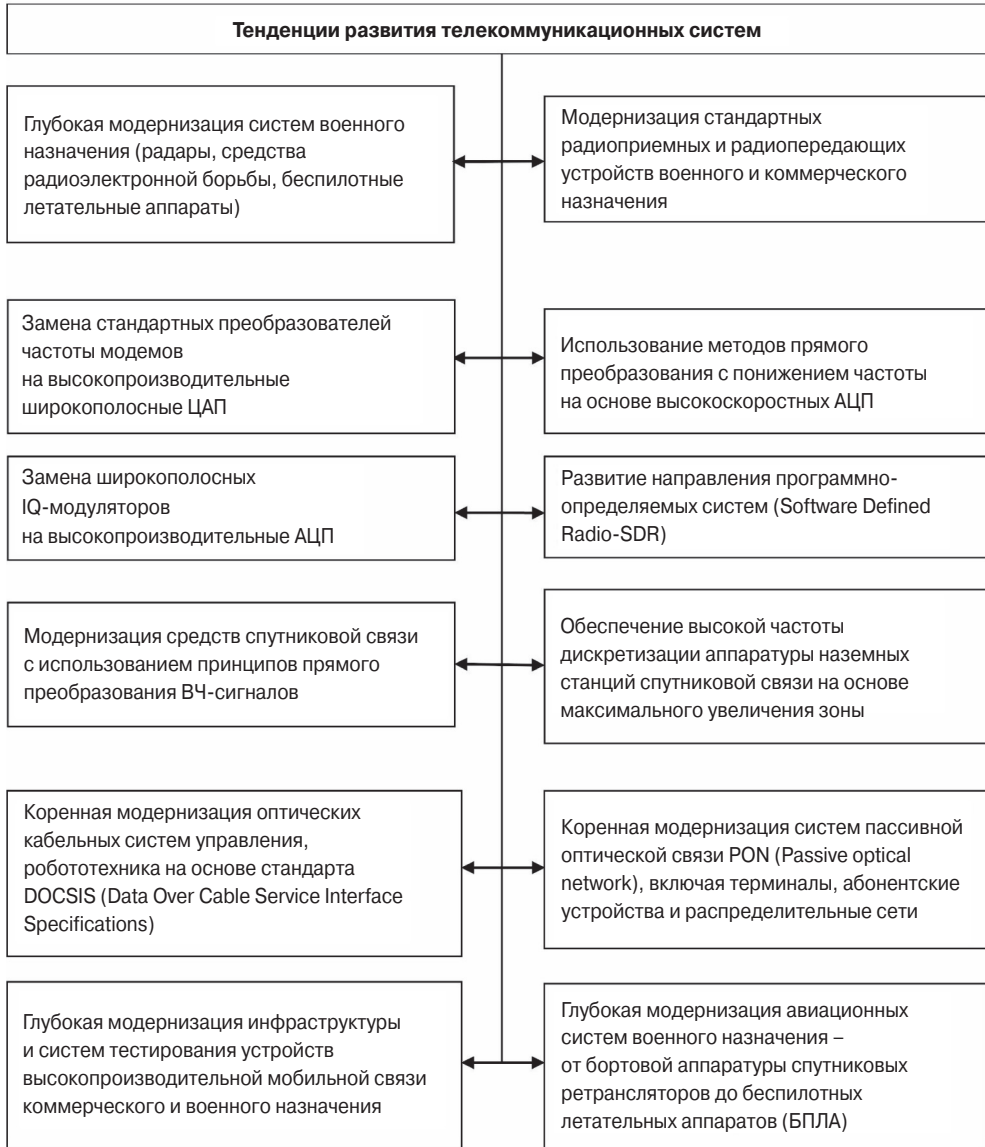


Рис. 1.38. Основные тенденции развития телекоммуникационных систем на ближайшую (2017–2020 годы) и долгосрочную (до 2030 года) перспективу

Возможность ЦАП нового поколения выполнять прямое преобразование цифрового сигнала в диапазонах частот L, S и даже C (6 ГГц) можно считать огромным шагом вперед на пути повышения функциональной гибкости системы и уменьшения энергопотребления, поскольку эти ЦАП исключают необходимость в преобразователях частоты [11] и, следовательно, позволяют избавиться от схем ФАПЧ и джиттера ГУН (генератора, управляемого напряжением), который возникает при каждом повышении частоты.

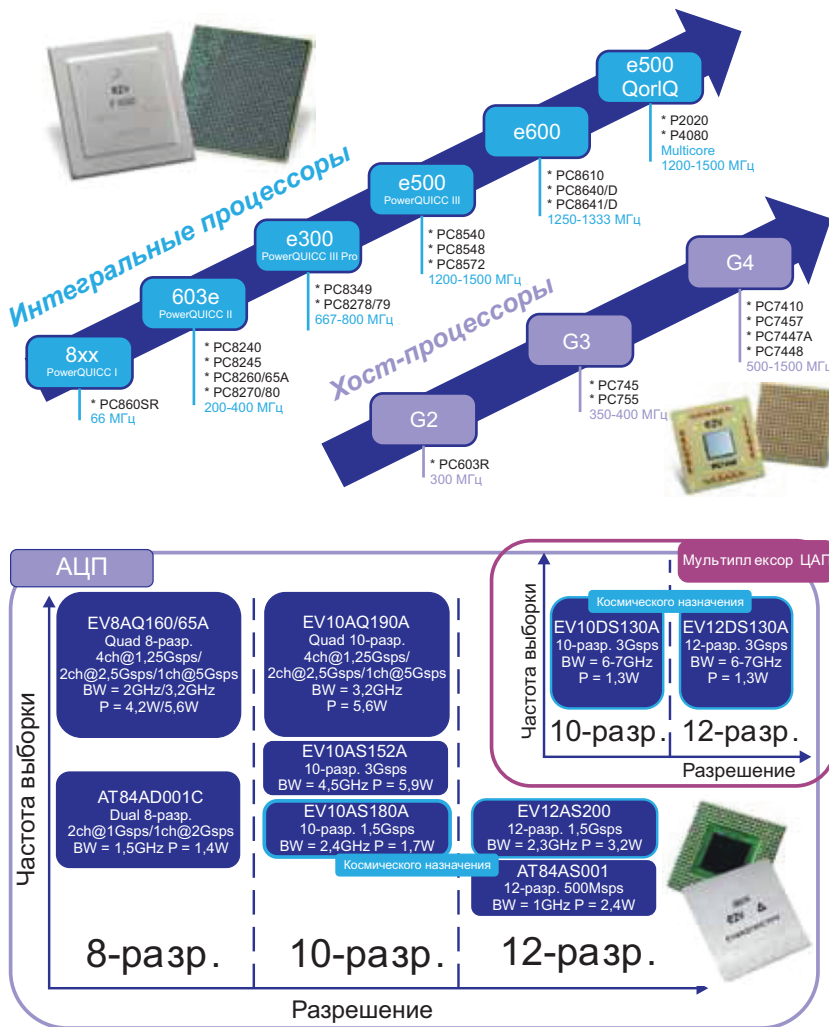


Рис. 1.39. Номенклатура преобразователей данных и микропроцессоров фирмы e2v [11]

При использовании ЦАП в гигагерцовом диапазоне для преобразования с повышением частоты эффект наложения спектров (aliasing) дает положительный результат. На рис. 1.40 [11] иллюстрируется эффект наложения спектров 100-МГц сигнала на выходе ЦАП с частотой дискретизации 3 Гвыб/с.

Здесь сплошная синяя линия соответствует типовой характеристике sincX ЦАП, который работает в режиме кодирования без возврата к нулю (Non-Return to Zero, NRZ) с нулем на частоте дискретизации. Сигнал с частотой 400 МГц хорошо виден в первой зоне Найквиста. Во второй, третьей и четвертой зонах Найквиста сигнал также отражается. Чтобы ликвидировать эти отражения (отклики), применяется специальная фильтрация сигнала вблизи заданных частот.

В табл. 1.10 [11] приведены данные для сравнения типового ЦАП, работающего в гигагерцовом диапазоне, со стандартным широкополосным IQ-модулятором.