

# COMPUTER NETWORKS

4th edition

Andrew S. Tanenbaum

КЛАССИКА COMPUTER SCIENCE

# Э. ТАНЕНБАУМ КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ

4-Е ИЗДАНИЕ

 **ПИТЕР®**

Москва · Санкт-Петербург · Нижний Новгород · Воронеж  
Ростов-на-Дону · Екатеринбург · Самара  
Киев · Харьков · Минск  
2003



Prentice Hall PTR  
Upper Saddle River, New Jersey 07458  
[www.phptr.com](http://www.phptr.com)

## Краткое содержание

Об авторе . . . . .	16
Предисловие . . . . .	17
Глава 1. Введение . . . . .	21
Глава 2. Физический уровень . . . . .	114
Глава 3. Уровень передачи данных . . . . .	222
Глава 4. Подуровень управления доступом к среде . . . . .	291
Глава 5. Сетевой уровень. . . . .	399
Глава 6. Транспортный уровень . . . . .	551
Глава 7. Прикладной уровень . . . . .	658
Глава 8. Безопасность в сетях . . . . .	814
Глава 9. Библиография . . . . .	941
Алфавитный указатель. . . . .	971

**Т18 Компьютерные сети. 4-е изд.** / Э. Таненбаум. — СПб.: Питер, 2003. — 992 с.: ил. — (Серия «Классика computer science»).

ISBN 5-318-00492-X

В этой книге подробно и последовательно изложены основные концепции, определяющие современное состояние и тенденции развития компьютерных сетей. Это уже четвертое, значительно переработанное издание книги, и три предыдущих неизменно были бестселлерами и использовались в качестве учебного пособия во многих западных университетах.

Автор подробнейшим образом объясняет устройство и принципы работы аппаратного и программного обеспечения, рассматривает все аспекты и уровни организации сетей, от физического до уровня прикладных программ. Изложение теоретических принципов дополняется яркими, показательными примерами функционирования Интернета, сетей АТМ и беспроводных сетей.

ББК 32.973.202  
УДК 681.324

Информация, содержащаяся в данной книге, получена из источников, рассматриваемых издательством как надежные. Тем не менее, имея в виду возможные человеческие или технические ошибки, издательство не может гарантировать абсолютную точность и полноту приводимых сведений и не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

© 2003, 1996 Pearson Education, Inc.  
ISBN 0-13-066102-3 (англ.) © Перевод на русский язык, ЗАО Издательский дом «Питер», 2003  
ISBN 5-318-00492-X © Издание на русском языке, оформление, ЗАО Издательский дом «Питер», 2003

# Содержание

<b>Об авторе</b> . . . . .	<b>16</b>
<b>Предисловие</b> . . . . .	<b>17</b>
От издательства . . . . .	20
<b>Глава 1. Введение</b> . . . . .	<b>21</b>
Применение компьютерных сетей . . . . .	23
Сети в организациях . . . . .	23
Использование сетей частными лицами . . . . .	26
Использование беспроводных сетей . . . . .	31
Социальный аспект . . . . .	35
Сетевое оборудование . . . . .	37
Локальные сети . . . . .	39
Муниципальные сети . . . . .	40
Глобальные сети . . . . .	42
Беспроводные сети . . . . .	44
Домашние сети . . . . .	46
Объединения сетей . . . . .	49
Сетевое программное обеспечение . . . . .	50
Иерархия протоколов . . . . .	50
Разработка уровней . . . . .	54
Службы на основе соединений и службы без установления соединений . . . . .	56
Примитивы служб . . . . .	58
Службы и протоколы . . . . .	61
Эталонные модели . . . . .	62
Эталонная модель OSI . . . . .	62
Эталонная модель TCP/IP . . . . .	66
Сравнение эталонных моделей OSI и TCP . . . . .	69
Критика модели и протоколов OSI . . . . .	70
Критика эталонной модели TCP/IP . . . . .	73
Примеры сетей . . . . .	74
Интернет . . . . .	75
Сети на основе соединений: X.25, ретрансляция кадров, ATM. . . . .	86

Ethernet . . . . .	92
Беспроводные ЛВС: 802.11 . . . . .	95
Стандартизация сетей . . . . .	98
Кто есть кто в мире телекоммуникаций . . . . .	99
Кто есть кто в мире международных стандартов . . . . .	102
Кто есть кто в мире стандартов Интернета . . . . .	104
Единицы измерения . . . . .	106
Краткое содержание следующих глав . . . . .	107
Резюме . . . . .	108
Вопросы . . . . .	110
<b>Глава 2. Физический уровень</b> . . . . .	<b>114</b>
Теоретические основы передачи данных . . . . .	115
Ряды Фурье . . . . .	115
Сигналы с ограниченным спектром . . . . .	115
Максимальная скорость передачи данных через канал . . . . .	118
Управляемые носители информации . . . . .	119
Магнитные носители . . . . .	119
Витая пара . . . . .	120
Коаксиальный кабель . . . . .	121
Волоконная оптика . . . . .	122
Беспроводная связь . . . . .	129
Электромагнитный спектр . . . . .	130
Радиосвязь . . . . .	133
Связь в микроволновом диапазоне . . . . .	134
Инфракрасные и миллиметровые волны . . . . .	138
Связь в видимом диапазоне . . . . .	138
Спутники связи . . . . .	140
Геостационарные спутники . . . . .	141
Средневысотные спутники . . . . .	145
Низкоорбитальные спутники . . . . .	145
Спутники против оптоволоконна . . . . .	148
Коммутируемая телефонная сеть общего пользования . . . . .	149
Структура телефонной системы . . . . .	150
Политика телефонии . . . . .	153
Местные линии связи: модемы, ADSL, беспроводная связь . . . . .	156
Магистраль и уплотнение . . . . .	171
Коммутация . . . . .	182
Мобильная телефонная система . . . . .	187
Мобильные телефоны первого поколения: аналоговая передача речи . . . . .	189
Второе поколение мобильных телефонов: цифровая передача голоса . . . . .	193
Мобильные телефоны третьего поколения: цифровая речь и данные. . . . .	203

Кабельное телевидение . . . . .	206
Абонентское телевидение . . . . .	207
Кабельный Интернет . . . . .	208
Распределение спектра . . . . .	209
Кабельные модемы . . . . .	211
ADSL или кабель? . . . . .	214
Резюме . . . . .	215
Вопросы . . . . .	216
<b>Глава 3. Уровень передачи данных . . . . .</b>	<b>222</b>
Ключевые аспекты организации уровня передачи данных . . . . .	223
Сервисы, предоставляемые сетевому уровню . . . . .	224
Формирование кадра . . . . .	227
Обработка ошибок . . . . .	230
Управление потоком . . . . .	231
Обнаружение и исправление ошибок . . . . .	232
Корректирующее кодирование . . . . .	233
Коды с обнаружением ошибок . . . . .	236
Элементарные протоколы передачи данных . . . . .	240
Неограниченный симплексный протокол . . . . .	245
Симплексный протокол с ожиданием . . . . .	246
Симплексный протокол для зашумленных каналов . . . . .	248
Протоколы скользящего окна . . . . .	252
Протокол однобитового скользящего окна . . . . .	254
Протокол с возвратом на $n$ . . . . .	257
Протокол с выборочным повтором . . . . .	264
Верификация протоколов . . . . .	270
Модели конечных автоматов . . . . .	270
Сети Петри . . . . .	273
Примеры протоколов передачи данных . . . . .	276
HDLC — высокоуровневый протокол управления каналом . . . . .	276
Уровень передачи данных в Интернете . . . . .	280
Резюме . . . . .	285
Вопросы . . . . .	286
<b>Глава 4. Подуровень управления доступом к среде . . . . .</b>	<b>291</b>
Проблема распределения канала . . . . .	292
Статическое распределение канала в локальных и региональных сетях . . . . .	292
Динамическое распределение каналов в локальных и региональных сетях . . . . .	294
Протоколы коллективного доступа . . . . .	295
Система ALOHA . . . . .	295
Протоколы множественного доступа с контролем несущей . . . . .	300

Протоколы без столкновений . . . . .	304
Протоколы с ограниченной конкуренцией . . . . .	307
Протоколы множественного доступа со спектральным разделением . . . . .	310
Протоколы беспроводных локальных сетей . . . . .	313
Сеть Ethernet . . . . .	317
Кабели Ethernet . . . . .	317
Манчестерский код . . . . .	321
Протокол подуровня управления доступом к среде в Ethernet . . . . .	322
Алгоритм двоичного экспоненциального отката . . . . .	325
Производительность сети стандарта 802.3 . . . . .	326
Коммутируемые сети Ethernet . . . . .	329
Быстрый Ethernet . . . . .	330
Гигабитная сеть Ethernet . . . . .	334
Стандарт IEEE 802.2: протокол LLC . . . . .	339
Ретроспектива Ethernet . . . . .	340
Беспроводные локальные сети . . . . .	341
Стандарт 802.11: стек протоколов . . . . .	341
Стандарт 802.11: физический уровень . . . . .	342
Стандарт 802.11: протокол подуровня управления доступом к среде . . . . .	345
Стандарт 802.11: структура кадра . . . . .	350
Сервисы . . . . .	351
Широкополосные беспроводные сети . . . . .	353
Сравнение стандартов 802.11 и 802.16 . . . . .	354
Стандарт 802.16: стек протоколов . . . . .	355
Стандарт 802.16: физический уровень . . . . .	356
Стандарт 802.16: протокол подуровня MAC . . . . .	358
Стандарт 802.16: структура кадра . . . . .	360
Bluetooth . . . . .	361
Архитектура Bluetooth . . . . .	362
Приложения Bluetooth . . . . .	363
Bluetooth: набор протоколов . . . . .	365
Bluetooth: уровень радиосвязи . . . . .	367
Bluetooth: уровень немодулированной передачи . . . . .	367
Bluetooth: уровень L2CAP . . . . .	368
Bluetooth: структура кадра . . . . .	369
Коммутация на уровне передачи данных . . . . .	370
Мосты между 802.x и 802.y . . . . .	372
Локальное межсетевое взаимодействие . . . . .	375
Мосты связующего дерева . . . . .	377
Удаленные мосты . . . . .	378
Повторители, концентраторы, мосты, коммутаторы, маршрутизаторы и шлюзы . . . . .	379
Виртуальные локальные сети . . . . .	382
Резюме . . . . .	391
Вопросы . . . . .	394

<b>Глава 5. Сетевой уровень . . . . .</b>	<b>399</b>
Вопросы проектирования сетевого уровня . . . . .	400
Метод коммутации пакетов с ожиданием. . . . .	400
Сервисы, предоставляемые транспортному уровню . . . . .	401
Реализация сервиса без установления соединения . . . . .	402
Реализация сервиса с установлением соединения . . . . .	404
Сравнение подсетей виртуальных каналов и дейтаграммных подсетей . . . . .	405
Алгоритмы маршрутизации . . . . .	406
Принцип оптимальности маршрута . . . . .	408
Выбор кратчайшего пути . . . . .	409
Заливка . . . . .	412
Маршрутизация по вектору расстояний . . . . .	413
Маршрутизация с учетом состояния линий . . . . .	417
Иерархическая маршрутизация . . . . .	424
Широковещательная маршрутизация . . . . .	426
Многоадресная рассылка . . . . .	428
Алгоритмы маршрутизации для мобильных хостов . . . . .	430
Маршрутизация в специализированных сетях . . . . .	433
Поиск узла в равноранговых сетях . . . . .	439
Алгоритмы борьбы с перегрузкой . . . . .	444
Общие принципы борьбы с перегрузкой . . . . .	446
Стратегии предотвращения перегрузки . . . . .	448
Борьба с перегрузкой в подсетях виртуальных каналов . . . . .	450
Борьба с перегрузкой в дейтаграммных подсетях . . . . .	451
Сброс нагрузки . . . . .	454
Борьба с флуктуациями . . . . .	456
Качество обслуживания . . . . .	458
Требования. . . . .	458
Методы достижения хорошего качества обслуживания . . . . .	460
Интегральное обслуживание . . . . .	472
Дифференцированное обслуживание . . . . .	475
Коммутация меток и MPLS . . . . .	478
Объединение сетей . . . . .	481
Различия сетей . . . . .	483
Способы объединения сетей . . . . .	484
Сцепленные виртуальные каналы . . . . .	486
Дейтаграммное объединение сетей . . . . .	487
Туннелирование . . . . .	489
Маршрутизация в объединенных сетях . . . . .	490
Фрагментация . . . . .	492
Сетевой уровень в Интернете . . . . .	495
Протокол IP. . . . .	498
IP-адреса . . . . .	501
Управляющие протоколы Интернета . . . . .	515
Протокол внутреннего шлюза OSPF . . . . .	520

Протокол внешнего шлюза BGP . . . . .	526
Многоадресная рассылка в Интернете . . . . .	528
Мобильный IP . . . . .	529
Протокол IPv6 . . . . .	532
Резюме . . . . .	542
Вопросы . . . . .	543
<b>Глава 6. Транспортный уровень . . . . .</b>	<b>551</b>
Транспортная служба . . . . .	551
Услуги, предоставляемые верхним уровнем . . . . .	552
Примитивы транспортной службы . . . . .	554
Сокеты Беркли. . . . .	557
Пример программирования сокета: файл-сервер для Интернета. . . . .	559
Элементы транспортных протоколов . . . . .	563
Адресация . . . . .	564
Установка соединения . . . . .	567
Разрыв соединения . . . . .	573
Управление потоком и буферизация . . . . .	577
Мультиплексирование . . . . .	582
Восстановление после сбоев . . . . .	583
Простой транспортный протокол . . . . .	585
Служебные примитивы примера транспортного протокола . . . . .	585
Транспортная сущность примера транспортного протокола . . . . .	587
Пример протокола как конечного автомата . . . . .	595
Транспортные протоколы Интернета: UDP . . . . .	598
Основы UDP . . . . .	598
Вызов удаленной процедуры . . . . .	600
Транспортный протокол реального масштаба времени . . . . .	603
Транспортные протоколы Интернета: TCP . . . . .	607
Основы TCP . . . . .	607
Модель службы TCP . . . . .	608
Протокол TCP . . . . .	610
Заголовок TCP-сегмента . . . . .	611
Установка TCP-соединения . . . . .	614
Разрыв соединения TCP . . . . .	616
Модель управления TCP-соединением . . . . .	616
Управление передачей в TCP . . . . .	619
Борьба с перегрузкой в TCP . . . . .	623
Управление таймерами в TCP. . . . .	626
Беспроводные протоколы TCP и UDP . . . . .	629
Транзакционный TCP. . . . .	632
Вопросы производительности . . . . .	633
Причины снижения производительности компьютерных сетей. . . . .	634
Измерение производительности сети. . . . .	637

Проектирование производительных систем . . . . .	640
Быстрая обработка TPDU-модулей . . . . .	644
Протоколы для гигабитных сетей . . . . .	648
Резюме . . . . .	652
Вопросы . . . . .	653
<b>Глава 7. Прикладной уровень . . . . .</b>	<b>658</b>
Служба имен доменов DNS . . . . .	658
Пространство имен DNS . . . . .	659
Записи ресурсов . . . . .	662
Серверы имен . . . . .	665
Электронная почта . . . . .	668
Архитектура и службы . . . . .	670
Пользовательский агент . . . . .	672
Форматы сообщений . . . . .	675
Пересылка писем . . . . .	683
Доставка сообщений . . . . .	686
Всемирная паутина (WWW) . . . . .	693
Представление об архитектуре . . . . .	694
Статические веб-документы . . . . .	712
Динамические веб-документы . . . . .	727
HTTP — протокол передачи гипертекста . . . . .	735
Повышение производительности . . . . .	741
Беспроводная Паутина . . . . .	748
I-mode . . . . .	750
Мультимедиа . . . . .	760
Основы цифровой обработки звука . . . . .	761
Сжатие звука . . . . .	764
Потоковое аудио . . . . .	767
Интернет-радио . . . . .	771
Передача речи поверх IP . . . . .	774
Видео . . . . .	782
Сжатие видеоданных . . . . .	786
Видео по заказу . . . . .	795
Система Mbone . . . . .	803
Резюме . . . . .	807
Вопросы . . . . .	808
<b>Глава 8. Безопасность в сетях . . . . .</b>	<b>814</b>
Криптография . . . . .	818
Основы криптографии . . . . .	819
Метод подстановки . . . . .	821
Метод перестановки . . . . .	823
Одноразовые блокноты . . . . .	824
Два фундаментальных принципа криптографии . . . . .	830

Алгоритмы с симметричным криптографическим ключом . . . . .	832
Стандарт шифрования данных DES . . . . .	834
Тройное шифрование с помощью DES . . . . .	836
Улучшенный стандарт шифрования AES . . . . .	837
Режимы шифрования . . . . .	841
Другие шифры . . . . .	847
Криптоанализ . . . . .	848
Алгоритмы с открытым ключом . . . . .	849
Алгоритм RSA . . . . .	850
Другие алгоритмы с открытым ключом . . . . .	852
Цифровые подписи . . . . .	853
Подписи с симметричным ключом . . . . .	853
Подписи с открытым ключом . . . . .	855
Профили сообщений . . . . .	856
Задача о днях рождения . . . . .	861
Управление открытыми ключами . . . . .	863
Сертификаты . . . . .	864
X.509 . . . . .	866
Инфраструктуры систем с открытыми ключами . . . . .	867
Защита соединений . . . . .	871
IPsec . . . . .	871
Брандмауэры . . . . .	876
Виртуальные частные сети . . . . .	879
Безопасность в беспроводных сетях . . . . .	881
Протоколы аутентификации . . . . .	886
Аутентификация, основанная на общем секретном ключе . . . . .	887
Установка общего ключа: протокол обмена ключами Диффи — Хеллмана . . . . .	892
Аутентификация с помощью центра распространения ключей . . . . .	894
Аутентификация при помощи протокола Kerberos . . . . .	897
Аутентификация с помощью шифрования с открытым ключом . . . . .	900
Конфиденциальность электронной переписки . . . . .	901
PGP — довольно неплохая конфиденциальность . . . . .	901
PEM — почта повышенной секретности . . . . .	906
S/MIME . . . . .	907
Защита информации во Всемирной паутине . . . . .	907
Возможные опасности . . . . .	908
Безопасное именование ресурсов . . . . .	909
SSL — протокол защищенных сокетов . . . . .	916
Защита переносимых программ . . . . .	920
Социальный аспект . . . . .	923
Конфиденциальность . . . . .	924
Свобода слова . . . . .	927
Защита авторских прав . . . . .	931

Резюме . . . . .	934
Вопросы . . . . .	935
<b>Глава 9. Библиография . . . . .</b>	<b>941</b>
Литература для дальнейшего чтения . . . . .	941
Введение и неспециализированная литература . . . . .	942
Физический уровень . . . . .	943
Уровень передачи данных . . . . .	945
Подуровень управления доступом к носителю . . . . .	946
Сетевой уровень . . . . .	947
Транспортный уровень . . . . .	949
Прикладной уровень . . . . .	950
Безопасность в сетях . . . . .	951
Алфавитный список литературы . . . . .	952
<b>Алфавитный указатель . . . . .</b>	<b>971</b>

*Сьюзан, Барбаре, Марвину,  
а также памяти Брэма и Крошки п*

## Об авторе

Эндрю Таненбаум получил степень бакалавра естественных наук в Массачусетском технологическом институте и степень доктора в Калифорнийском университете в Беркли. В настоящее время является профессором Амстердамского университета, где возглавляет группу разработчиков компьютерных систем. Кроме того, Э. Таненбаум возглавляет факультет вычислительной техники (межвузовскую аспирантуру, занимающуюся исследованиями в области современных параллельных систем, распределенных систем и систем обработки и формирования изображений). Тем не менее он всеми силами старается не превратиться в бюрократа.

В прошлом Эндрю Таненбаум занимался компиляторами, операционными системами, компьютерными сетями и локальными распределенными системами. В настоящее время его внимание сосредоточено на разработке глобальных распределенных систем, пользователями которых являются миллионы людей. С результатами этих исследований можно познакомиться на сайте [www.cs.vu.nl/globe](http://www.cs.vu.nl/globe). Кроме того, в издательстве Питер, в 2003 году вышла книга «Распределенные системы», написанная Э. Таненбаумом совместно с профессором Маартеном ван Стееном.

Профессор Таненбаум разработал также значительный объем программного обеспечения. Он был главным архитектором «амстердамского пакета разработки компиляторов» (Amsterdam Compiler Kit), широко известного пакета для создания переносимых компиляторов, а также MINIX, миниатюрного клона UNIX, предназначенного для студенческих лабораторных работ по программированию. Вместе со своими аспирантами и программистами он способствовал созданию распределенной операционной системы Amoeba, высокопроизводительной распределенной операционной системы на базе микроядра. Системы MINIX и Amoeba бесплатно распространяются через Интернет.

Его аспиранты, многие из которых получили степень доктора, достигли больших успехов. Он очень ими гордится.

Профессор Таненбаум является членом ACM и IEEE, действительным членом Королевской академии наук и искусств Нидерландов, обладателем премии ACM 1994 года за заслуги в преподавательской деятельности, премии ACM/SIGCSE 1997 года за впечатляющий вклад в преподавание компьютерных дисциплин и премии Техту в 2002 году за свои великолепные учебники. Его имя упоминается в мировом справочнике «Кто есть кто в мире». Его домашнюю страницу в Интернете можно найти по адресу <http://www.cs.vu.nl/~ast/>.

## Предисловие

Вот и вышло в свет уже четвертое издание этой книги. Каждое издание соответствует своему периоду развития компьютерных сетей. Так, в 1980 году, когда появилось первое из них, сети были лишь академической диковинкой. Второе издание (1988 год) пришлось на те времена, когда сетевые технологии стали применяться в университетах и большом бизнесе. В 1996 году появилось третье издание, и уже тогда сети, особенно Интернет, стали ежедневной реальностью для миллионов людей. Вы держите в руках книгу, соответствующую периоду стремительного развития технологий беспроводных сетей.

С тех пор, как вышло третье издание, ситуация в этой области изменилась самым радикальным образом. В середине 90-х существовало огромное количество разнообразных сетей LAN и WAN с соответствующим числом наборов протоколов. К 2003 году единственной широко распространенной системой, построенной на технологии проволочной LAN, остается Ethernet, а большинство WAN составляет Сеть сетей, то есть Интернет. В новом издании это учтено — устаревший материал убран.

Как вы понимаете, работа шла не только и не столько над удалением старого, но и над добавлением нового, поскольку со времен третьего издания появилось очень много новых технологий и решений. Наиболее резкий рывок вперед наблюдается в беспроводных сетях: стандарт 802.11, беспроводные местные линии связи, сотовые сети 2G и 3G, Bluetooth, WAP, i-mode — все это достижения последних лет, описанию которых уделено много места в новой книге. Все более важным становится вопрос защиты информации, этому посвящена целая глава.

Глава 1, как и в предыдущих изданиях, играет роль введения, однако ее содержание было пересмотрено и дополнено. Например, в ней рассказывается об основах технологий Интернет, Ethernet, беспроводных локальных сетей, излагается их история. Вкратце рассматриваются домашние сети.

Глава 2 была несколько реорганизована. После небольшого введения, в котором рассказывается о принципах передачи данных, следуют три основных раздела (управляемая среда, беспроводная передача данных, спутниковая передача данных). Затем приводятся три очень важных примера: традиционная телефонная система, мобильная телефонная система, кабельное телевидение. Добавлены новые параграфы, касающиеся ADSL, широкополосных беспроводных сетей, глобальных беспроводных сетей, доступа в Интернет по кабелю и с помощью DOCSIS.



Глава 3 всегда была посвящена фундаментальным принципам работы двухточечных (point-to-point) протоколов. Идеям этим не суждено устареть. Не устарели и примеры, они без изменений были перенесены из третьего издания.

Зато подуровень управления доступом к среде (MAC) за последние годы претерпел существенные изменения, они отражены в главе 4. Раздел, касавшийся Ethernet, был расширен и теперь включает описание гигабитного Ethernet. Добавлены совершенно новые очень важные разделы, в которых рассказывается о беспроводных локальных сетях, широкополосных беспроводных сетях, Bluetooth, коммутации на канальном уровне (включая MPLS).

Глава 5 тоже была пересмотрена, из нее полностью исключен материал по ATM, зато добавлены новые материалы, касающиеся Интернета. В связи с этим рассматриваются вопросы интегрированных и дифференцированных служб. В этой главе тоже не обошлось без обсуждения беспроводных технологий, в частности, проблем маршрутизации в специализированных сетях. Добавлены темы, касающиеся NAT и равноранговых сетей.

Глава 6 по-прежнему посвящена транспортному уровню, но и в нее были внесены изменения. Например, добавлен пример программирования сокетов. Одностраничный клиент и одностраничный сервер запрограммированы на C, пример снабжен подробными пояснениями. Его смысл состоит в построении примитивного файл- или веб-сервера, с которым можно было бы поэкспериментировать. Листинги программ можно скачать с веб-сайта книги, затем откомпилировать и запустить. Среди других обновлений необходимо отметить вопросы RTP, транзакций/TCP и удаленного вызова процедур.

Глава 7, посвященная прикладному уровню, стала чуть более конкретной. После небольшого введения в DNS следует основная часть, в которой обсуждаются всего три вопроса: e-mail, Web и мультимедиа. Но каждый из них рассматривается очень подробно. Например, объяснение принципа работы Web занимает около 60 страниц, на которых вы найдете следующие темы: статические и динамические веб-страницы, HTTP, CGI-скрипты, сети доставки содержимого, cookie-файлы, веб-кэширование. Здесь же рассказывается о принципах создания современных сайтов, включая основы XML, XSL, XHTML, PHP и т. д. Приводятся примеры, которые можно запустить и изучить «живьем». Что касается беспроводных сетей, то в этой главе вы найдете описание i-mode и WAP. Раздел, посвященный мультимедиа, включает теперь описание формата MP3, потокового звука, интернет-радио, а также технологий передачи речи по IP.

Защита информации стала настолько актуальной темой, что ее обсуждение теперь занимает целую главу объемом свыше 100 страниц. В главе 8 описываются как теоретические принципы безопасности в сетях передачи данных (алгоритмы симметричного шифрования и шифрования с открытыми ключами, цифровые подписи, сертификаты X.509), так и их практические приложения (аутентификация, защита от несанкционированного доступа к e-mail, защита информации в Web). Можно сказать, что эта глава простирается как вширь (от квантовой криптографии до правительственной цензуры), так и вглубь (взять хотя бы детальное рассмотрение работы SHA-1).

Глава 9 содержит полностью обновленный список литературы для дальнейшего чтения, библиографию более 350 ссылок, встречающихся в тексте. Около 200 из этих источников представляют собой газеты и книги, написанные после 2000 года.

В изданиях по компьютерной тематике всегда много сокращений. Данная книга не стала исключением. После ее прочтения вы будете легко оперировать следующими аббревиатурами: ADSL, AES, AMPS, AODV, ARP, ATM, BGP, CDMA, CDN, CGI, CIDR, DCF, DES, DHCP, DMCA, FDM, FHSS, GPRS, GSM, HDLC, HFC, HTML, HTTP, ICMP, IMAP, ISP, ITU, LAN, LMDS, MAC, MACA, MIME, MPEG, MPLS, MTU, NAP, NAT, NSA, NTSC, OFDM, OSPF, PCF, PCM, PGP, PHP, PKI, POTS, PPP, PSTN, QAM, QPSK, RED, RFC, RPC, RSA, RSVP, RTP, SSL, TCP, TDM, UDP, URL, UTP, VLAN, VPN, VSAT, WAN, WAP, WDMA, WEP, WWW и XML. Каждая из них будет расшифрована, так что волноваться не стоит. Нужно лишь внимательно читать книгу.

В помощь преподавателям, использующим эту книгу в качестве основы для своих курсов, автор подготовил различные дополнительные пособия:

- ◆ руководство по решению возникающих проблем;
- ◆ рисунки, таблицы и графики в различных электронных форматах;
- ◆ презентации в Power Point для построения лекций на основе этой книги;
- ◆ симулятор примеров протоколов из главы 3 (написанный на языке C);
- ◆ веб-страницу со ссылками на множество ресурсов по тематике книги (организации, самоучители, ответы на часто задаваемые вопросы и т. д.).

Сборник задач с решениями преподаватели (но не студенты!) могут получить в издательстве Prentice Hall. Весь прочий материал можно найти на сайте книги по адресу <http://www.prenhall.com/tanenbaum>. Там нужно щелкнуть на изображении обложки книги.

В процессе создания четвертого издания книги мне помогало множество замечательных людей, которых я хотел бы поблагодарить. Это Росс Андерсон (Ross Anderson), Элизабет Белдинг-Ройер (Elizabeth Belding-Royer), Стив Белловин (Steve Bellovin), Чачик Биздикян (Chatschik Bisdikian), Киз Бот (Kees Bot), Скотт Брэднер (Scott Bradner), Дженнифер Брэй (Jennifer Bray), Пэт Кейн (Pat Cain), Эд Фелтен (Ed Felten), Варвик Форд (Warwick Ford), Кевин Фу (Kevin Fu), Рон Фуллер (Ron Fulle), Джим Джейер (Jim Geier), Марио Джерла (Mario Gerla), Натали Жиру (Nathalie Giroux), Стив Ханна (Steve Hanna), Джеф Хейес (Jeff Hayes), Амир Херцберг (Amir Herzberg), Филип Хомбург (Philip Homburg), Филипп Хошка (Philipp Hoshka), Дэвид Грин (David Green), Барт Джекобс (Bart Jacobs), Франц Кашук (Frans Kaashoek), Стив Кент (Steve Kent), Роджер Кермоуд (Roger Kermode), Роберт Киницки (Robert Kinicki), Шей Каттен (Shay Kutten), Роб Ланфье (Rob Lanphier), Маркус Лич (Marcus Leech), Том Мофер (Tom Maufer), Brent Миллер (Brent Miller), Шивакант Мишра (Shivakant Mishra), Томас Надо (Thomas Nadeau), Шлём Овадия (Shlomo Ovdia), Кавех Пахлаван (Kaveh Pahlavan), Радья Перлман (Radia Perlman), Гильом Пьер (Guillaume Pierre), Уэйн Плезент (Wayne Pleasant), Патрик Пауэлл (Patrick Powell), Томас Робертацци (Thomas Robertazzi), Меди Санадиди (Medy

Sanadidi), Кристиан Шмутцер (Christian Schmutzer), Хеннинг Шульцринне (Henning Schulzrinne), Поль Севинк (Paul Sevinc), Михаил Сичитью (Mihail Sichitiu), Бернард Склар (Bernard Sklar), Эд Шкодиус (Ed Skodius), Боб Страдер (Bob Strader), Джордж Суоллоу (George Swallow), Джордж Сирувафукал (George Thiruvathukal), Петер Томсу (Peter Tomsu), Патрик Веркайк (Patrick Verkaik), Дэйв Виттали (Dave Vittali), Спирос Вулгарис (Spyros Voulgaris), Жан-Марк Вэмс (Jan-Mark Wams), Ройдигер Вайс (Ruediger Weis), Берт Вийнен (Bert Wijnen), Джозеф Уилкс (Joseph Wilkes), Лендерт ван Дорн (Leendert van Doorn) и Маартен ван Стеен (Maarten van Steen).

Особая благодарность Труди Левин (Trudy Levine), которая доказала, что бабушка с успехом может быть редактором технической литературы. Шивакант Мишра (Shivakant Mishra) приложил много усилий для решения проблем, возникавших в конце разделов. Энди Дорнэн (Andy Dornan) предложил добавить в библиографический список несколько замечательных источников для дальнейшего чтения. Жан Луен (Jan Looyen) предоставил необходимую аппаратуру в критический момент. Доктор Ф. де Ни (Dr. F. de Nies) мастерски проделывал работу по удалению и вставке слов в нужных местах. Мой редактор Мэри Франц (Mary Franz) из издательства «Prentice Hall», как обычно, снабдила меня таким количеством литературы для чтения, которое я не сумел бы прочесть за предыдущие 7 лет, и оказывала всяческую поддержку.

Наконец, самые главные люди: Сюзан (Suzanne), Барбара (Barbara) и Марвин (Marvin). Сюзан, спасибо тебе за любовь, заботу и замечательные пикники. Барбара и Марвин, вы всегда так веселы и жизнерадостны (кроме тех моментов, когда вы жалуетесь на ужасные учебники из колледжа), что и меня заряжаете этим же настроением. Спасибо вам.

*Эндрю С. Таненбаум*

## От издательства

Ваши замечания, предложения и вопросы отправляйте по адресу электронной почты [comp@piter.com](mailto:comp@piter.com) (издательство «Питер», компьютерная редакция).

Мы будем рады узнать ваше мнение!

Подробную информацию о наших книгах вы найдете на web-сайте издательства <http://www.piter.com>.

# Глава 1 Введение

- ◆ Применение компьютерных сетей
- ◆ Сетевое оборудование
- ◆ Сетевое программное обеспечение
- ◆ Эталонные модели
- ◆ Примеры сетей
- ◆ Стандартизация сетей
- ◆ Единицы измерения
- ◆ Краткое содержание следующих глав
- ◆ Резюме
- ◆ Вопросы

Каждое из трех прошедших столетий ознаменовалось преобладанием своей господствующей технологии. XVIII столетие было веком индустриальной революции и механизации. В XIX веке наступила эпоха паровых двигателей. В течение XX века главной технологией стали сбор, обработка и распространение информации. Среди прочих разработок следует отметить создание глобальных телефонных сетей, изобретение радио и телевидения, рождение и небывалый рост компьютерной индустрии, запуск спутников связи.

Благодаря высокой скорости технологического прогресса эти области очень быстро проникают друг в друга. При этом различия между сбором, транспортировкой, хранением и обработкой информации продолжают быстро исчезать. Организации с сотнями офисов, разбросанных по всему миру, должны иметь возможность получать информацию о текущем состоянии своего самого удаленного офиса мгновенно, нажатием кнопки. По мере роста нашего умения собирать, обрабатывать и распространять информацию потребности в средствах еще более сложной обработки информации растут все быстрее.

Хотя компьютерная индустрия еще довольно молода по сравнению с другими производствами (например, автомобильной или авиационной промышленностью), прогресс в сфере производства компьютеров был весьма впечатляющим. В первые два десятилетия своего существования компьютерные системы были сильно централизованными и располагались, как правило, в пределах одного помещения. Часто эта комната оборудовалась стеклянными стенами, сквозь которые посетители могли полюбоваться на великое электронное чудо. Компания среднего размера или университет могли позволить себе один-два компьютера, тогда как у крупных организаций их число могло достигать нескольких десятков. Сама мысль о том, что через какие-нибудь 20 лет столь же мощные компьютеры будут иметь размеры почтовой марки и производиться миллионами, тогда казалась чистой фантастикой.

Объединение компьютеров и средств связи оказало глубокое влияние на принцип организации компьютерных систем. Концепция «компьютерного центра» в виде комнаты, в которой помещался большой компьютер и куда пользователи приносили свои программы, сегодня полностью устарела. Модель, в которой один компьютер выполнял всю необходимую работу по обработке данных, уступила место модели, состоящей из большого количества отдельных, но связанных между собой компьютеров. Такие системы называются компьютерными сетями. Разработке и устройству сетей и посвящена данная книга.

На протяжении всей книги мы будем использовать термин «компьютерная сеть» для обозначения набора связанных между собой автономных компьютеров. Два компьютера называются связанными между собой, если они могут обмениваться информацией. Связь не обязательно должна осуществляться при помощи медного провода. Могут использоваться самые разнообразные средства связи, включая волоконную оптику, радиоволны высокой частоты и спутники связи. Сети могут отличаться друг от друга также размерами и принципами построения. Как ни странно, ни Интернет, ни так называемая Мировая паутина (WWW) не являются сетями. К концу книги вы поймете, что это всего лишь расхожее заблуждение. Сейчас я дам только короткое объяснение этому: Интернет — это сеть сетей, а Веб — распределенная система на базе Интернета.

В литературе существует путаница между понятиями «компьютерная сеть» и «распределенная система». Основное их различие заключается в том, что в распределенной системе наличие многочисленных автономных компьютеров незаметно для пользователя. С его точки зрения, это единая связанная система. Обычно имеется набор программного обеспечения на определенном уровне (над операционной системой), которое называется связующим ПО и отвечает за реализацию этой идеи. Хорошо известный пример распределенной системы — это Мировая паутина (World Wide Web), в которой, с точки зрения пользователя, все выглядит как документ (веб-страница).

В компьютерных сетях нет никакой единой модели, нет и программного обеспечения для ее реализации. Пользователи имеют дело с реальными машинами, и со стороны вычислительной системы не осуществляется никаких попыток связать их воедино. Скажем, если компьютеры имеют разное аппаратное и программное обеспечение, пользователь не сможет этого не заметить. Если он хочет

запустить программу на удаленной машине, ему придется явно зарегистрироваться на ней и явно дать задание на запуск.

На самом деле распределенная система является программной системой, построенной на базе сети. Эта программная система обеспечивает высокую степень связности и прозрачности элементов. Таким образом, различие между компьютерной сетью и распределенной системой заключается в программном обеспечении (особенно в операционной системе), а не в аппаратуре.

Тем не менее эти два понятия имеют много общего. Например, как компьютерная сеть, так и распределенная система занимаются перемещением файлов. Разница заключается в том, кто вызывает эти перемещения — система или пользователь.

Хотя основной темой этой книги являются сети, многие разделы будут касаться и распределенных систем. Дополнительную информацию о распределенных системах см: Таненбаум Э., ван Стеен М. Распределенные системы. Принципы и парадигмы. СПб.: Питер, 2003 (Tannenbaum and van Steen, 2002).

## Применение компьютерных сетей

Прежде чем приступить к изучению технических подробностей, стоит посвятить некоторое время обсуждению вопросов, почему люди интересуются компьютерными сетями и для чего эти сети могут быть использованы. В конце концов, если бы никто не был заинтересован в развитии этих технологий, то не было бы построено такого огромного количества самых разных сетей. Мы начнем с обсуждения таких традиционных вещей, как корпоративные сети и вообще сети в организациях, использование сетей частными лицами, затем перейдем к новым технологиям, связанным с мобильной связью и домашними сетями.

### Сети в организациях

Многие современные организации используют большое количество компьютеров, зачастую значительно удаленных друг от друга. Например, могут быть отдельные компьютеры для слежения за производственным процессом, учета товаров и начисления заработной платы. Поначалу все эти компьютеры нередко работают изолированно друг от друга, однако в какой-то момент администрация может принять решение соединить их, чтобы иметь возможность быстрого доступа к информации по всей компании.

Если посмотреть на эту проблему с более общих позиций, то вопросом здесь является совместное использование ресурсов, а целью — предоставление доступа к программам, оборудованию и особенно данным любому пользователю сети, независимо от физического расположения ресурса и пользователя. В качестве примера можно привести сетевой принтер, то есть устройство, доступ к которому может осуществляться с любой рабочей станции сети. Это выгодное решение, поскольку нет никакой необходимости в том, чтобы свое печатающее устройство было у каждого служащего, к тому же содержание и обслуживание одного принтера, очевидно, обходится дешевле.

Но, наверное, даже более важной проблемой, нежели совместное использование физических ресурсов (принтеров, сканеров, устройств записи компакт-дисков), является совместное использование информации. В наше время любая компания, независимо от ее размеров, просто немыслима без данных, представленных в электронном виде. Большинство фирм старается вести базу данных клиентов, товаров, счетов, финансовых операций, очень часто требуется налоговая информация и многое другое. Если бы вдруг отказали все компьютеры какого-нибудь банка, даже самого крупного, он обанкротился бы минут за пять, не более. Любое автоматизированное производство с использованием вычислительной техники в этом случае не продержалось бы и столько. Да что там говорить, если даже маленькое туристическое агентство, весь штат которого состоит из трех человек, очень сильно зависит от компьютерных сетей, позволяющих получать доступ к необходимой информации и документам.

В маленьких компаниях все компьютеры обычно собраны в пределах одного офиса или, в крайнем случае, одного здания. Если же речь идет о больших фирмах, то и вычислительная техника, и служащие могут быть разбросаны по десяткам представительств в разных странах. Несмотря на это продавец, находящийся в Нью-Йорке, может запросить и сразу же получить информацию о товарах, имеющихся на складе в Сингапуре. Другими словами, тот факт, что пользователь удален от физического хранилища данных на 15 тысяч километров, никак не ограничивает его возможности доступа к этим данным. Можно сказать, что одной из целей сетей является борьба с «тиранией географии».

Проще всего информационную систему компании можно представить себе как совокупность одной или более баз данных и некоторого количества работников, которым удаленно предоставляется информация. В этом случае данные хранятся на мощном компьютере, называемом **сервером**. Довольно часто сервер располагается в отдельном помещении и обслуживается системным администратором. С другой стороны, компьютеры служащих могут быть менее мощными, они идентифицируются в сети как **клиенты**, могут в большом количестве располагаться даже в пределах одного офиса и иметь удаленный доступ к информации и программам, хранящимся на сервере. (Иногда мы будем называть клиентом пользователя такой машины. Я думаю, вы сможете по контексту догадаться, когда речь идет о компьютере, а когда — о человеке.) Клиентская и серверная машины объединены в сеть, как показано на рис. 1.1. Обратите внимание: пока что мы показываем сеть просто в виде овала, не вдаваясь в детали. Такое представление мы будем использовать при ведении абстрактного разговора о компьютерных сетях. При обсуждении того или иного аспекта их функционирования мы будем «раскрывать» этот овал, узнавая о нем все новые подробности.

Такая система называется **клиент-серверной моделью**. Она используется очень широко и зачастую является основой построения всей сети. Она применима и тогда, когда клиент и сервер находятся в одном здании, и когда они расположены далеко друг от друга. Скажем, когда пользователь получает доступ к интернет-сайту, работает та же модель. При этом веб-сервер играет роль серверной машины, а пользовательский компьютер — клиентской. В большинстве случаев один сервер занимается обслуживанием большого числа клиентов.

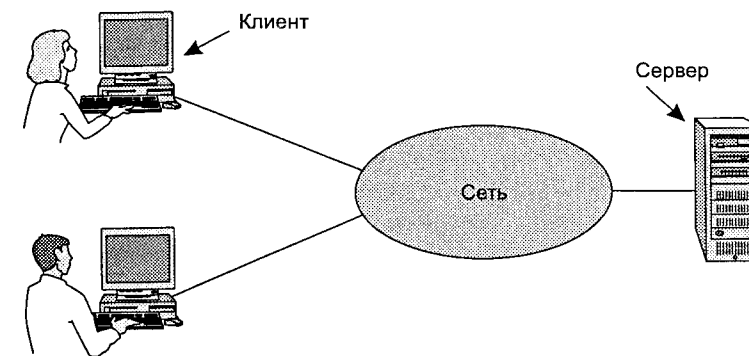


Рис. 1.1. Сеть, состоящая из двух клиентов и одного сервера

Если мы посмотрим на модель «клиент-сервер» чуть пристальнее, то станет очевидно, что в работе сети можно всегда выделить два процесса: серверный и клиентский. Обмен информацией чаще всего происходит так. Клиент посылает запрос серверу через сеть и начинает ожидать ответ. При принятии запроса сервер выполняет определенные действия или ищет запрашиваемые данные, затем отправляет ответ. Все это показано на рис. 1.2.

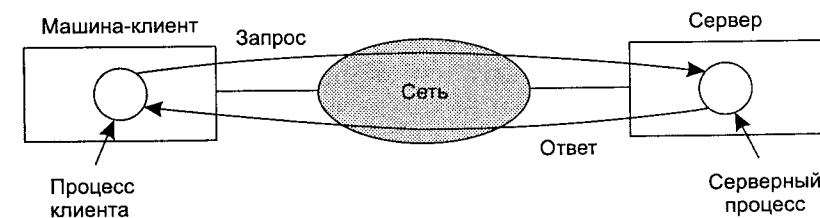


Рис. 1.2. В модели «клиент-сервер» различают запросы и ответы

Вторая цель работы компьютерной сети связана в большей степени с людьми, чем с информацией или вычислительными машинами. Дело в том, что сеть — это замечательная **коммуникационная среда** для работников предприятия. Почти в любой компании найдется хотя бы один компьютер, умеющий принимать и отправлять **электронную почту (e-mail)**, а ведь именно ее большинство людей предпочитает использовать для общения. На самом деле обычное ворчание начальства на тему того, что люди проводят много времени за чтением и написанием электронных писем, совершенно беспочвенно: многие руководители давно уже поняли, что они и сами могут рассылать своим подчиненным электронные послания — это удобно и просто.

Однако e-mail — это далеко не единственное средство связи, предоставляемое сетевыми технологиями. При помощи сети два или более удаленных друг от друга сотрудника могут легко составить совместный отчет. Если один из сотрудников изменяет документ, находящийся на сервере, в подключенном режиме (on-line), остальные сотрудники могут немедленно увидеть эти изменения, а не ждать пись-

ма в течение нескольких дней. Подобное ускорение передачи информации делает возможным сотрудничество удаленных друг от друга групп людей.

Еще одним способом связи между сотрудниками является видеоконференция. Используя эту технологию, можно устраивать встречи, причем собеседники, находящиеся за тысячи километров друг от друга, будут не только слышать, но и видеть друг друга. Кроме того, можно оставлять записи на виртуальной доске, являющейся разделяемым ресурсом (доступным обеим сторонам). Видеоконференции иногда способны заменить реальные встречи, что позволяет сэкономить деньги и время, которые пришлось бы потратить на поездку. Уже идут разговоры о том, что виртуальное общение конкурирует с перемещением в пространстве. Как только что-то одно победит, другое сразу начнет устаревать.

Третья цель применения компьютерных сетей становится очевидна все большему числу компаний — это возможность электронного делового общения с другими компаниями. Особенно это касается взаимоотношений типа «поставщик—клиент». Например, производители автомобилей, компьютеров закупают комплектующие и детали у огромного числа поставщиков, а затем занимаются сборкой конечной продукции. С помощью компьютерных сетей процесс составления и отправки заказов можно автоматизировать. Более того, заказы могут формироваться строго в соответствии с производственными нуждами, что позволяет резко повысить эффективность.

Четвертая цель — это интернет-коммерция. Эта область сейчас является очень перспективной и быстро развивающейся. Через Интернет уже можно приобретать, например, билеты на самолет, книги или музыкальные компакт-диски. Компании, занимающиеся торговлей, в какой-то момент поняли, что многим клиентам удобнее совершать покупки, не выходя из дома. В Интернете начали появляться каталоги продукции и услуг, а заказы пользователь смог осуществлять прямо в подключенном (on-line) режиме. Вся эта технология называется **электронным бизнесом**.

## Использование сетей частными лицами

В 1977 году Кен Олсен (Ken Olsen) был президентом корпорации DEC (Digital Equipment Corporation), которая на тот момент была второй по величине (после IBM) компанией, производящей компьютерную технику. Когда у него спросили, почему DEC не поддерживает идею создания персональных компьютеров, он сказал: «Я не вижу никакого смысла в том, чтобы в каждом доме стоял компьютер». Возможно, он и был прав, но исторический факт заключается в том, что все оказалось как раз наоборот, а корпорация DEC вообще прекратила свое существование. Зачем люди устанавливают компьютеры у себя дома? Изначально основными целями были редактирование текстов и электронные игры. Однако за последние несколько лет ситуация радикальным образом изменилась, и теперь основная причина, по которой многие люди приобретают компьютеры, — это доступ в Интернет. Дома его можно использовать, например, в таких целях:

- ◆ доступ к удаленной информации;
- ◆ общение;

- ◆ интерактивные развлечения;
- ◆ электронный бизнес.

Доступ к удаленной информации может осуществляться в различной форме. Можно бродить по Сети в поисках нужной или просто интересной информации. При этом практически невозможно найти такую область знаний, которая не была бы представлена в Интернете. Там есть искусство, бизнес, кулинария, политика, здоровье, история, различные хобби, отдых, наука, спорт, путешествия и многое-многое другое. Развлекательных тем безумное количество, причем некоторые из них не стоит даже упоминать.

Многие газеты стали доступны в электронном виде, их можно персонализировать. Например, можно заказать себе все статьи, касающиеся коррупции среди политических деятелей, больших пожаров, скандалов, связанных со знаменитостями, эпидемий, но отказаться от статей о футболе. Можно сделать и так, чтобы ночью газета загружалась на ваш жесткий диск или распечатывалась на принтере, — тогда с утра, перед завтраком, вы ее с удовольствием прочтете. Конечно, это все может привести к массовой безработице среди подростков, продающих на улицах газеты, но сами редакции довольны таким поворотом событий, поскольку распространение всегда было самым слабым звеном в их производственной цепочке.

Следующий шаг после создания электронных версий газет и журналов — это онлайн-библиотеки. Многие профессиональные организации, такие как ACM ([www.acm.org](http://www.acm.org)) и даже объединение IEEE ([www.computer.org](http://www.computer.org)), уже занимаются этим. Да и другие фирмы и частные лица выкладывают свои коллекции самых разнообразных материалов в Интернете. Если учесть, что цены на ноутбуки падают, а их размер и вес уменьшаются, не исключено, что в скором времени печатные издания начнут морально устаревать. Скептики уже сейчас сравнивают это с эффектом от появления в средние века печатного станка, который заменил ручное письмо.

Все приведенные возможности применения сетей включают взаимодействие между пользователем и удаленной базой данных. Следующей категорией применения сетей является общение между частными лицами, что можно назвать ответом XXI века XIX с его изобретением телефона. Электронная почта уже широко используется миллионами людей, и скоро включение в письмо изображения и звука наравне с текстом станет обычным делом. Несколько большего периода времени, по-видимому, потребует достижение совершенства в передаче запахов.

Огромное количество подростков обожает так называемую **систему диалоговых сообщений (чатов)**. А все, между прочим, начиналось с программы *talk*, написанной под UNIX еще примерно в 1970 году. Она позволяла двум пользователям обмениваться сообщениями в реальном времени. Когда пользователей, принимающих участие в разговоре, становится больше, это превращается в то, что называется чатом.

Всемирные конференции, в которых обсуждаются всевозможные темы, уже вполне обычны для некоторых групп людей и вскоре, возможно, станут привычными для большинства населения планеты. Подобные обсуждения, в которых

один человек посылает сообщение, а прочитать его могут все остальные подписчики конференции, охватывают весь спектр тем, от юмористических до самых серьезных. В отличие от чатов, конференции не проводятся в реальном времени, а сохраняются в виде сообщений, чем-то напоминающих электронную почту. Поэтому, скажем, вернувшись из отпуска, подписчик может прочитать все дискуссии, которые велись во время его отсутствия.

Еще один тип сетевого общения основан на технологии **равноранговых сетей (peer-to-peer)**. Эта модель принципиально отличается от модели «клиент-сервер» (Paragameswaran и др., 2001). Люди, входящие в некоторую группу пользователей, могут общаться друг с другом. В принципе, каждый может связаться с каждым, разделение на клиентские и серверные машины в этом случае отсутствует. Это показано на рис. 1.3.

Такого рода коммуникации стали очень популярны примерно в 2000 году, они были реализованы с помощью службы Napster. В апогее своего развития равноранговая сеть насчитывала порядка 50 миллионов (!) любителей музыки, которые обменивались записями, и это, пожалуй, было самое масштабное нарушение закона об авторских правах за всю историю звукозаписи. Идея была очень проста. Члены группы вносили информацию об имеющихся на их жестких дисках аудиозаписях в специальную базу данных, хранившуюся на сервере Napster. Если кто-то хотел скачать какую-нибудь песню или альбом, он смотрел по этой базе, у кого есть соответствующие файлы, и обращался напрямую к их владельцу. Поскольку на самом сервере Napster никогда не хранился ни один аудиофайл, компания утверждала, что никакие законы она не нарушает. Тем не менее суд постановил прекратить деятельность этой службы.

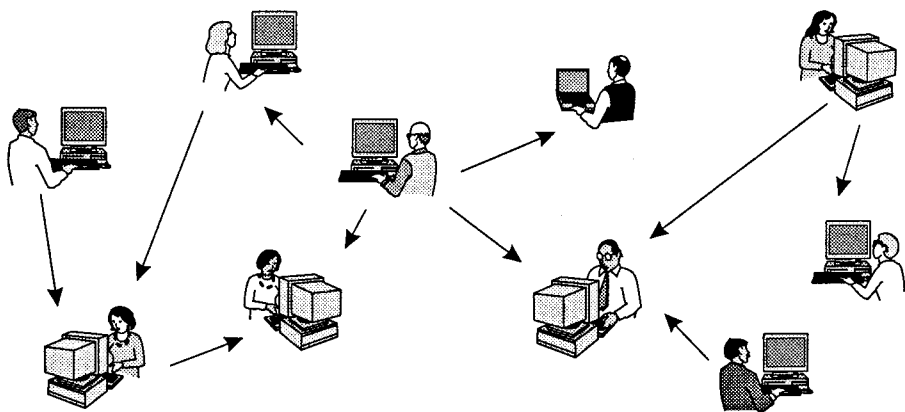


Рис. 1.3. В равноранговой сети нет четко определенных клиентов и серверов

Пользователи этой системы, видимо, приняли все это к сведению, и следующее поколение равноранговых сетей отличалось отсутствием централизованной базы данных. Теперь каждый член группы стал поддерживать свою базу и вести список группы. Новый пользователь узнавал, что есть у какого-то одного члена бывшей группы Napster, а также получал список всех остальных членов, у кото-

рых мог запросить какие-то другие музыкальные файлы. Процесс поиска, таким образом, мог продолжаться бесконечно, и каждый пользователь мог составить собственную довольно объемную базу данных. Такой род деятельности, конечно, утомляет человека, но компьютер при соответствующей настройке программного обеспечения прекрасно с этим справляется.

Между тем существуют и легальные равноранговые сети. Например, теми же записями можно обмениваться, если музыканты выпустили какие-то треки для публичного воспроизведения и не претендуют на полноценные авторские права. Бывают семейные сети, в которых люди обмениваются фотографиями, любительскими фильмами, информацией, касающейся генеалогического древа, и т. п. Существуют равноранговые сети, организованные подростками, увлекающимися онлайн-играми. Между прочим не стоит забывать и о том, что самая популярная интернет-технология — e-mail — выросла именно из идеи равноранговых сетей. Такой вид коммуникаций вообще является перспективным, и в будущем он еще будет довольно активно развиваться.

Преступления с применением компьютерных сетей, увы, не ограничиваются только нарушением закона об авторских правах. Еще одна сфера деятельности мошенников — это электронные азартные игры. Компьютеры вот уже несколько десятилетий с успехом занимаются симуляцией самых разных вещей. Почему бы не научить их симулировать игровые автоматы, рулетки и т. п.? Все это замечательно, но во многих странах действует закон, запрещающий играть в азартные игры. Причем основная проблема заключается в том, что существуют места, где это официально разрешено (например, Англия), и тамошние владельцы казино, почуяв, что их деятельностью может заинтересоваться новый огромный сектор веб-клиентуры, стали развивать это направление. А что будет, если игрок и виртуальное казино окажутся в разных странах, в которых действуют противоречивые законы? Хороший вопрос.

Среди других прикладных направлений, использующих средства Интернета, стоит отметить IP-телефонию, виртуальные видеофоны, интернет-радио. Все это сегодня находится в стадии стремительного развития. Еще одна большая прикладная область — электронные образовательные программы. Например, можно посещать виртуальную школу, и для того чтобы успеть на первый урок, начинающийся в 8 утра, не придется предварительно вставать с постели. В дальнейшем именно сетевое общение станет фаворитом среди всех других средств коммуникации.

Наша третья категория — развлечения — является гигантской индустрией, продолжающей развиваться. Основным направлением сейчас является видео по заказу. Лет через десять будет можно выбрать любой фильм или телевизионную передачу из когда-либо и где-либо снятых и увидеть ее мгновенно на своем экране. Новые фильмы могут стать интерактивными, где пользователю периодически будет предлагаться выбор сюжетной линии (должен ли Макбет убить Дункана сейчас или немного подождать?) с альтернативными сценариями, заготовленными для всех случаев. Телевидение тоже может стать интерактивным — с участием аудитории в викторинах, с возможностью выбора победителя и т. п.

С другой стороны, может быть видео по заказу и не станет главным направлением индустрии сетевых развлечений. Возможно, им станут сетевые игры. Уже сейчас существуют игры-симуляторы в реальном времени с большим количеством участников — например, прятки в виртуальном средневековом замке или симуляторы полетов, в которых одна команда пытается сбить игроков команды противника. Если в такие игры играть в специальных стереоскопических очках при фотографическом качестве движущихся в реальном времени трехмерных образов, мы будем иметь что-то вроде всемирной виртуальной реальности совместного доступа.

Четвертой выделенной нами категорией является электронная коммерция в самом широком смысле слова. Закупка продуктов и вещей для дома через Интернет уже давно стала привычным делом. У покупателя появился богатый выбор, поскольку компаний, предлагающих приобрести что-либо по веб-каталогу, с каждым днем становится все больше, и счет уже идет на тысячи. Некоторые из этих каталогов в скором времени наверняка будут предлагать рекламные видеоролики, которые можно будет посмотреть, щелкнув на названии товара. Если клиент купил некий продукт, но не знает, что с ним делать, ему поможет сетевая служба поддержки.

Электронная коммерция развивается и в другом серьезном направлении: организуется доступ к финансовым учреждениям. Многие уже давно оплачивают свои векселя, управляют банковскими счетами и работают с вкладами с помощью соответствующих сетевых служб. По мере прогресса в области защиты передаваемой информации эти службы, безусловно, будут развиваться.

Еще одна область, которую вряд ли кто-то мог предвидеть, — это электронные «блошинные» рынки. Онлайн-аукционы, на которых распродают подержанные вещи, стали довольно мощной сетевой индустрией. В отличие от традиционных форм электронной коммерции, использующих модель «клиент-сервер», такие разновидности бизнеса ближе к равноранговым сетям (как бы по формуле «клиент — клиенту»). Некоторые формы сетевой коммерции со временем обрели сокращенные обозначения, которые приведены в табл. 1.1. (Английский предлог *to*, отвечающий на вопросы «кому?», «чему?», произносится так же, как *two*). Исходя из этого и выбирались обозначения.)

**Таблица 1.1.** Некоторые формы электронной коммерции

Обозначение	Полное название	Пример
B2C	Коммерсант клиенту (Business-to-Consumer)	Заказ книг в режиме on-line
B2B	Коммерсант коммерсанту (Business-to-Business)	Производитель автомобилей заказывает покрышки у поставщика
G2C	Государство клиенту (Government-to-Client)	Распространение бланков квитанций через Интернет
C2C	Клиент клиенту (Client-to-Client)	Продажа подержанных вещей
P2P	Равноранговые сети (Peer-to-Peer)	Совместное пользование файлами

Вне всякого сомнения, возможности компьютерных сетей будут со временем расширяться. Причем направления развития могут быть самыми неожиданными. Ну кто 10 лет назад мог предвидеть, что подростки будут с удовольствием заниматься таким скучным делом, как обмен SMS-сообщениями, а автобусные компании, перевозящие этих подростков, будут способствовать получению телефонными компаниями немалой прибыли?

Компьютерные сети объединили людей, которые оказались в силу разных обстоятельств отделены друг от друга своим географическим расположением. Люди, живущие далеко от цивилизации, но имеющие компьютер и доступ в Интернет, могут почувствовать себя городскими жителями, быть в курсе всех событий и жить полной современной жизнью. Электронные образовательные программы могут сильно повлиять на образование вообще; университеты могут запросто обслуживать учащихся со всей страны или планеты. Телекоммуникации в области медицины находятся на начальной стадии развития (хотя уже существуют системы, позволяющие удаленно контролировать состояние пациента), но и здесь они могут со временем начать играть большую роль. Однако настоящей приманкой для пользователей должно быть что-нибудь приземленное и в то же время сногшибательное, например использование веб-камеры в холодильнике для определения момента, когда количество пакетов молока в нем дойдет до минимума.

## Использование беспроводных сетей

Мобильные компьютеры — ноутбуки и карманные компьютеры (PDA) — это еще одна область, в которой сейчас наблюдается бурное развитие. У их владельцев обычно имеется настольный компьютер на работе, но они хотят поддерживать постоянную связь с домашней «базой». Так как обычные сети, в которых информация передается по проводам, невозможно использовать в машине или самолете, люди задумываются о беспроводных сетях. В этом разделе мы вкратце рассмотрим вопросы их применения.

Итак, для чего же реально требуются беспроводные сети? Самое популярное применение — мобильный офис. Многим людям бывает необходимо, находясь в пути, совершать телефонные звонки, отправлять и принимать факсы и электронную почту, иметь доступ в Интернет и к удаленным машинам. Все эти возможности должны быть предоставлены независимо от местонахождения пользователя. Например, организаторы компьютерных конференций зачастую используют мобильные сети. Имея ноутбук и беспроводный модем, можно подключиться к Интернету и получить доступ к информации в том же объеме, что и при использовании настольного компьютера. В некоторых университетах в студенческих городках организуются беспроводные сети, и тогда студент, сидя в сквере под деревом, может посещать виртуальную академическую библиотеку или читать электронную почту.

Такого рода сети уже давно и с успехом применяются в больших компаниях, занимающихся грузоперевозками, в таксопарках, службах доставки почты и ремонта. Там это жизненно необходимо — как для отслеживания пути передвиже-

ния транспорта и груза, так и для поддержания постоянной связи с диспетчерами. Например, во многих местах водители такси являются частными предпринимателями, не относящимися к какому-либо таксопарку. У них в машинах имеется электронное табло. Когда на централизованный пульт поступает заявка, диспетчер вводит данные о местонахождении пассажира и требуемом месте назначения. Информация появляется одновременно на экранах у всех водителей и сопровождается звуковым сигналом. Тот водитель, который первым нажмет кнопку, считается принявшим заявку.

Беспроводные сети находят широкое применение и в военном деле. При ведении боевых действий в совершенно произвольном месте планеты не приходится рассчитывать на инфраструктуру местных сетей связи и нужно организовывать свою сеть.

Хотя мобильные компьютеры и беспроводные сети тесно связаны между собой, все же это не одно и то же. Это отражено в табл. 1.2. Можно заметить, что есть разница между **стационарными** и **мобильными беспроводными сетями**. Даже ноутбуки иногда подключают к обычной компьютерной сети. Если пользователь, скажем, в номере гостиницы подключит его к телефонной розетке, он получит мобильность при отсутствии беспроводной сети.

С другой стороны, и наличие беспроводной сети еще не говорит о наличии мобильности. В качестве примера можно привести компанию, арендующую помещение в старом здании, в котором отсутствует проводка, необходимая для компьютерной сети. Тем не менее, этой компании нужно как-то связать между собой компьютеры, вот и приходится организовывать беспроводную сеть. А это несколько сложнее, чем покупка маленькой коробочки, напичканной электроникой, и включение ее в розетку. Как ни странно, беспроводная сеть в этом случае может обойтись дешевле, поскольку прокладка кабеля — довольно дорогое удовольствие.

**Таблица 1.2.** Сочетания беспроводных сетей и мобильных компьютеров

Беспроводная сеть	Мобильность	Применение
Нет	Нет	Настольные компьютеры в офисах
Нет	Есть	Ноутбук в номере гостиницы
Есть	Нет	Сети в старых зданиях, в которых не проложена проводка
Есть	Есть	Мобильный офис; PDA, хранящий информацию о товарах

Разумеется, есть и полноценные мобильные применения беспроводных сетей — от мобильных офисов до PDA, которые не дают людям в супермаркете забыть, за какими товарами они сюда пришли. Во многих крупных и загруженных аэропортах служащие, принимающие на стоянках арендованные машины, зачастую используют портативные компьютеры. Они набирают государственный номер машины, связываются с главным компьютером, получают от него информацию, а встроенный в PDA принтер сразу же распечатывает счет.

По мере развития подобных технологий возникают все новые их применения. Рассмотрим некоторые из них. Электронные счетчики, установленные на город-

ских стоянках автотранспорта, выгодны как владельцам автомобилей, так и государству. Такие счетчики могут работать с кредитными карточками, запрашивая их подтверждение по беспроводной сети. Когда оплаченное время стоянки заканчивается, проверяется наличие на стоянке машины (принимается отраженный от нее сигнал), и если она все еще там, об этом сообщается в полицию. Подсчитано, что таким образом в американский бюджет ежегодно поступает до 10 миллиардов долларов (Harte и др., 2000). Более того, это благотворно влияет на окружающую среду, так как водитель, уверенный в том, что он, как всегда, опоздает к окончанию времени стоянки и ему снова придется платить штраф, лучше воспользуется общественным транспортом.

Торговые автоматы, в которых продается какая-нибудь еда или напитки, можно встретить повсеместно. Как ни странно, продукты в них не появляются сами по себе. Время от времени приезжает служащий и заполняет их. Раз в день автомат отправляет по беспроводной линии связи на центральный компьютер электронный отчет, в котором сообщается, какая продукция требуется в каком количестве. Конечно, для этого можно использовать и обычную телефонную линию, но, знаете ли, подводить к каждому торговому автомату свою телефонную линию ради одного звонка в день — это слишком шикарно.

Еще одна область, в которой использование беспроводных сетей могло бы сэкономить деньги, — это снятие показаний счетчиков коммунальных услуг. Действительно, если бы счетчики электричества, газа, воды и т. д. самостоятельно отправляли данные, не пришлось бы оплачивать труд сотрудников, которые ходят по домам и записывают показания. Дымоуловители могут позвонить в пожарную службу вместо того, чтобы включать сирену, которая становится особенно бессмысленной, если дома никого нет. Стоимость радиопередающих и принимающих устройств снижается, как и плата за эфирное время, а значит, все больше и больше разнообразных применений можно реализовать без существенных финансовых затрат.

Совершенно иной прикладной областью, связанной с радиопередачей цифрового сигнала, является интеграция мобильных телефонов и PDA. Первой реализацией этой идеи стали крохотные PDA, которые могли отображать веб-странички на своих еще более крохотных экранах. Эта система основывалась на совершенно новом протоколе **WAP 1.0** (протокол, предназначенный для распространения информационных материалов по сети Интернет). Но он канул в Лету из-за того, что экраны были слишком маленькими, пропускная способность канала была низкой, да и качество предоставляемых услуг оставляло желать лучшего. Новые устройства подобного рода уже используют протокол WAP 2.0.

Одна из областей, в которой такая технология может иметь большой успех, это **мобильная коммерция (m-commerce)**. Движущей силой развития этого направления является стремление производителей PDA и сетевых операторов ухватить кусок пирога электронной коммерции. Одна из надежд, лелеемых ими, — использование беспроводных PDA для осуществления банковских операций и покупок в интернет-магазинах. Такие устройства и впрямь можно использовать в качестве электронного бумажника, оплачивая покупки даже в обычных магазинах. Это уже новое слово по сравнению с кредитными картами и даже смарт-кар-



тами. Реальная оплата при этом может выражаться в увеличении суммы счета за мобильный телефон. Магазины это выгодно, поскольку на данный момент такая схема позволяет избежать оплаты услуг за совершение операций с кредитными картами. Впрочем, есть и оборотная сторона вопроса, вовсе не выгодная для магазина: клиент, прежде чем совершить покупку, с помощью своего PDA может узнать, где выбранные им товары можно купить дешевле. Более того, PDA могут быть снабжены небольшим встроенным сканером для чтения штрихкода продукции и получения детальной информации о том, где еще и по какой цене она продается.

Поскольку сетевой оператор знает, где находится пользователь, он может предложить некоторые услуги, опирающиеся на это знание. Например, можно узнать, где находится ближайший книжный магазин или китайский ресторан. Еще одна замечательная возможность — мобильные карты местности. А как вам нравятся очень локализованные прогнозы погоды? Удобное, наверное, спросить: «Когда же, наконец, перестанет лить дождь у меня во дворе?» Нет никаких сомнений в том, что со временем появятся и другие интересные применения мобильных сетей.

У операторов мобильных сетей, а значит, и у м-коммерции есть одно замечательное преимущество. В отличие от пользователей Интернета, абоненты мобильных телефонов привыкли за все платить. Если на каком-нибудь сайте промелькнет упоминание о том, что за оплату с помощью кредитной карты будут взиматься какие-то сборы, то посетители поднимут большой шум. Если же оператор мобильной связи за небольшую плату любезно предоставит возможность оплатить покупки в магазине с помощью телефона, наверное, это будет воспринято нормально. Впрочем, время покажет.

В будущем, вероятно, будут развиваться технологии, основанные на всеобщей тенденции миниатюризации вычислительной техники. Это касается персональных сетей и носимых компьютеров. Фирмой IBM уже разработаны наручные часы со встроенной операционной системой Linux (включая систему управления окнами X11). Они имеют выход в Интернет, с их помощью можно отправлять и получать электронную почту (Narayanawami и др., 2002). В будущем можно будет обмениваться визитными карточками, просто показывая друг другу свои часы. Подобные устройства могут служить персональными электронными идентификаторами для прохода в различные секретные помещения с ограниченным доступом. Такую роль сейчас играют специальные магнитные карты. Идентификацию можно будет дополнительно осуществлять с помощью ввода PIN-кода или снятия каких-нибудь биометрических показаний. Такие хитрые часы можно будет использовать для определения собственного местоположения и поиска каких-нибудь близлежащих объектов (например, ресторанов). Возможности ограничены только человеческой фантазией.

К умным часам со встроенным радиоприемником мы начали привыкать тогда, когда о них впервые рассказал в юмористическом монологе Дик Трэиси (Dick Tracy) в 1946 году. Но привыкнуть к тому, что уже сейчас появляется «умная пыль», очень непросто. Ученые из Беркли смогли разместить беспроводной компьютер в кубике со стороной 1 мм (Warneke и др., 2001). Потенциальные применения таких микроскопических устройств включают в себя сопровождение товаров, маленьких птичек, грызунов и даже насекомых!

## Социальный аспект

Широкое распространение сетей вызвало новые социальные, этические и политические проблемы. Рассмотрим кратко лишь некоторые из них, так как подробное обсуждение потребует, как минимум, отдельной книги. Популярной чертой многих сетей являются конференции или электронные доски объявлений, где люди могут обмениваться сообщениями по самым различным темам. До тех пор, пока обсуждаемый предмет не выходил за рамки техники или увлечений вроде возделывания огородов, проблем, которые могут возникнуть, было не так уж много.

Проблемы начались с возникновением конференций, посвященных темам, понастоящему волнующим людей, таким как политика, религия или секс. Взгляды, излагаемые одними людьми, могут оказаться оскорбительными для других. Они и в самом деле зачастую далеки от норм политкорректности. Кроме того, сетевые технологии, как известно, не ограничены только лишь передачей текста. Без особых проблем по Сети ходят фотографии с высоким разрешением и даже видеофрагменты. Некоторые люди придерживаются позиции «живи и дай жить другим», однако другие считают, что помещение в сети некоторых материалов (например, детской порнографии) просто недопустимо. Законодательства разных стран имеют разные взгляды на эту проблему; таким образом, страсти накаляются.

Люди подают в суд на сетевых операторов, считая их ответственными за содержимое сайтов, подобно тому как газеты и журналы несут ответственность за содержимое своих страниц. В ответ же операторы сетей утверждают, что сеть подобна телефонной компании или почтовому отделению и они не могут отвечать за то, что говорят их клиенты, а тем более управлять содержанием этих разговоров. Более того, если бы операторы были обязаны подвергать сообщения цензуре, им пришлось бы удалять все сообщения, которые оставляют даже малейшую возможность судебного иска, и, таким образом, нарушают права пользователей на свободу слова. Можно с уверенностью сказать, что подобные дебаты будут тянуться еще довольно долго.

Еще одной областью конфликтов оказались права наемных работников, вступившие в противоречие с правами нанимателей. Некоторые наниматели считают себя вправе читать и, возможно, подвергать цензуре сообщения своих работников, включая сообщения, посланные с домашних терминалов после работы. Не все с этим согласны.

Если даже наниматель имеет право обращаться подобным образом с корреспонденцией своих работников, то как же быть с государственными университетами и их студентами? А как насчет школ и учеников? В 1994 году университет Карнеги—Меллона (Carnegie—Mellon University) решил не пропускать через сеть входящий поток сообщений для некоторых конференций, посвященных вопросам секса, поскольку университет счел данный материал неприемлемым для студентов младших курсов (то есть для студентов моложе 18 лет). Пройдет не один год, пока эти события забудутся.

Очень серьезной проблемой являются взаимоотношения государства и граждан. Известно, что ФБР установило на серверах многих поставщиков услуг Интернета системы слежения за всеми входящими и исходящими сообщениями, что должно, по мнению США, служить интересам государственной безопасности

(Blaze, Bellovin, 2000; Sobel, 2001; также Zacks, 2001). Система изначально называлась **Carnivore** (что в переводе означает «хищник». — *Примеч. перев.*), однако такое зловещее название обращало на себя слишком много внимания общественности. Было решено переименовать систему и назвать ее невинным именем — DCS1000. Но ее цель от этого не изменилась. «Хищник» следит за миллионами людей в надежде найти в их письмах намеки на незаконную деятельность. К сожалению, Четвертая поправка к Конституции США запрещает не обеспеченную какими-либо доказательствами слежку. Вопрос о том, имеют ли эти 54 слова какой-либо вес в XXI веке, судя по всему, будет обсуждаться еще и в XXII веке.

Хотелось бы подчеркнуть, что государство не имеет права угрожать частной жизни людей. Впрочем, подобными нелицеприятными действиями занимается не только ФБР, но и самые обыкновенные веб-дизайнеры. Взять хотя бы cookie-файлы, содержащие информацию о том, что пользователь делал в Сети, и позволяющие нечистым на руку компаниям узнавать конфиденциальную информацию и передавать через Интернет номера кредитных карт и другие важные идентификаторы (Berghel, 2001).

Компьютерные сети предоставляют возможности для посылки анонимных сообщений. В некоторых ситуациях такая необходимость есть. Например, таким образом студенты, солдаты, служащие и граждане могут пожаловаться на незаконные действия профессоров, офицеров, начальства и политиков, не опасаясь репрессий. С другой стороны, в США и во многих других демократических странах законом особо предусмотрено право обвиняемой стороны на очную ставку со своим обвинителем в суде, а также на встречный иск. Поэтому анонимные обвинения не могут рассматриваться в качестве свидетельств в суде.

Итак, подобно печатному станку 500 лет назад, компьютерные сети предоставляют новые способы распространения гражданами их взглядов среди самой различной аудитории. Новая свобода распространения информации несет с собой и новые нерешенные политические, социальные и нравственные проблемы.

Все хорошее имеет свою оборотную сторону. Похоже, так устроена жизнь. Интернет позволяет с огромной скоростью находить нужную информацию, однако кто проверит ее качество и достоверность? Совет врача, которого так ждет тяжелобольной человек, может на самом деле исходить как от лауреата Нобелевской премии в области медицины, так и от разгильдяя, которого выгнали из школы и которому нечем заняться. Компьютерные сети породили новые виды антиобщественных преступлений. Электронная макулатура, «спам», стала, увы, частью нашей жизни, потому что есть способы собрать миллионы адресов e-mail и рассылать по ним все что угодно. Более того, списки этих адресов продаются на пиратских компакт-дисках, которые покупают горе-коммерсанты. Сообщения, передаваемые по электронной почте, могут также содержать злобные разрушительные вирусы.

Воровство конфиденциальной информации, к сожалению, тоже стало очень распространенным явлением. Новые воры ничего не взламывают физически. Они крадут лишь несколько казалась бы ничего не значащих символов. Эти символы оказываются, например, номерами кредитных карт, с которых вдруг таинственным образом начинают исчезать деньги. Наконец, возможность передачи через Интернет достаточно качественной аудио- и видеoinформации позволило заин-

тересованным лицам нарушать все мыслимые законы об авторских правах. А вычислить нарушителей оказалось делом очень непростым.

Многие из этих проблем могут быть решены, если компьютерная индустрия всерьез займется вопросами защиты информации. Если бы все сообщения передавались в зашифрованном виде, это позволило бы избежать огромных убытков, понесенных как частными лицами, так и крупными компаниями. Более того, системы кодирования уже давно разработаны, и мы подробно изучим их в главе 8. Проблема в том, что производители аппаратного и программного обеспечения прекрасно знают, каких денег стоит внедрение защитных систем, и понимают, что попытки продать такую дорогостоящую продукцию обречены. Немало хлопот доставляют и «баги» (ошибки в программах), «дыры» в защите и т. д. Они возникают потому, что производители добавляют все новые и новые функции, а это приводит к увеличению числа неполадок. Возможным выходом из такой ситуации является взимание платы за расширенные версии программ, однако поди заставь конторы, занимающиеся разработкой ПО, отказаться от такого хорошего рекламного хода, как бесплатные обновления. Можно, конечно, обязать фирмы возмещать убытки, нанесенные выпущенными ими дефектными программами, однако это приведет к банкротству практически всей программной индустрии в первый же год.

## Сетевое оборудование

Теперь пора от вопросов применения сетей и социальных аспектов перейти к рассмотрению технической стороны разработки сетей. Единой общепринятой системы, которой удовлетворяют все сети, не существует, однако есть два важнейших параметра: технология передачи и размеры. Рассмотрим оба параметра по очереди.

Если смотреть в общих чертах, существует два типа технологии передачи:

- ◆ широковещательные сети;
- ◆ сети с передачей от узла к узлу.

Широковещательные сети обладают единым каналом связи, совместно используемым всеми машинами сети. Короткие сообщения, называемые в некоторых случаях пакетами, которые посылаются одной машиной, получают все машины. Поле адреса в пакете указывает, кому направляется сообщение. При получении пакета машина проверяет его адресное поле. Если пакет адресован этой машине, она его обрабатывает. Пакеты, адресованные другим машинам, игнорируются.

В качестве иллюстрации представьте себе человека, стоящего в конце коридора с большим количеством комнат и кричащего: «Ватсон, идите сюда. Вы мне нужны». И хотя это сообщение может быть получено (услышано) многими людьми, ответит только Ватсон. Остальные просто не обратят на него внимания. Другим примером может быть объявление в аэропорту, предлагающее всем пассажирам рейса 644 подойти к выходу номер 12.

Широковещательные сети также позволяют адресовать пакет одновременно всем машинам с помощью специального кода в поле адреса. Когда передается пакет с таким кодом, его получают и обрабатывают все машины сети. Такая опера-

ция называется **широковещательной передачей**. Некоторые широковещательные системы также предоставляют возможность посылать сообщения подмножеству машин, и это называется **многоадресной передачей**. Одной из возможных схем реализации этого может быть резервирование одного бита для признака многоадресной передачи. Оставшиеся  $n-1$  разрядов адреса могут содержать номер группы. Каждая машина может «подписаться» на одну, несколько или все группы. Когда пакет посылается определенной группе, он доставляется всем машинам, являющимся членами этой группы.

Сети с передачей от узла к узлу, напротив, состоят из большого количества соединенных пар машин. В сети подобного типа пакету, чтобы добраться до пункта назначения, необходимо пройти через ряд промежуточных машин. Часто при этом существует несколько возможных путей от источника до получателя, поэтому алгоритмы вычисления таких путей играют очень важную роль в сетях с передачей от узла к узлу. Обычно (хотя имеются и исключения) небольшие, географически локализованные в одном месте сети используют широковещательную передачу, тогда как в более крупных сетях применяется передача от узла к узлу. В последнем случае имеется один отправитель и один получатель, и такую систему иногда называют **однонаправленной передачей**.

Другим признаком классификации сетей является их размер. На рис. 1.4 приведена классификация мультипроцессорных систем в зависимости от их размеров. В верхней строке таблицы помещаются **персональные сети**, то есть сети, предназначенные для одного человека. Примером может служить беспроводная сеть, соединяющая компьютер, мышь, клавиатуру и принтер. Устройство типа PDA, контролирующее работу слухового аппарата или являющееся кардиостимулятором, тоже попадает в эту категорию. Далее в таблице следуют более протяженные сети. Их можно разделить на локальные, муниципальные и глобальные сети. И замыкают таблицу объединения двух и более сетей.

Расстояние между процессорами	Процессоры расположены	Пример
1 м	На одном квадратном метре	Персональная сеть
10 м	Комната	
100 м	Здание	
1 км	Кампус	Локальная сеть
10 км	Город	
100 км	Страна	Муниципальная сеть
1000 км	Континент	
10 000 км	Планета	Интернет

Рис. 1.4. Классификация мультипроцессорных систем по размеру

Хорошо известным примером такого объединения выступает Интернет. Размеры сетей являются весьма важным классификационным фактором, поскольку в сетях различного размера применяется различная техника. В данной книге мы рассмотрим сети всех размеров, а также их объединения. Далее мы дадим краткое описание сетевого оборудования.

## Локальные сети

**Локальными сетями** называют частные сети, размещающиеся, как правило, в одном здании или на территории какой-либо организации площадью до нескольких квадратных километров. Их часто используют для объединения компьютеров и рабочих станций в офисах компании или предприятия для предоставления совместного доступа к ресурсам (например, принтерам) и обмена информацией. Локальные сети отличаются от других сетей тремя характеристиками: размерами, технологией передачи данных и топологией.

Локальные сети ограничены в размерах — это означает, что время пересылки пакета ограничено сверху и этот предел заранее известен. Знание этого предела позволяет применять определенные типы разработки, которые были бы невозможны в противоположном случае. Кроме того, это упрощает управление локальной сетью.

В локальных сетях часто применяется технология передачи данных, состоящая из единственного кабеля, к которому присоединены все машины. Это подобно тому, как раньше в сельской местности использовались телефонные линии. Обычные локальные сети имеют пропускную способность канала связи от 10 до 100 Мбит/с, невысокую задержку (десятые доли микросекунды) и очень мало ошибок. Наиболее современные локальные сети могут обмениваться информацией на более высоких скоростях, достигающих до 10 Гбит/с. В этой книге мы будем придерживаться традиции и указывать скорость линий в мегабитах в секунду (1 Мбит состоит из 1 000 000 бит) и в гигабитах в секунду (1 Гбит равен 1 000 000 000 бит).

В широковещательных локальных сетях могут применяться различные топологические структуры. На рис. 1.5 показаны две из них. В сети с общей шиной (линейный кабель) в каждый момент одна из машин является хозяином шины (**master**) и имеет право на передачу.

Все остальные машины должны в этот момент воздержаться от передачи. Если две машины захотят что-нибудь передавать одновременно, то возникнет конфликт, для разрешения которого требуется специальный механизм. Этот механизм может быть централизованным или распределенным. Например, стандарт IEEE 802.3, называемый **Ethernet**, описывает широковещательную сеть с топологией общей шины с децентрализованным управлением, работающую на скоростях от 10 Мбит/с до 10 Гбит/с. Компьютеры в сети Ethernet могут выполнять передачу в любое время. При столкновении двух или более пакетов каждый компьютер просто ждет в течение случайного интервала времени, после которого снова пытается передать пакет.

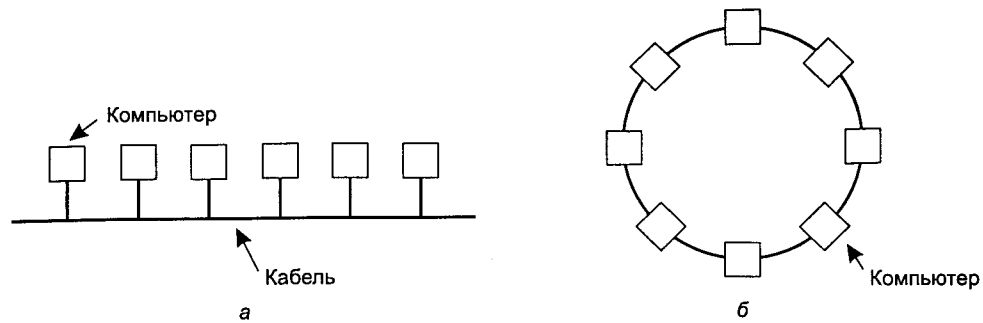


Рис. 1.5. Широковещательные сети: шина (а); кольцо (б)

Вторым типом широковещательных сетей является кольцо. В кольце каждый бит передается по цепочке, не ожидая остальной части пакета. Обычно каждый бит успевает обойти все кольцо, прежде чем будет передан весь пакет. Как и во всех широковещательных сетях, требуется некая система арбитража для управления доступом к линии. Применяемые для этого методы будут описаны далее в этой книге. Стандарт IEEE 802.5 (маркерное кольцо) описывает популярную кольцевую локальную сеть, работающую на скоростях 4 и 16 Мбит/с. Еще одним примером кольцевой сети является FDDI (оптоволоконная сеть).

В зависимости от способа назначения канала широковещательные сети подразделяются на статические и динамические. При статическом назначении используется циклический алгоритм и все время делится между всеми машинами на равные интервалы, так что машина может передавать данные только в течение выделенного ей интервала времени. При этом емкость канала расходуется неэкономно, так как временной интервал предоставляется машинам независимо от того, есть им что сказать или нет. Поэтому чаще используется динамическое (то есть по требованию) предоставление доступа к каналу.

Методы динамического предоставления доступа к каналу также могут быть централизованными либо децентрализованными. При централизованном методе предоставления доступа к каналу должен существовать арбитр шины, определяющий машину, получающую право на передачу. Арбитр должен принимать решение на основании получаемых запросов и некоего внутреннего алгоритма. При децентрализованном методе каждая машина должна сама решать, передавать ей что-нибудь или нет. Можно подумать, что подобный метод обязательно приводит к беспорядку, однако это не так. Далее мы рассмотрим различные алгоритмы, специально созданные для внесения порядка в возможный хаос.

## Муниципальные сети

**Муниципальные сети** (metropolitan area network, MAN) объединяют компьютеры в пределах города. Самым распространенным примером муниципальной сети является система кабельного телевидения. Она стала правопреемником обычных антенных телесетей в тех местах, где по тем или иным причинам качество эфира

было слишком низким. Общая антенна в этих системах устанавливалась на вершине какого-нибудь холма, и сигнал передавался в дома абонентов.

Вначале стали появляться специализированные, разработанные прямо на объектах сетевые структуры. Затем компании-разработчики занялись продвижением своих систем на рынке, начали заключать договоры с городским правительством и в итоге охватили целые города. Следующим шагом стало создание телевизионных программ и даже целых каналов, предназначенных только для кабельного телевидения. Зачастую они представляли какую-то область интересов. Можно было подписаться на новостной канал, спортивный, посвященный кулинарии, саду-огороду и т. д. До конца 90-х годов эти системы были предназначены исключительно для телевизионного приема.

Когда Интернет стал привлекать к себе массовую аудиторию, операторы кабельного телевидения поняли, что, внося небольшие изменения в систему, можно сделать так, чтобы по тем же каналам в неиспользуемой части спектра передавались (причем в обе стороны) цифровые данные. С этого момента кабельное телевидение стало постепенно превращаться в муниципальную компьютерную сеть. В первом приближении систему MAN можно представить себе такой, как она изображена на рис. 1.6. На этом рисунке видно, что по одним и тем же линиям передается и телевизионный, и цифровой сигналы. Во **входном устройстве** они смешиваются и передаются абонентам. Мы еще вернемся к этому вопросу позднее.

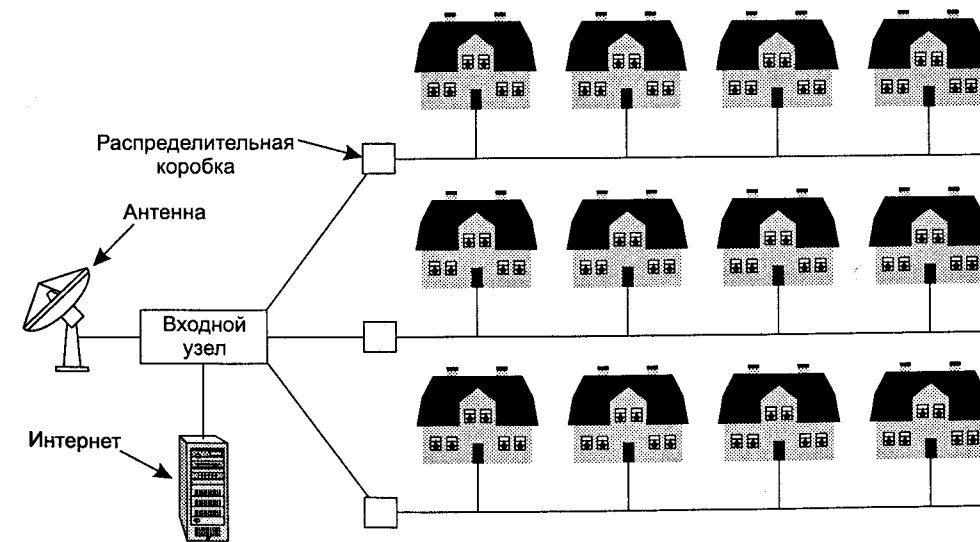


Рис. 1.6. Муниципальная сеть на базе кабельного ТВ

Впрочем, муниципальные сети — это не только кабельное телевидение. Недавние разработки, связанные с высокоскоростным беспроводным доступом в Интернет, привели к созданию других MAN, которые описаны в стандарте IEEE 802.16. Мы рассмотрим их более подробно в главе 2.

## Глобальные сети

**Глобальная сеть** (wide area network, WAN) охватывает значительную географическую область, часто целую страну или даже континент. Она объединяет машины, предназначенные для выполнения программ пользователя (то есть приложений). Мы будем следовать традиционной терминологии и называть эти машины хостами. Хосты соединяются коммуникационными подсетями, называемыми для краткости просто подсетями. Хосты обычно являются собственностью клиентов (то есть просто клиентскими компьютерами), в то время как коммуникационной подсетью чаще всего владеет и управляет телефонная компания или поставщик услуг Интернета. Задачей подсети является передача сообщений от хоста хосту, подобно тому как телефонная система переносит слова от говорящего слушающему. Таким образом, коммуникативный аспект сети (подсеть) отделен от прикладного аспекта (хостов), что значительно упрощает структуру сети.

В большинстве глобальных сетей подсеть состоит из двух отдельных компонентов: линий связи и переключающих элементов. Линии связи, также называемые **каналами** или **магистральями**, переносят данные от машины к машине. Переключающие элементы являются специализированными компьютерами, используемыми для соединения трех или более линий связи. Когда данные появляются на входной линии, переключающий элемент должен выбрать выходную линию — дальнейший маршрут этих данных. В прошлом для названия этих компьютеров не было стандартной терминологии. Сейчас их называют маршрутизаторами (router), однако читателю следует знать, что по поводу терминологии в данном случае единого мнения не существует. К сожалению, многие остряки-самоучки любят рифмовать «router» с «doubter», что в переводе означает «скептик», а некоторые вместо «router» пишут «rooter» («корчеватель»).

В модели, показанной на рис. 1.7, каждый хост соединен с локальной сетью, в которой присутствует маршрутизатор, хотя в некоторых случаях хост может быть связан с маршрутизатором напрямую. Набор линий связи и маршрутизаторов (но не хостов) образует подсеть.

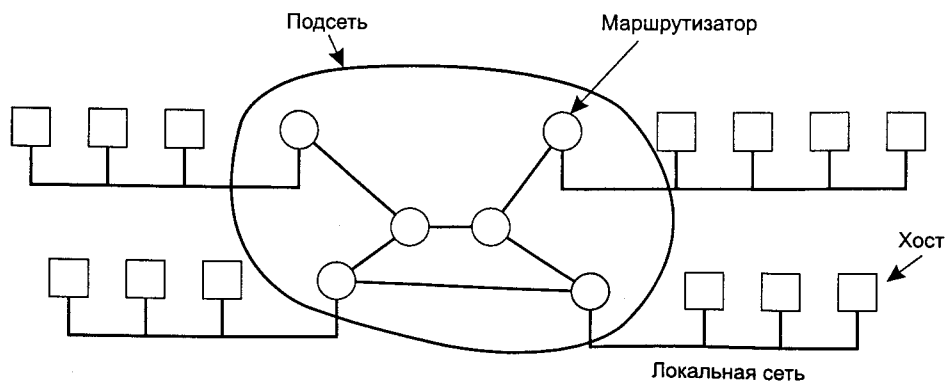


Рис. 1.7. Связь хостов и подсети в ЛВС

Следует также сделать замечание по поводу термина «подсеть» (subnet). Изначально его *единственным* значением являлся набор маршрутизаторов и линий связи, используемый для передачи пакета от одного хоста к другому. Однако спустя несколько лет этот термин приобрел второй смысл, связанный с адресацией в сети (что будет обсуждаться в главе 5). Таким образом, имеется некая двусмысленность, связанная с термином «подсеть». К сожалению, этому термину в его изначальном смысле нет никакой альтернативы, поэтому нам придется использовать его в обоих смыслах. По контексту всегда будет ясно, что имеется в виду.

Большинство глобальных сетей содержат большое количество кабелей или телефонных линий, соединяющих пару маршрутизаторов. Если какие-либо два маршрутизатора не связаны линией связи напрямую, то они должны общаться при помощи других маршрутизаторов. Когда пакет посылается от одного маршрутизатора другому через несколько промежуточных маршрутизаторов, он получается каждым промежуточным маршрутизатором целиком, хранится на нем, пока требуемая линия связи не освободится, а затем пересылается дальше. Подсеть, работающая по такому принципу, называется **подсетью с промежуточным хранением (store-and-forward)** или **подсетью с коммутацией пакетов (packet-switched)**. Почти у всех глобальных сетей (кроме использующих спутники связи) есть подсети с промежуточным хранением. Небольшие пакеты фиксированного размера часто называют **ячейками (cell)**.

О принципе организации сетей с коммутацией пакетов стоит сказать еще несколько слов, поскольку они используются очень широко. В общем случае, когда у процесса какого-нибудь хоста появляется сообщение, которое он собирается отправить процессу другого хоста, первым делом отправляющий хост разбивает последовательность на пакеты, каждый из которых имеет свой порядковый номер. Пакеты один за другим направляются в линию связи и по отдельности передаются по сети. Принимающий хост собирает пакеты в исходное сообщение и передает процессу. Продвижение потока пакетов наглядно показано на рис. 1.8.

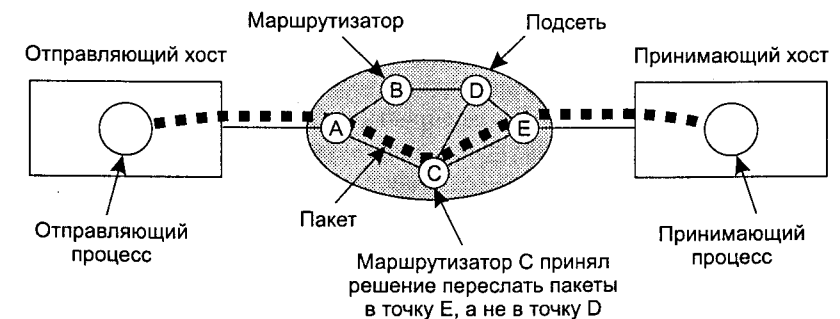


Рис. 1.8. Поток пакетов от отправляющего процесса к принимающему

На рисунке видно, что все пакеты следуют по пути ACE, а не ABDE или ACDE. В некоторых сетях путь всех пакетов данного сообщения вообще является строго определенным. В других сетях путь пакетов может прокладываться независимо.

Решения о выборе маршрута принимаются на локальном уровне. Когда пакет приходит на маршрутизатор А, именно последний решает, куда его перенаправить — на В или на С. Метод принятия решения называется **алгоритмом маршрутизации**. Их существует огромное множество, и некоторые из них мы изучим в главе 5.

Не все глобальные сети используют коммутацию пакетов. Второй возможностью соединить маршрутизаторы глобальной сети является радиосвязь с использованием спутников. Каждый маршрутизатор снабжается антенной, при помощи которой он может принимать и посылать сигнал. Все маршрутизаторы могут принимать сигналы со спутника, а в некоторых случаях они могут также слышать передачи соседних маршрутизаторов, передающих данные на спутник. Иногда все маршрутизаторы соединяются обычной двухточечной подсетью, и только некоторые из них снабжаются спутниковой антенной. Спутниковые сети являются ширококонтинентальными и наиболее полезны там, где требуется ширококонтинентальное вещание.

## Беспроводные сети

Идея цифровой беспроводной связи не нова. Уже в 1901 году итальянский физик Гульельмо Маркони (Guglielmo Marconi) продемонстрировал телеграфную связь между кораблем и берегом при помощи азбуки Морзе, состоящей из точек и тире, что весьма похоже на двоичный код. Сегодняшние цифровые радиосистемы обладают более высокой производительностью, однако в их основе лежит та же идея.

В первом приближении беспроводные сети можно разбить на следующие три категории:

- ◆ взаимодействующие системы;
- ◆ беспроводные ЛВС (LAN);
- ◆ беспроводные глобальные сети (WAN).

Под взаимодействующими системами понимается прежде всего связывание между собой компонентов компьютера с использованием радиоволн малого радиуса действия. Почти любой компьютер состоит из нескольких частей: монитора, клавиатуры, мыши, принтера... Каждое из этих внешних устройств, как известно, подсоединяется к системному блоку с помощью кабелей. А знаете, сколько проблем с подключением этой техники возникает у новичков, несмотря на маркировку разъемов и подробные руководства по эксплуатации? Недаром же большинство фирм, торгующих компьютерами, предлагают услуги технической службы, заключающиеся только лишь в соединении компонентов системы. Несколько компаний одна за другой пришли к идее создания беспроводной системы **Bluetooth**, предназначенной для того, чтобы избавить компоненты компьютера от кабелей и разъемов. Кроме стандартных устройств, с помощью Bluetooth можно подключать к компьютеру цифровые камеры, гарнитуры, сканеры и др. То есть теперь практически любые цифровые устройства, располагающиеся недалеко от системного блока, можно соединить с ним беспроводной сетью. Никаких проводов, никаких разъемов, никаких драйверов. Нужно просто принести устройство, вклю-

чить его, и оно будет работать. Для многих начинающих пользователей такая простота — большой плюс.

В простейшем случае взаимодействие внутри системы подчиняется принципу «главный — подчиненный». Системный блок чаще всего выступает в роли главного устройства, а все прочие — в роли подчиненных. В чем заключается это главенство? Именно системный блок назначает адреса устройств, определяет моменты, в которые они могут «вещать», ограничивает время передачи, задает диапазоны рабочих частот и т. д. Мы обсудим технологию Bluetooth более подробно в главе 4.

Следующим шагом в развитии этого направления стали беспроводные ЛВС (локальные вычислительные сети). В них каждый компьютер оборудован радиомодемом и антенной, с их помощью он может обмениваться данными с другими компьютерами. Иногда есть общая антенна, расположенная на потолке, и передача данных происходит через нее, но если рабочие станции сети расположены достаточно близко, то обычно используют одноранговую конфигурацию. Беспроводные сети все шире используются в бизнесе и для домашних целей, где прокладывать Ethernet нет никакого смысла, а также в старых зданиях, арендуемых под офисы, в кафетериях, в офисных центрах, конференц-залах и других местах. Стандарт беспроводных сетей имеет маркировку **IEEE 802.11**, и именно он чаще всего реализуется и становится все более популярным. Его мы тоже обсудим в главе 4.

Третий тип беспроводных сетей используется в глобальных сетях. Примером может служить система сотовой связи, являющаяся на самом деле низкопроизводительной цифровой беспроводной сетью. Выделяют уже целых три поколения сотовой связи. Первые сотовые сети были аналоговыми и предназначались только для передачи речи. Второе поколение было уже цифровым, но ничего, кроме речи, передавать по-прежнему было нельзя. Наконец, нынешнее, третье поколение — цифровое, причем появилась возможность передачи как голоса, так и других данных. В некотором смысле, сотовые сети — это те же беспроводные ЛВС, разница лишь в зоне охвата и более низкой скорости передачи. Если обычные беспроводные сети могут работать со скоростью до 50 Мбит/с на расстоянии десятков метров, то сотовые системы передают данные на скорости 1 Мбит/с, но расстояние от базовой станции до компьютера или телефона исчисляется километрами, а не метрами. В главе 2 мы будем подробно обсуждать эти сети.

Сейчас развиваются не только низко-, но и высокопроизводительные глобальные беспроводные сети. Изначальная установка такова: необходимо организовать доступ в Интернет с нормальной скоростью, чтобы при этом не был задействован телефон. Такую услугу иногда называют локальной многоузловой системой распределения. Мы изучим ее несколько позже. Она уже даже имеет свой стандарт, IEEE 802.16, речь о котором пойдет в главе 4.

Почти все беспроводные сети в каком-то месте имеют шлюз, обеспечивающий связь с обычными компьютерными сетями, иначе просто невозможно было бы организовать, допустим, доступ в Интернет. Такие комбинации могут использоваться в самых разных видах и ситуациях. Скажем, на рис. 1.9, а изобра-

жен самолет, в котором несколько человек используют модемы и телефоны, установленные на спинках сидений, для связи с офисом. Каждый звонок производится независимо. Однако значительно эффективнее использовать летающую локальную сеть (рис. 1.9, б). В этом случае каждое кресло оборудуется розеткой Ethernet, к которой пассажир может подключить свой компьютер. Радиосвязь осуществляется единым маршрутизатором самолета, который связывается с одним из маршрутизаторов, находящихся на земле. Последние сменяют друг друга по мере перемещения самолета. Конфигурация представляет собой обычную локальную сеть, с той разницей, что связь с внешним миром осуществляется не по кабелю, а по радио.

Многие верят в то, что именно за беспроводными технологиями будущее сетевых технологий (см., например, Vi и др., 2001; Leeper, 2001; Varshey и Vetter, 2000), однако есть по крайней мере один человек, который с этим не согласен. Так, например, изобретатель Ethernet Боб Меткалф (Bob Metcalfe) писал в 1995 году: «Переносные беспроводные компьютеры подобны переносным душевым кабинкам без труб. Они будут весьма популярны на транспортных средствах, стройплощадках и рок-концертах. Но я советую вам протянуть кабель к своему дому и оставаться там». История, возможно, сохранит эту запись в том же разделе, что и высказывание главы IBM Т. Дж. Уотсона (T. J. Watson), который в 1945 году объяснял, почему его фирма не стремится заниматься компьютерами: «По крайней мере, до 2000 года миру хватит для удовлетворения его потребностей четырех-пяти компьютеров».

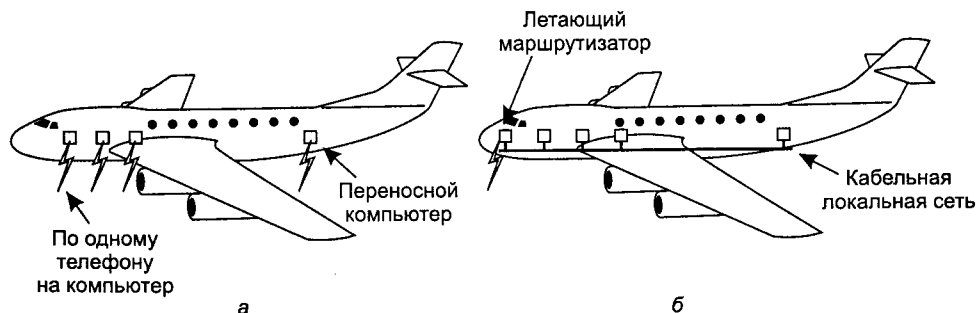


Рис. 1.9. Индивидуальные переносные компьютеры (а); летающая ЛВС (б)

## Домашние сети

Домашние сети постепенно входят в нашу жизнь. В будущем, скорее всего, для этого окажутся приспособлены практически все жилища и почти все бытовые приборы, не говоря уже о компьютерах, смогут обмениваться данными между собой и будут доступны через Интернет. Это будет очередная концепция, которая, как сейчас кажется, никому не нужна (как, например, удаленное управление телевизором или мобильным телефоном), но когда она станет реальностью, все начнут недоумевать, как же они до сих пор жили без этого.

В сеть можно объединить больше устройств, чем кажется на первый взгляд. Вот самые очевидные из них:

- ◆ компьютеры (настольные ПК, ноутбуки, PDA, периферийные устройства совместного доступа);
- ◆ приборы для развлечений (телевизоры, DVD, VCR, различные видеокамеры, аудиосистемы, MP3-проигрыватели);
- ◆ телекоммуникации (телефоны, мобильные телефоны, системы двухсторонней связи, факсы);
- ◆ бытовые приборы (микроволновые печи, холодильники, часы, отопительные системы, кондиционеры, системы освещения);
- ◆ измерительные приборы (счетчики, системы пожарной сигнализации, термомостаты, камеры).

Домашние сети уже реально существуют, правда, широкое распространение пока что получают только более или менее традиционные решения. Во многих домах установлены устройства для подключения компьютеров к общей линии высокоскоростного доступа в Интернет. Развлекательные устройства пока еще в сети не объединяют, но чем больше цифровых аудио- и видеозаписей можно будет найти в Интернете, тем больше будет потребность в таких сетях. К тому же человек устроен так, что ему нужно делиться информацией, поэтому, например, снятую самостоятельно видеозапись в любом случае захочется отправить друзьям или родственникам, а значит, данные должны уметь ходить по Сети в обе стороны. Средства телекоммуникаций, в принципе, организованы в виде сетей и уже имеют связь с внешним миром, но не исключено, что скоро они станут полностью цифровыми и будут работать через Глобальную Сеть. В доме среднего обывателя сегодня насчитывается до дюжины часов разных калибров (в том числе встроенных в бытовые приборы). Два раза в год их приходится переставлять на час вперед или назад. Если бы все они были подключены к Интернету, то это могло бы происходить автоматически. Наконец, многим людям бывает необходимо наблюдать за своим домом и за тем, что в нем происходит. Несомненно, нашлись бы родители, готовые потратить некоторую сумму денег на то, чтобы установить систему, позволяющую во время ужина в ресторане наблюдать за своим спящим дома малышом с помощью PDA. Можно помечтать не только об отдельных сетях, созданных для конкретных применений, но и о единой интегрированной сети, и это, вероятно, лучшее, что можно придумать.

Домашние сети должны обладать некоторыми специфическими свойствами, присущими им одним. Во-первых, вся сеть и отдельные ее компоненты должны устанавливаться предельно просто. Автору в течение многих лет пришлось заниматься установкой различных устройств и программного обеспечения на разные компьютеры; результаты были всякие. После определенного количества телефонных звонков в службу поддержки удалось создать определенную классификацию ответов, получаемых на любые вопросы. Практически все ответы сводятся к следующему:

- ◆ прочитайте инструкцию;
- ◆ перезагрузите компьютер;

- ◆ отключите от компьютера все оборудование, кроме нашего, и попробуйте еще раз;
- ◆ скачайте с нашего веб-сайта свежие драйверы.
- ◆ если же все это не помогает, то отформатируйте жесткий диск и переустановите Windows с лицензионного компакт-диска.

Если продавцы холодильников начнут рассказывать своим клиентам по телефону про какие-то драйверы, боюсь, их могут неправильно понять. Это пользователи компьютеров привыкли, купив какую-нибудь железку, идти из компьютерного магазина с замиранием сердца, гадая, будет она работать или нет. Публика, покупающая только автомобили, телевизоры и холодильники, не столь толерантна. Она всегда рассчитывает только на стопроцентную вероятность того, что купленная вещь будет работать.

Во-вторых, сетевые устройства должны иметь достаточно мощную «защиту от дурака». Кондиционеры, имеющие всего один переключатель с четырьмя позициями (ВЫКЛЮЧЕН, СЛАБО, СРЕДНЕ и СИЛЬНО), снабжаются инструкцией на тридцати страницах. Если такое устройство будет сетевым, то только на раздел, касающийся техники безопасности, придется отвести тридцать страниц. Только в этом случае можно гарантировать, что большинство пользователей поймут, как безопасно пользоваться кондиционером.

В-третьих, для успеха важна низкая цена. По крайней мере, добавление сетевых возможностей не должно существенно влиять на конечную стоимость продукции. Никто не станет платить \$50 сверх обычной цены за интернет-термостат, потому что людям тяжело будет объяснить необходимость наблюдения за температурой в квартире с работы. Если же надбавка составит долларов пять, то такое устройство найдет своего покупателя.

В-четвертых, основное применение домашних сетей, скорее всего, будет связано с мультимедиа. Это означает, что скорость передачи должна быть достаточно высока. Интернет-телевизорам, которые смогут показывать кино с разрешением 320×240 при средней скорости 10 кадров в секунду, путь на рынок закрыт. Быстрый Ethernet — рабочая лошадка офисных компьютерных сетей — не справится с потоковой передачей мультимедиа. Следовательно, технологии домашних сетей должны развиваться в двух противоречивых направлениях: они должны быть одновременно быстрее и дешевле, чем офисные сети. Только тогда их можно представлять как массовую продукцию.

В-пятых, домашние сети должны обладать свойством наращиваемости, чтобы можно было начать с одного-двух устройств, а затем иметь возможность без проблем увеличивать их количество. Это означает, что не должно быть даже речи о «войнах форматов». В этом секторе рынка не пройдет такой номер, когда можно всем сказать, что самый главный стандарт — это IEEE 1394 (FireWire), а через пару лет вдруг заявить, что USB 2.0 — это самый популярный интерфейс месяца и все должны срочно переходить на устройства с его поддержкой. Нет. Здесь интерфейсы должны оставаться неизменными в течение многих лет, а кабели (если таковые будут) должны прокладываться с расчетом на работу десятилетиями.

В-шестых, очень важны защита информации и надежность подобных сетей. Одно дело, если несколько файлов исчезнут из-за вируса, присланного по e-mail, и совсем другое, если вору удастся с помощью своего PDA взломать защиту вашего жилища и разорить его.

Интересен вопрос о том, будут ли в домашних сетях применяться кабели или же сети будут беспроводными. В большинстве домов и так уже установлено шесть сетей: электрическая, телефонная, кабельного телевидения, газовая, водопроводная и канализационная. Добавить седьмую во время постройки здания труда не составит, однако переделывать уже существующие дома тяжело и дорого. С точки зрения экономии средств привлекательнее беспроводные сети, но с точки зрения защиты информации — кабельные. Еще одно неприятное обстоятельство, касающееся беспроводных систем, заключается в том, что радиоволны легко проходят сквозь преграды и могут создавать помехи. Не всем понравится слушать по радио, как пищит, устанавливая соединение, модем соседей. В главе 8 мы обсудим методы шифрования, обеспечивающие защиту информации, но в случае домашних сетей эта защита должна быть одновременно «защитой от дурака», которая сработает даже в том случае, если с техникой играет ребенок или неопытный пользователь. Об этом, конечно, легко рассуждать, но не так просто сделать, даже если рассчитывать на достаточно разумного пользователя.

В общем, у домашних сетей еще все впереди. Здесь много возможностей и сложностей, которые предстоит преодолеть. От большинства из домашних сетей требуются простота управления, надежность, защищенность, особенно в руках пользователей, далеких от техники. В то же время необходима высокая производительность при низкой цене.

## Объединения сетей

Существующие ныне сети часто используют различное оборудование и программное обеспечение. Люди, связанные с одной сетью, хотят общаться с людьми, подключенными к другой. Для выполнения этого желания необходимо объединить вместе различные и часто несовместимые сети. С этой целью иногда используются машины, называемые **шлюзами**, обеспечивающие соединение и необходимое преобразование в терминах как аппаратуры, так и программного обеспечения. Набор соединенных сетей называется **объединенной сетью** или просто **интерсетью**. Обратите внимание на то, что слово «интерсеть» (internet, написанный со строчной буквы) всегда будет использоваться в этой книге в его исконном смысле, в отличие от слова «Интернет» (с прописной буквы).

Обычной формой объединенных сетей является набор локальных сетей, объединенных при помощи глобальной сети. Действительно, если заменить надпись «подсеть» на рис. 1.7 «глобальной сетью», то в этом рисунке больше ничего не надо будет менять. Единственное техническое различие между подсетью и глобальной сетью заключается в наличии хостов. Если система внутри овала содержит только маршрутизаторы, то это подсеть. Если же она содержит как маршрутизаторы, так и хосты, то это глобальная сеть. Реальные различия заключаются в том, кто владеет сетью и пользуется ею.



Часто путают подсети, сети и интерсети. Термин «подсети» обычно употребляется в контексте глобальных сетей, где он означает набор маршрутизаторов и линий связи, принадлежащих одному сетевому оператору. Аналогично этому телефонная система состоит из телефонных станций, соединенных друг с другом высокоскоростными каналами, а с домами и офисами — низкоскоростными каналами. Эти каналы и оборудование принадлежат телефонным компаниям, являющимся аналогами подсетей. Сами телефонные аппараты (аналоги хостов) не являются частью подсетей. Вместе с хостами подсеть образует сеть. В случае локальной сети сеть состоит из кабеля и хостов. Подсетей там нет.

Интерсеть образуется путем объединения нескольких сетей. С нашей точки зрения, объединение локальной и глобальной сетей или объединение двух локальных сетей образует интерсеть, однако в индустрии нет единого мнения по поводу терминологии в данной области. Можно использовать следующее мнемоническое правило: если создание и поддержку сети оплачивают разные организации, то мы имеем дело с интерсетью, а не единой сетью. Также если работа основана на применении нескольких технологий (например, широкополосная в одной ее части и двухузловая — в другой), значит, и сетей несколько.

## Сетевое программное обеспечение

Когда собирались первые сети, то основное внимание уделялось аппаратуре, а вопросы программного обеспечения откладывались на будущее. Подобная стратегия больше не работает. Современное сетевое программное обеспечение в высокой степени структурировано. В следующих разделах мы узнаем, как осуществляется эта структуризация. Описанный метод является краеугольным камнем всей книги и будет часто встречаться и далее.

## Иерархия протоколов

Для упрощения структуры большинство сетей организуются в наборы **уровней** или **слоев**, каждый последующий из которых возводится над предыдущим. Количество уровней, их названия, содержание и назначение различаются от сети к сети. Однако во всех сетях целью каждого уровня является предоставление неких сервисов для вышестоящих уровней. При этом от них скрываются детали реализации предоставляемого сервиса.

Такая концепция не нова и используется в computer science уже давно. Ее вариации известны как сокрытие информации, абстрактные типы данных, свойство инкапсуляции и объектно-ориентированное программирование. Фундаментальной идеей является предоставление неким программным или аппаратным уровнем сервисов своим пользователям без раскрытия деталей своего внутреннего состояния и подробностей алгоритмов.

Уровень  $n$  одной машины поддерживает связь с уровнем  $n$  другой машины. Правила и соглашения, используемые в данном общении, называются **протоко-**

лом уровня  $n$ . По сути протокол является договоренностью общающихся сторон о том, как должно происходить общение. По аналогии, когда женщину представляют мужчине, она может протянуть ему свою руку. Он, в свою очередь, может принять решение либо пожать, либо поцеловать эту руку в зависимости от того, является ли эта женщина американским адвокатом на деловой встрече или же европейской принцессой на официальном балу. Нарушение протокола создаст затруднения в общении, а может, и вовсе сделает общение невозможным.

На рис. 1.10 показана пятиуровневая сеть. Объекты, включающие в себя соответствующие уровни на разных машинах, называются равноправными, или равноправными, узлами, или сущностями, сети. Именно они общаются при помощи протокола.

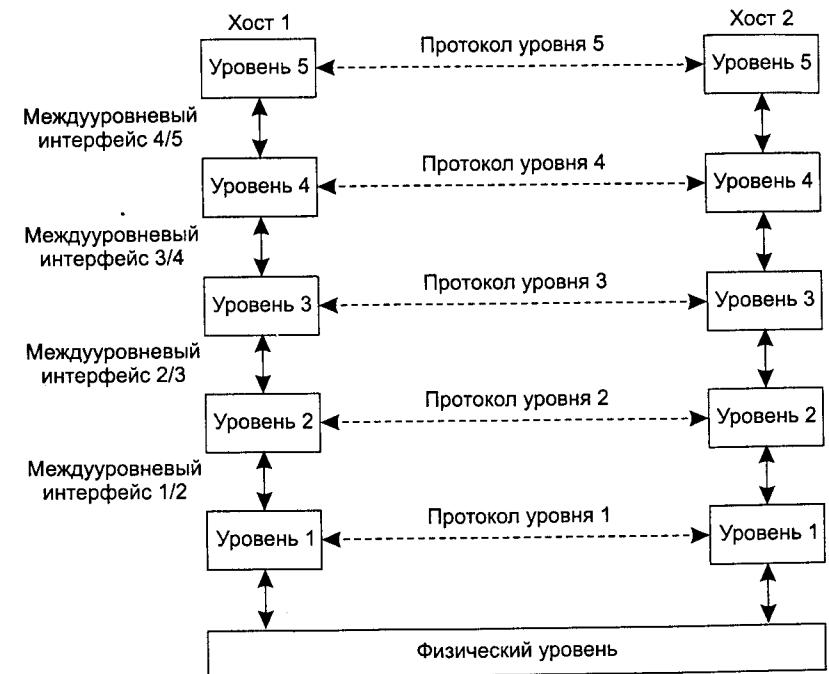


Рис. 1.10. Уровни, протоколы и интерфейсы

В действительности данные не пересылаются с уровня  $n$  одной машины на уровень  $n$  другой машины. Вместо этого каждый уровень передает данные и управление уровню, лежащему ниже, пока не достигается самый нижний уровень. Ниже первого уровня располагается **физическая среда**, по которой и производится обмен информацией. На рис. 1.10 виртуальное общение показано пунктиром, тогда как физическое — сплошными линиями.

Между каждой парой смежных уровней находится **интерфейс**, определяющий набор примитивных операций, предоставляемых нижним уровнем верхнему. Когда разработчики сетей решают, сколько уровней включить в сеть и что

на каждом уровне по мере продвижения сообщения. Заголовки нижних уровней более высоким уровням не передаются.

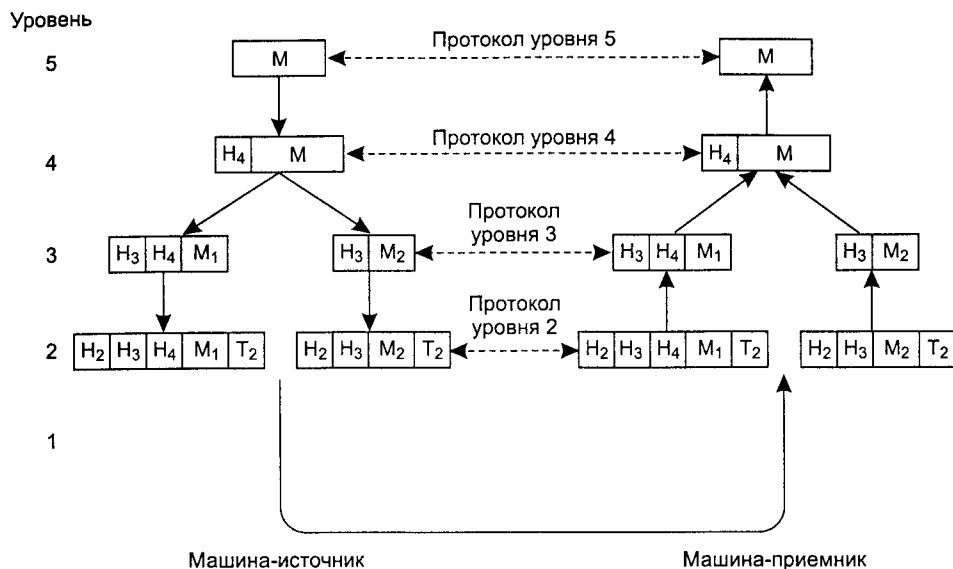


Рис. 1.12. Пример потока информации на уровне 5

Необходимо понять соотношение между виртуальным и реальным общением и разницу между протоколом и интерфейсом. Одноранговые процессы уровня 4, например, считают свое общение горизонтальным, использующим протокол 4-го уровня. У каждого из них имеется процедура с названием вроде *SendToOtherSide* (Отправить другой стороне) и *GetFromOtherSide* (Получить от другой стороны), даже если на самом деле эти процедуры общаются не друг с другом, а с нижними уровнями при помощи интерфейсов 3/4.

Абстракция одноранговых процессов является ключевой для проектирования сетей. С ее помощью невыполнимая задача разработки целой сети может быть разбита на несколько меньших по размеру и вполне разрешимых проблем разработки, а именно разработки индивидуальных уровней.

Хотя этот раздел называется «Сетевое программное обеспечение», следует отметить, что нижние уровни в иерархии протоколов часто реализуются аппаратно или программно-аппаратно. Тем не менее при этом используются сложные алгоритмы протоколов, хотя они и внедряются в аппаратуру частично или целиком.

## Разработка уровней

Некоторые из ключевых аспектов разработки, возникающие при создании компьютерных сетей, присутствуют на нескольких уровнях. Далее мы кратко опишем наиболее важные из них.

Каждый уровень нуждается в механизме идентификации отправителей и получателей. В сети обычно работает довольно много компьютеров, на них одновременно могут выполняться сразу несколько процессов, каждому из которых необходимо средство, позволяющее указать, с кем он хочет поговорить. Следовательно, нужна система **адресации**.

Также необходимо выработать правила для переноса данных. В некоторых системах данные могут перемещаться только в одном направлении, в других — в любом направлении. Протокол также должен определять количество логических каналов, относящихся к соединению, и их приоритеты. Многие сети обеспечивают минимум по два логических канала на соединение: один для обычных данных и еще один — для срочных.

Важным аспектом является контроль ошибок, поскольку физические каналы связи несовершенны. Известно множество кодов, опознающих и исправляющих ошибки, однако обе стороны соединения должны договориться между собой о том, какой именно код будет выбран. Кроме того, получатель должен иметь возможность сообщить отправителю, какие из сообщений были получены правильно, а какие — нет.

Не все каналы связи сохраняют последовательность посылаемых по ним сообщений. Чтобы исправить возможную потерю порядка сообщений, протокол должен явно снабжать получателя номерами пакетов, чтобы получаемые фрагменты сообщений могли быть собраны в правильном порядке. Очевидным решением проблемы является нумерация пакетов, однако остается открытым вопрос: что делать с пакетами, приходящими в неверном порядке?

Кроме того, на каждом уровне возникает вопрос: как организовать пересылку данных так, чтобы быстрая передающая сторона не завалила пакетами медленную принимающую сторону? Для разрешения данной проблемы существуют различные решения, которые будут обсуждаться далее. Некоторые из них предполагают прямые или косвенные ответы получателя посылающей стороне, информирующие ее о текущем состоянии получателя. Другим решением может быть ограничение скорости передачи до некоторого договорного уровня. В целом это называется **управлением потоком**.

Еще одна проблема, которую необходимо разрешать на различных уровнях, — это неспособность всех процессов принимать сколь угодно длинные сообщения. С этим может быть связан вопрос: что делать, если процесс настаивает на передаче данных столь малыми порциями, что передача становится неэффективной? Для решения подобной проблемы можно объединять посылаемые сообщения в один большой пакет и снова разбивать его после пересылки на отдельные сообщения.

Когда неудобно или неэффективно устанавливать отдельное соединение для каждой пары общающихся процессов, располагающийся ниже уровень может принять решение использовать одно и то же соединение для различных не связанных друг с другом разговоров. Пока это **уплотнение каналов**, или **мультиплексирование**, происходит прозрачно, оно может использоваться любым уровнем. Мультиплексирование, например, необходимо на физическом уровне, где вся связь должна осуществляться по ограниченному числу контуров.

Когда между отправителем и получателем существует несколько возможных путей следования сообщения, возникает задача выбора пути. Иногда она может быть разделена между несколькими уровнями. Например, при посылке сообщения из Лондона в Рим верхний уровень может выбрать путь через Францию или Германию, основывая свой выбор на знании законов, касающихся тайны переписки в данных странах, тогда как выбор нижнего уровня может основываться на текущей загруженности линий связи. Эта задача называется **маршрутизацией**.

## Службы на основе соединений и службы без установления соединений

Уровни могут предлагать вышестоящим уровням услуги двух типов: с наличием или отсутствием установления соединения. В этом разделе мы рассмотрим, что означает каждый из этих типов и в чем состоит разница между ними.

Типичным примером сервиса с установлением соединения является телефонная связь. Чтобы поговорить с кем-нибудь, необходимо поднять трубку, набрать номер, а после окончания разговора положить трубку. Нечто подобное происходит и в компьютерных сетях: при использовании сервиса с установлением соединения абонент сперва устанавливает соединение, а после окончания сеанса разрывает его. Это напоминает трубу: биты сообщения влетают в один ее конец, а вылетают с другого. В большинстве случаев не возникает путаницы с последовательностью передачи этих битов.

В некоторых случаях перед началом передачи отправляющая и получающая машины обмениваются приветствиями, отсылая друг другу приемлемые параметры соединения: максимальный размер сообщения, необходимое качество сервиса и др. В большинстве случаев одна из сторон посылает запрос, а другая его принимает, отвергает или же выставляет встречные условия.

Что касается сервисов без установления соединения, то типичный пример такой технологии — почтовые системы. Каждое письмо содержит полный адрес назначения и проходит по некоему маршруту, который совершенно не зависит от других писем. Обычно то письмо, которое отправлено раньше, в место назначения приходит раньше.

Каждая служба характеризуется **качеством обслуживания**. Некоторые службы являются надежными в том смысле, что они никогда не теряют данных. Обычно надежная служба реализуется при помощи подтверждений, посылаемых получателем в ответ на каждое принятое сообщение, так что отправитель знает, дошло очередное сообщение или нет. Процесс пересылки подтверждений требует некоторых накладных расходов и снижает пропускную способность канала. Впрочем, подобные затраты обычно не очень велики и окупаются, хотя иногда могут быть нежелательными.

Типичным примером необходимости надежной службы на основе соединений является пересылка файлов. Владелец файла хочет быть уверенным, что все биты файла прибыли без искажений и в том же порядке, в котором были отправле-

ны. Вряд ли кто-нибудь отдаст предпочтение службе, которая случайным образом искажает информацию, даже если передача происходит значительно быстрее.

Надежные службы на основе соединений бывают двух типов: последовательности сообщений и байтовые потоки. В первом варианте сохраняются границы между сообщениями. Когда посылаются два сообщения размером по 1 Кбайт, то они прибывают в виде двух сообщений размером по 1 Кбайт и никогда — как одно двухкилобайтное сообщение. При втором варианте связь представляет собой просто поток байтов, без разделения на отдельные сообщения. Когда 2048 байт прибывают к получателю, то нет никакой возможности определить, было это одно сообщение длиной 2 Кбайт, два сообщения длиной 1 Кбайт или же 2048 однобайтных сообщений. Если страницы книги посылаются по сети фотонаборной машине в виде отдельных сообщений, то, возможно, необходимо сохранить границы между сообщениями. С другой стороны, при регистрации с удаленного терминала в системе разделения времени вполне достаточно потока байтов с терминального компьютера.

Как уже упоминалось ранее, существуют системы, для которых задержки, связанные с пересылкой подтверждений, неприемлемы. В качестве примера такой системы можно назвать цифровую голосовую связь. В данном случае предпочтительнее допустить шумы на линии или искаженные слова, нежели большие паузы, вызванные отсылкой подтверждений и повторной передачей блоков данных. Аналогично, при проведении видеоконференции отдельные неправильные пиксели окажутся меньшей проблемой, нежели дергающиеся и останавливающиеся кадры.

Не все приложения требуют установки соединения. Например, при рассылке рекламы по электронной почте установка связи для пересылки каждого отдельного сообщения нежелательна. Также не требуется в этом случае и 100-процентная надежность, особенно, если это существенно увеличит стоимость. Все, что нужно, — это способ переслать сообщение с высокой вероятностью его получения, но без гарантии. ненадежная (то есть без подтверждений) служба без установления соединения часто называется **службой дейтаграмм**, или дейтаграммной службой — по аналогии с телеграфной службой, также не предоставляющей подтверждений отправителю.

В других ситуациях бывает желательно не устанавливать соединение для пересылки коротких сообщений, но надежность, тем не менее, существенна. Такая служба называется **службой дейтаграмм с подтверждениями**. Она подобна отправке заказного письма с подтверждением получения. Получив подтверждение, отправитель уверен, что письмо доставлено адресату, а не потеряно по дороге.

Кроме того, существует **служба запросов и ответов**, в которой отправитель посылает дейтаграммы, содержащие запросы, и получает ответы от получателя. Например, к данной категории можно отнести вопрос к библиотеке о том, где говорят по-уйгурски. Обычно модель запросов и ответов применяется для реализации общения в модели «клиент-сервер»: клиент посылает запрос, а сервер отвечает на него. Обсуждавшиеся ранее типы служб сведены в таблицу на рис. 1.13.

	Служба	Пример
Ориентированная на соединение	Надежный поток сообщений	Последовательность страниц
	Надежный поток байт	Удаленная регистрация
	Ненадежное соединение	Цифровая голосовая связь
Без установления соединения	Ненадежная дейтаграмма	Рассылка рекламы электронной почтой
	Дейтаграмма с подтверждениями	Заказные письма
	Запрос — ответ	Запрос к базе данных

Рис. 1.13. Шесть типов служб

Концепция использования ненадежной связи поначалу может показаться несколько странной. В самом деле, почему это может возникать такая ситуация, когда выгоднее предпочесть ненадежную связь надежной? Во-первых, надежное соединение (в том смысле, который был оговорен ранее, то есть с подтверждением) не всегда можно установить. Скажем, Ethernet не является «надежным» средством коммуникации. Пакеты при передаче могут искажаться, но решать эту проблему должны протоколы более высоких уровней. Во-вторых, задержки, связанные с отсылкой подтверждения, в некоторых случаях неприемлемы, особенно при передаче мультимедиа в реальном времени. Именно благодаря этим факторам продолжают сосуществовать надежные и ненадежные соединения.

## Примитивы служб

Служба (сервис) формально описывается набором **примитивов** или операций, доступных пользователю или другой сущности для получения сервиса. Эти примитивы заставляют службу выполнять некоторые действия или служат ответами на действия сущности того же уровня. Если набор протоколов входит в состав операционной системы (как часто и бывает), то примитивы являются системными вызовами. Они приводят к возникновению системных прерываний в привилегированном режиме, в результате чего управление машиной передается операционной системе, которая и отсылает нужные пакеты.

Набор доступных примитивов зависит от природы сервиса. Скажем, примитивы сервисов с установлением соединения и без него различаются. В табл. 1.3 приведен минимальный набор примитивов, обеспечивающий надежную передачу битового потока в среде типа «клиент-сервер».

Эти примитивы могут использоваться следующим образом. Вначале сервер исполняет LISTEN, показывая тем самым, что он готов устанавливать входящие соединения. Этот примитив обычно реализуется в виде блокирующего системного вызова. После его исполнения процесс сервера приостанавливается до тех пор, пока не будет установлено соединение.

**Таблица 1.3.** Пять сервисных примитивов, обеспечивающих простую передачу с установлением соединения

Примитив	Значение
LISTEN (ожидание)	Блок ожидает входящего соединения
CONNECT (соединение)	Установка соединения с ожидающей сущностью того же ранга
RECEIVE (прием)	Блок ожидает входящего сообщения
SEND (отправка)	Отправка сообщения ожидающей сущности того же ранга
DISCONNECT (разрыв)	Разрыв соединения

Затем процесс клиента выполняет примитив CONNECT, устанавливая соединение с сервером. В системном вызове должно быть указано, с кем именно необходимо установить связь. Для этого может вводиться специальный параметр, содержащий адрес сервера. Далее операционная система клиента посылает равно ранговой сущности пакет с запросом на соединение, как показано на рис. 1.14 стрелочкой с пометкой (1). Процесс клиента приостанавливается в ожидании ответа. Пакет, пришедший на сервер, обрабатывается его операционной системой. Если в пакете обнаруживается запрос на соединение, начинается поиск того клиента, который отправил этот запрос. При его обнаружении производятся два действия: клиент разблокируется и ему отсылается подтверждение (2). Реальное разблокирование происходит по прибытии подтверждения на клиентскую машину. Начиная с этого момента считается, что сервер и клиент установили соединение. Важно отметить здесь то, что подтверждение (2) генерируется самим кодом протокола и не является ответом на примитив пользователя, содержащий запрос. Может возникнуть ситуация, когда запрос на соединение есть, а клиента нет. В этом случае результат будет неопределенным. В некоторых системах пакет может быть отложен на короткое время, в течение которого ожидается LISTEN.

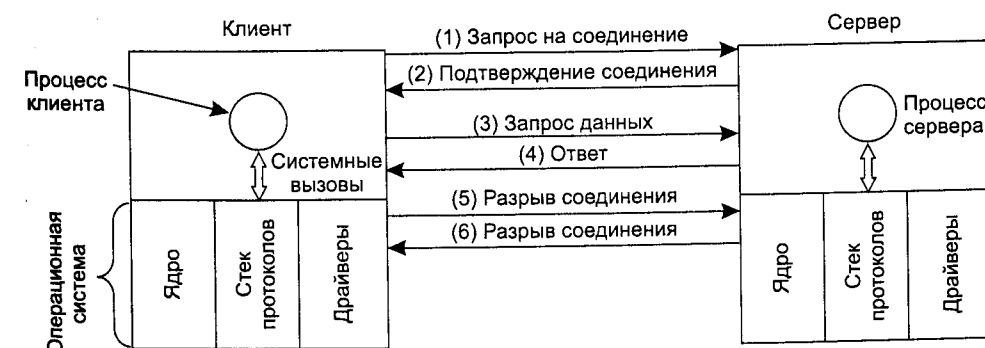


Рис. 1.14. Простейшее взаимодействие клиента и сервера при передаче пакетов по сети с установлением соединения

Самым очевидным жизненным примером такого взаимодействия может служить звонок покупателя (клиента) в сервисный центр компании. Менеджер сер-

висного центра должен находиться у телефона, чтобы иметь возможность ответить в том случае, если он зазвонит. Клиент совершает звонок. Когда менеджер поднимает трубку, считается, что соединение установлено.

Следующим шагом будет выполнение сервером примитива RECEIVE, подготавливающего систему к принятию первого запроса. В нормальной ситуации это происходит сразу же после прекращения ожидания (LISTEN), даже до того, как клиент получает подтверждение соединения. Системный вызов RECEIVE вновь блокирует сервер.

Клиент выполняет SEND, передает запрос (3) и сразу же выполняет RECEIVE, ожидая ответ.

Прием пакета с запросом разблокирует процесс сервера, благодаря чему он может обработать запрос. По окончании обработки выполняется примитив SEND, и ответ отсылается клиенту (4). Прием пакета разблокирует клиента, теперь наступает его очередь обрабатывать пакет. Если у клиента есть еще запросы к серверу, он может отослать их. В противном случае соединение разрывается с помощью DISCONNECT. Обычно первый примитив DISCONNECT отсылает пакет, уведомляющий сервер об окончании сеанса, и блокирует клиента (5). В ответ сервер генерирует свой примитив DISCONNECT, являющийся подтверждением для клиента и командой, разрывающей связь. Клиент, получив его, разблокируется, и соединение считается окончательно разорванным. Именно так в двух словах можно описать схему коммуникации с установлением соединения.

Конечно, жизнь не настолько проста. Описанный алгоритм работы весьма схематичен, а кое-что просто неправильно (например, CONNECT на самом деле выполняется до LISTEN). При этом пакеты, бывает, теряются, возникают и другие проблемы. Позднее мы рассмотрим все это гораздо более подробно, но на данный момент можно получить лишь общее представление о работе клиент-серверной системы с установлением соединения. Для этого полезно внимательно изучить рис. 1.14.

Увидев эти шесть пакетов, необходимых для работы протокола, можно удивиться, почему же не используется протокол без установления соединения? Ответ таков: в идеальном мире, где нужны всего два пакета — один для запроса и один для ответа, — это, возможно, имело бы смысл. Но стоит представить себе передачу большого сообщения (скажем, мегабайтного файла), причем в обе стороны, причем с ошибками при передаче, потерянными пакетами и т. д., как ситуация меняется. Если ответ сервера состоит из нескольких сотен пакетов, парочка из которых затерялась по пути, то как клиент узнает, что он получил сообщение не в полном объеме? Как он узнает о том, что последний принятый пакет является действительно последним? Допустим, клиент запросил второй файл. Как он отличит пакет 1 из второго файла от потерянного пакета 1 из первого файла, который вдруг нашелся? Короче говоря, в реальном мире простой протокол запросов-ответов без подтверждений часто не подходит. В главе 3 мы обсудим протоколы, позволяющие решать самые разные проблемы, возникающие при передаче данных. А сейчас поверьте на слово: наличие надежной связи с упорядоченным байтовым потоком между процессами — это удобно.

## Службы и протоколы

Службы и протоколы являются различными понятиями, хотя часто эти понятия смешиваются. Различие между ними, однако, столь важно, что мы хотели бы еще раз обратить на него ваше внимание. *Служба* (или *сервис*) — это набор примитивов (операций), которые более низкий уровень предоставляет более высокому. Служба определяет, какие именно операции уровень будет выполнять от лица своих пользователей, но никак не оговаривает, как должны реализовываться эти операции. Служба описывает интерфейс между двумя уровнями, в котором нижний уровень является поставщиком сервиса, а верхний — его потребителем.

Напротив, *протокол* — это набор правил, описывающих формат и назначение кадров, пакетов или сообщений, которыми обмениваются одноранговые сущности внутри уровня. Сущности используют протокол для реализации определенных их служб. Они могут менять протокол по желанию, при условии что при этом остаются неизменными службы, предоставляемые ими своим пользователям. Таким образом, служба и протокол оказываются практически независимыми.

Другими словами, службы — это нечто связанное с межуровневыми интерфейсами, тогда как протоколы связаны с пакетами, передающимися сущностями одного уровня, расположенными на разных машинах. Это показано на рис. 1.15. Важно не путать эти два понятия.

Стоит провести аналогию с языками программирования. Службу можно уподобить абстрактному типу данных или объекту в объектно-ориентированных языках программирования. Он определяет операции, которые могут выполняться с объектом, но не описывает, как реализованы эти операции. В этом случае протокол относится к *реализации* службы и, таким образом, невидим для пользователей службы.

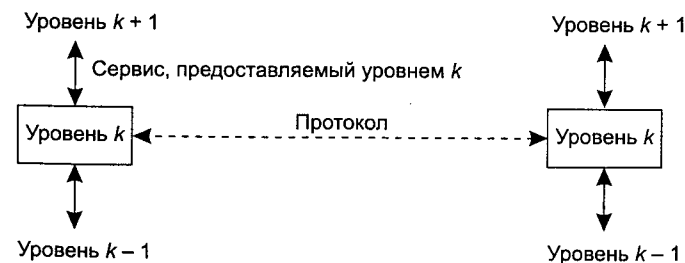


Рис. 1.15. Связь между службой и протоколом

Во многих старых системах служба не отделялась от протокола. В результате типичный уровень мог содержать примитив службы SEND PACKET, в котором пользователь должен был указать ссылку на полностью собранный пакет. Это означало, что любые изменения протокола тут же становились видимыми для пользователей. Большинство разработчиков сетей сегодня считают подобный подход серьезнейшей ошибкой.

## Эталонные модели

Обсудив многоуровневые сети в общих чертах, пора рассмотреть несколько примеров. В следующих двух разделах описываются два важных архитектурных типа — эталонные модели OSI и TCP/IP. Несмотря на то что *протоколы*, связанные с эталонной моделью OSI, используются сейчас очень редко, сама *модель* до сих пор весьма актуальна, а свойства ее уровней, которые будут обсуждаться в этом разделе, очень важны. В эталонной модели TCP/IP все наоборот — сама модель сейчас почти не используется, а ее протоколы являются едва ли не самыми распространенными. Исходя из этого, мы обсудим подробности, касающиеся обеих моделей. К тому же иногда приходится больше узнавать из поражений, чем из побед.

## Эталонная модель OSI

Эталонная модель OSI (за исключением физической среды) показана на рис. 1.16. Эта модель основана на разработке Международной организации по стандартизации (International Organization for Standardization, ISO) и является первым шагом к международной стандартизации протоколов, используемых на различных уровнях (Day и Zimmerman, 1983). Затем она была пересмотрена в 1995 году (Day, 1995). Называется эта структура эталонной моделью взаимодействия открытых систем ISO (**ISO OSI (Open System Interconnection) Reference Model**), поскольку она связывает открытые системы, то есть системы, открытые для связи с другими системами. Для краткости мы будем называть эту модель просто «модель OSI».

Модель OSI имеет семь уровней. Появление именно такой структуры было обусловлено следующими соображениями.

1. Уровень должен создаваться по мере необходимости отдельного уровня абстракции.
2. Каждый уровень должен выполнять строго определенную функцию.
3. Выбор функций для каждого уровня должен осуществляться с учетом создания стандартизированных международных протоколов.
4. Границы между уровнями должны выбираться так, чтобы поток данных между интерфейсами был минимальным.
5. Количество уровней должно быть достаточно большим, чтобы различные функции не объединялись в одном уровне без необходимости, но не слишком высоким, чтобы архитектура не становилась громоздкой.

Далее мы обсудим каждый уровень модели, начиная с самого нижнего. Обратите внимание: модель OSI не является сетевой архитектурой, поскольку она не описывает службы и протоколы, используемые на каждом уровне. Она просто определяет, что должен делать каждый уровень. Тем не менее ISO также разработала стандарты для каждого уровня, хотя эти стандарты не входят в саму эталонную модель. Каждый из них был опубликован как отдельный международный стандарт.

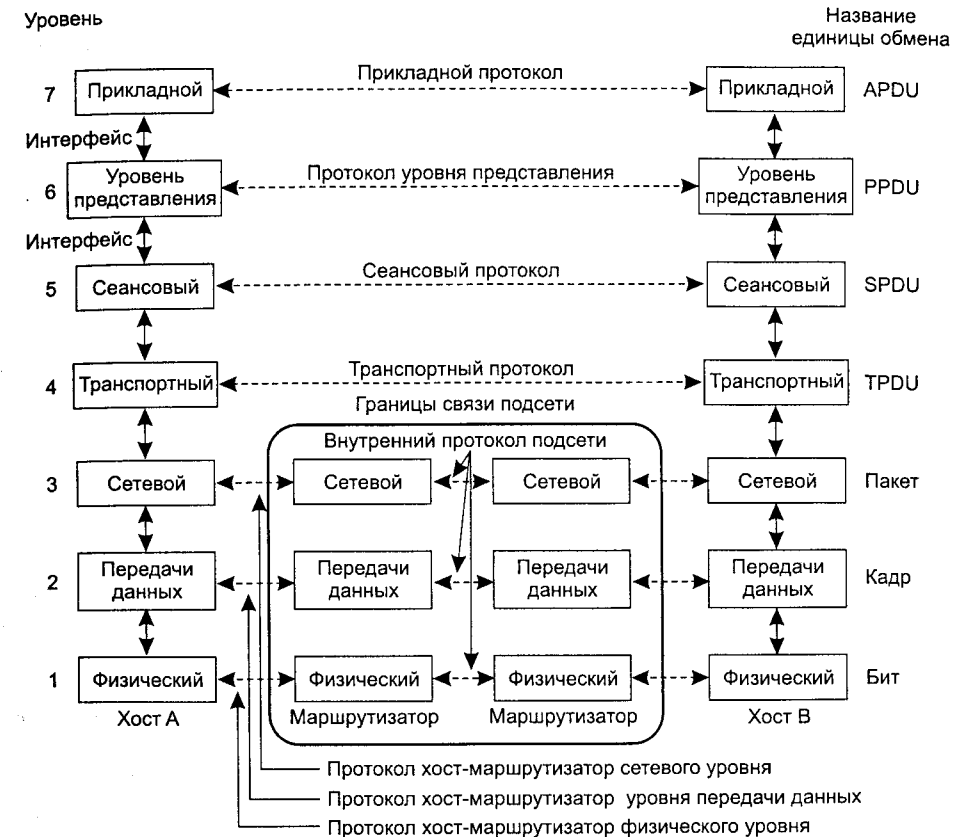


Рис. 1.16. Эталонная модель OSI

## Физический уровень

**Физический уровень** занимается реальной передачей необработанных битов по каналу связи. При разработке сети необходимо убедиться, что когда одна сторона передает единицу, то принимающая сторона получает также единицу, а не ноль. Принципиальными вопросами здесь являются следующие: какое напряжение должно использоваться для отображения единицы, а какое — для нуля; сколько микросекунд длится бит; может ли передача производиться одновременно в двух направлениях; как устанавливается начальная связь и как она прекращается, когда обе стороны закончили свои задачи; из какого количества проводов должен состоять кабель и какова функция каждого провода. Вопросы разработки в основном связаны с механическими, электрическими и процедурными интерфейсами, а также с физическим носителем, лежащим ниже физического уровня.

## Уровень передачи данных

Основная задача **уровня передачи данных** — быть способным передавать «сырые» данные физического уровня по надежной линии связи, свободной от необ-

наруженных ошибок с точки зрения вышестоящего сетевого уровня. Уровень выполняет эту задачу при помощи разбиения входных данных на **кадры**, обычный размер которых колеблется от нескольких сотен до нескольких тысяч байт. Кадры данных передаются последовательно с обработкой **кадров подтверждения**, отсылаемых обратно получателем.

Еще одна проблема, возникающая на уровне передачи данных (а также и на большей части более высоких уровней), — как не допустить ситуации, когда быстрый передатчик заваливает приемник данными. Должен быть предусмотрен некий механизм регуляции, который информировал бы передатчик о наличии свободного места в буфере приемника на текущий момент. Часто подобное управление объединяется с механизмом обработки ошибок.

В ширококонтрастных сетях существует еще одна проблема уровня передачи данных: как управлять доступом к совместно используемому каналу. Эта проблема разрешается введением специального дополнительного подуровня уровня передачи данных — подуровня доступа к носителю.

## Сетевой уровень

**Сетевой уровень** занимается управлением операциями подсети. Важнейшим моментом здесь является определение маршрутов пересылки пакетов от источника к пункту назначения. Маршруты могут быть жестко заданы в виде таблиц и редко меняться. Кроме того, они могут задаваться в начале каждого соединения, например терминальной сессии. Наконец, они могут быть в высокой степени динамическими, то есть вычисляемыми заново для каждого пакета с учетом текущей загруженности сети.

Если в подсети одновременно присутствует слишком большое количество пакетов, то они могут закрыть дорогу друг другу, образуя заторы в узких местах. Недопущение подобной закупорки также является задачей сетевого уровня. В более общем смысле сетевой уровень занимается предоставлением определенного уровня сервиса (это касается задержек, времени передачи, вопросов синхронизации).

При путешествии пакета из одной сети в другую также может возникнуть ряд проблем. Так, способ адресации, применяемый в одной сети, может отличаться от принятого в другой. Сеть может вообще отказаться принимать пакеты из-за того, что они слишком большого размера. Также могут различаться протоколы, и т. д. Именно сетевой уровень должен разрешать все эти проблемы, позволяя объединять разнородные сети.

В ширококонтрастных сетях проблема маршрутизации очень проста, поэтому в них сетевой уровень очень примитивный или вообще отсутствует.

## Транспортный уровень

Основная функция **транспортного уровня** — принять данные от сеансового уровня, разбить их при необходимости на небольшие части, передать их сетевому уровню и гарантировать, что эти части в правильном виде придут по назначению. Кроме того, все это должно быть сделано эффективно и таким образом, чтобы

изолировать более высокие уровни от каких-либо изменений в аппаратной технологии.

Транспортный уровень также определяет тип сервиса, предоставляемого сеансовому уровню и, в конечном счете, пользователям сети. Наиболее популярной разновидностью транспортного соединения является защищенный от ошибок канал между двумя узлами, поставляющий сообщения или байты в том порядке, в каком они были отправлены. Однако транспортный уровень может предоставлять и другие типы сервисов, например пересылку отдельных сообщений без гарантии соблюдения порядка их доставки или одновременную отправку сообщения различным адресатам по принципу широковещания. Тип сервиса определяется при установке соединения. (Строго говоря, полностью защищенный от ошибок канал создать невозможно. Говорят лишь о таком канале, уровень ошибок в котором достаточно мал, чтобы ими можно было пренебречь на практике.)

Транспортный уровень является настоящим сквозным уровнем, то есть доставляющим сообщения от источника адресату. Другими словами, программа на машине-источнике поддерживает связь с подобной программой на другой машине при помощи заголовков сообщений и управляющих сообщений. На более низких уровнях для поддержки этого соединения устанавливаются соединения между всеми соседними машинами, через которые проходит маршрут сообщений. Различие между уровнями с 1-го по 3-й, действующими по принципу звеньев цепи, и уровнями с 4-го по 7-й, являющимися сквозными, проиллюстрировано на рис. 1.16.

## Сеансовый уровень

Сеансовый уровень позволяет пользователям различных компьютеров устанавливать **сеансы связи** друг с другом. При этом предоставляются различные типы сервисов, среди которых **управление диалогом** (отслеживание очередности передачи данных), **управление маркерами** (предотвращение одновременного выполнения критичной операции несколькими системами) и **синхронизация** (установка служебных меток внутри длинных сообщений, позволяющих после устранения ошибки продолжить передачу с того места, на котором она оборвалась).

## Уровень представления

В отличие от более низких уровней, задача которых — достоверная передача битов и байтов, **уровень представления** занимается по большей части синтаксисом и семантикой передаваемой информации. Чтобы было возможно общение компьютеров с различными представлениями данных, необходимо преобразовывать форматы данных друг в друга, передавая их по сети в некоем стандартизированном виде. Уровень представления занимается этими преобразованиями, предоставляя возможность определения и изменения структур данных более высокого уровня (например, записей баз данных).

## Прикладной уровень

**Прикладной уровень** содержит набор популярных протоколов, необходимых пользователям. Одним из наиболее распространенных является протокол пере-

дачи гипертекста **HTTP** (HyperText Transfer Protocol), который составляет основу технологии Всемирной Паутины. Когда браузер запрашивает веб-страницу, он передает ее имя (адрес) и рассчитывает на то, что сервер будет использовать HTTP. Сервер в ответ отсылает страницу. Другие прикладные протоколы используются для передачи файлов, электронной почты, сетевых рассылок.

## Эталонная модель TCP/IP

Рассмотрим теперь эталонную модель, использовавшуюся в компьютерной сети ARPANET, которая является бабушкой нынешних сетей, а также в ее наследнице, всемирной сети Интернет. Хотя краткую историю сети ARPANET мы рассмотрим чуть позднее, некоторые ключевые моменты ее следует отметить прямо сейчас. ARPANET была исследовательской сетью, финансируемой Министерством обороны США. В конце концов она объединила сотни университетов и правительственных зданий при помощи выделенных телефонных линий. Когда впоследствии появились спутниковые сети и радиосети, возникли большие проблемы при объединении с ними других сетей с помощью имеющихся протоколов. Понадобилась новая эталонная архитектура. Таким образом, возможность объединять различные сети в единое целое являлась одной из главных целей с самого начала. Позднее эта архитектура получила название **эталонной модели TCP/IP** в соответствии со своими двумя основными протоколами. Первое ее описание встречается в книге Cerf и Kahn (1974). Из более поздних описаний можно выделить книгу, написанную Leiner и др. в 1985 году. Конструктивные особенности модели обсуждаются в издании Clark, 1988.

Поскольку Министерство обороны беспокоилось, что ценные хосты, маршрутизаторы и межсетевые шлюзы могут быть мгновенно уничтожены, другая важная задача состояла в том, чтобы добиться способности сети сохранять работоспособность при возможных потерях подсети оборудования, так, чтобы при этом связь не прерывалась. Другими словами, Министерство обороны требовало, чтобы соединение не прерывалось, пока функционируют приемная и передающая машины, даже если некоторые промежуточные машины или линии связи внезапно вышли из строя. Кроме того, от архитектуры нужна была определенная гибкость, поскольку предполагалось использовать приложения с различными требованиями, от переноса файлов до передачи речи в реальном времени.

### Интернет-уровень

Все эти требования обусловили выбор модели сети с коммутацией пакетов, в основе которой лежал не имеющий соединений межсетевой уровень. Этот уровень, называемый **интернет-уровнем** или **межсетевым уровнем**, является основой всей архитектуры. Его задача заключается в обеспечении возможности для каждого хоста посылать в любую сеть пакеты, которые будут независимо двигаться к пункту назначения (например, в другой сети). Они могут прибывать не в том порядке, в котором были отправлены. Если требуется соблюдение порядка отправления, эту задачу выполняют более верхние уровни. Обратите внимание, что сло-

во «интернет» здесь используется в своем первоначальном смысле несмотря на то, что этот уровень присутствует в сети Интернет.

Здесь можно увидеть аналогию с почтовой системой. Человек может бросить несколько международных писем в почтовый ящик в одной стране, и если повезет, большая часть из них будет доставлена по правильным адресам в других странах. Вероятно, письма по дороге пройдут через несколько международных почтовых шлюзов, однако это останется тайной для корреспондентов. В каждой стране (то есть в каждой сети) могут быть свои марки, свои предпочитаемые размеры конвертов и правила доставки, незаметные для пользователей почтовой службы.

Межсетевой уровень определяет официальный формат пакета и протокол, называемый **IP** (Internet Protocol). Задачей меж сетевого протокола является доставка IP-пакетов к пунктам назначения. Основными аспектами здесь являются выбор маршрута пакета и недопущение закупорки транспортных артерий. Поэтому можно утверждать, что межсетевой уровень модели TCP/IP функционально близок сетевому уровню модели OSI. Это соответствие показано на рис. 1.17.

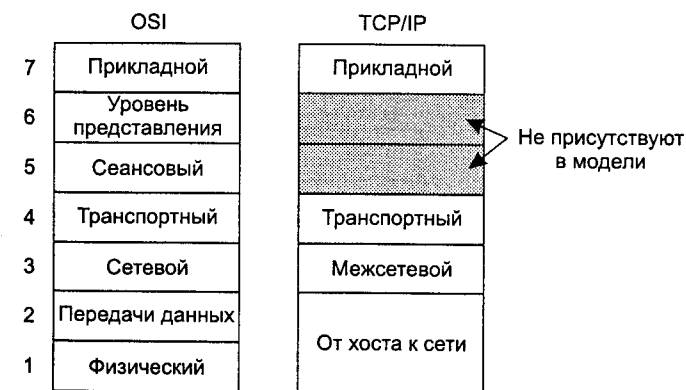


Рис. 1.17. Эталонная модель TCP/IP

### Транспортный уровень

Уровень, расположенный над межсетевым уровнем модели TCP/IP, как правило, называют **транспортным**. Он создан для того, чтобы одноранговые сущности на приемных и передающих хостах могли поддерживать связь, подобно транспортному уровню модели OSI. На этом уровне должны быть описаны два сквозных протокола. Первый, **TCP** (Transmission Control Protocol — протокол управления передачей), является надежным протоколом с установлением соединений, позволяющим без ошибок доставлять байтовый поток с одной машины на любую другую машину объединенной сети. Он разбивает входной поток байтов на отдельные сообщения и передает их межсетевому уровню. В пункте назначения получающий TCP-процесс собирает из полученных сообщений выходной поток. Кроме того, TCP осуществляет управление потоком, чтобы быстрый отправитель не завалил информацией медленного получателя.



Второй протокол этого уровня, **UDP** (User Data Protocol — пользовательский протокол данных), является ненадежным протоколом без установления соединения, не использующим последовательное управление потоком протокола TCP, а предоставляющим свое собственное. Он также широко используется в одноразовых клиент-серверных запросах и приложениях, в которых оперативность важнее аккуратности, например, при передаче речи и видео. Взаимоотношения протоколов IP, TCP и UDP показаны на рис. 1.18. Со времени создания протокола IP этот протокол был реализован во многих других сетях.

### Прикладной уровень

В модели TCP/IP нет сеансового уровня и уровня представления. В этих уровнях просто не было необходимости, поэтому они не были включены в модель. Опыт работы с моделью OSI доказал правоту этой точки зрения: большинство приложений в них мало нуждаются.

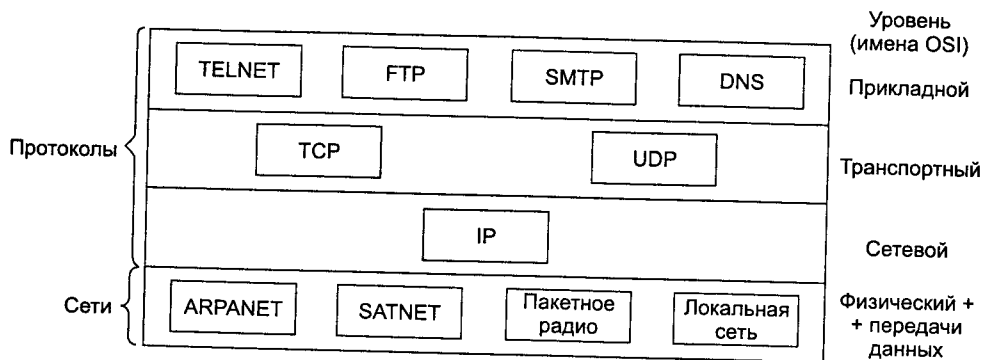


Рис. 1.18. Протоколы и сети в модели TCP/IP

Над транспортным уровнем располагается прикладной уровень. Он содержит все протоколы высокого уровня. К старым протоколам относятся протокол виртуального терминала (TELNET), протокол переноса файлов (FTP) и протокол электронной почты (SMTP), как показано на рис. 1.18. Протокол виртуального терминала позволяет пользователю регистрироваться на удаленном сервере и работать на нем. Протокол переноса файлов предоставляет эффективный способ перемещения информации с машины на машину. Электронная почта изначально представляла собой разновидность переноса файлов, однако позднее для нее был разработан специальный протокол. С годами было добавлено много других протоколов, таких как DNS (Domain Name Service — служба имен доменов), позволяющая преобразовывать имена хостов в сетевые адреса, NNTP (Network News Transfer Protocol — сетевой протокол передачи новостей), HTTP, протокол, используемый для создания страниц на World Wide Web, и многие другие.

### Хост-сетевой уровень

В эталонной модели TCP/IP не описывается подробно, что располагается ниже межсетевого уровня. Сообщается только, что хост соединяется с сетью при помощи

какого-нибудь протокола, позволяющего ему посылать по сети IP-пакеты. Этот протокол никак не определяется и может меняться от хоста к хосту и от сети к сети. В книгах и статьях, посвященных модели TCP/IP, этот вопрос обсуждается редко.

## Сравнение эталонных моделей OSI и TCP

У моделей OSI и TCP имеется много общих черт. Обе модели основаны на концепции стека независимых протоколов. Функциональность уровней также во многом схожа. Например, в обеих моделях уровни, начиная с транспортного и выше, предоставляют сквозную, не зависящую от сети транспортную службу для процессов, желающих обмениваться информацией. Эти уровни образуют поставщика транспорта. Также в каждой модели уровни выше транспортного являются прикладными потребителями транспортных сервисов.

Несмотря на это фундаментальное сходство, у этих моделей имеется и ряд отличий. В данном разделе мы обратим внимание на ключевые различия. Обратите внимание на то, что мы сравниваем именно *эталонные модели*, а не соответствующие им *стеки протоколов*. Сами протоколы будут обсуждаться несколько позднее. Существует книга (Piscitello и Chapin, 1993), которая целиком посвящена сравнению моделей TCP/IP и OSI.

Для модели OSI центральными являются три концепции:

1. Службы.
2. Интерфейсы.
3. Протоколы.

Вероятно, наибольшим вкладом модели OSI стало явное разделение этих трех концепций. Каждый уровень предоставляет некоторые сервисы для расположенного выше уровня. *Сервис* определяет, что именно делает уровень, но не то, как он это делает и каким образом сущности, расположенные выше, получают доступ к данному уровню.

*Интерфейс* уровня определяет способ доступа к уровню для расположенных выше процессов. Он описывает параметры и ожидаемый результат. Он также ничего не сообщает о внутреннем устройстве уровня.

Наконец, *равноранговые протоколы*, применяемые в уровне, являются внутренним делом самого уровня. Для выполнения поставленной ему задачи (то есть предоставления сервиса) он может использовать любые протоколы. Кроме того, *уровень* может менять протоколы, не затрагивая работу приложений более высоких уровней.

Эти идеи очень хорошо соответствуют современным идеям объектно-ориентированного программирования. Уровень может быть представлен в виде объекта, обладающего набором методов (операций), к которым может обращаться внешний процесс. Семантика этих методов определяет набор служб, предоставляемых объектом. Параметры и результаты методов образуют интерфейс объекта. Внутреннее устройство объекта можно сравнить с протоколом уровня. За пределами объекта оно никого не интересует и никому не видно.

Изначально в модели TCP/IP не было четкого разделения между службами, интерфейсом и протоколом, хотя и производились попытки изменить это, чтобы

сделать ее более похожей на модель OSI. Так, например, единственными настоящими сервисами, предоставляемыми межсетевым уровнем, являются SEND IP PACKET (послать IP-пакет) и RECEIVE IP PACKET (получить IP-пакет).

В результате в модели OSI протоколы скрыты лучше, чем в модели TCP/IP, и при изменении технологии они могут быть относительно легко заменены. Возможность проводить подобные изменения — одна из главных целей многоуровневых протоколов.

Эталонная модель OSI была разработана *прежде*, чем были изобретены протоколы для нее. Такая последовательность событий означает, что эта модель не была настроена на какой-то конкретный набор протоколов, что сделало ее универсальной. Обратной стороной такого порядка действий было то, что у разработчиков было мало опыта в данной области и не было четкого представления о том, какие функции должен выполнять каждый уровень.

Например, уровень передачи данных изначально работал только в сетях с передачей от узла к узлу. С появлением широковебчатых сетей в модель потребовалось ввести новый подуровень. Когда же на базе модели OSI начали строить реальные сети с использованием существующих протоколов, обнаружилось, что они не соответствуют требуемым спецификациям служб. Поэтому в модель пришлось добавить подуровни для устранения несоответствия. Наконец, изначально ожидалось, что в каждой стране будет одна сеть, управляемая правительством и использующая протоколы OSI, поэтому никто и не думал об объединении различных сетей. В действительности все оказалось не так.

С моделью TCP/IP было все наоборот: сначала появились протоколы, а уже затем была создана модель, описывающая существующие протоколы. Таким образом, не было проблемы с соответствием протоколов модели. Они ей соответствовали прекрасно. Единственной проблемой было то, что *модель* не соответствовала никаким другим стекам протоколов. В результате она не использовалась для описания каких-нибудь других сетей, отличных от TCP/IP.

Если взглянуть на эти две модели поближе, то прежде всего обратит на себя внимание различие в количестве уровней: в модели OSI семь уровней, в модели TCP/IP — четыре. В обеих моделях имеются межсетевой, транспортный и прикладной уровни, а остальные уровни различные.

Еще одно различие между моделями лежит в сфере возможности использования связи на основе соединений и связи без установления соединения. Модель OSI на сетевом уровне поддерживает оба типа связи, а на транспортном уровне — только связь на основе соединений (поскольку транспортные службы являются видимыми для пользователя). В модели TCP/IP на сетевом уровне есть только один режим связи (без установления соединения), но на транспортном уровне он поддерживает оба режима, предоставляя пользователям выбор. Этот выбор особенно важен для простых протоколов «запрос — ответ».

## Критика модели и протоколов OSI

Ни описанные ранее модели (OSI и TCP/IP), ни их протоколы не являются совершенными. Довольно много критики было высказано по поводу обеих моделей.

Некоторые критические замечания мы рассмотрим в данном и в следующем разделах. Сначала проанализируем модель OSI, а затем TCP/IP.

В то время, когда вышло второе (английское. — *Примеч. ред.*) издание этой книги (1989), многим экспертам в данной области казалось, что модель OSI и ее протоколы завоюют весь мир и вытеснят все остальное. Этого не случилось. Почему? Может быть, полезно оглянуться и учесть некоторые из уроков этой истории. Основных причин неудачи модели OSI было четыре:

- ◆ несвоевременность;
- ◆ неудачная технология;
- ◆ неудачная реализация;
- ◆ неудачная политика.

## Несвоевременность

Прежде всего рассмотрим причину номер один: несвоевременность. Для успеха стандарта чрезвычайно важно, в какое время он устанавливается. У Дэвида Кларка (David Clark) из M.I.T. есть теория стандартов, которую он называет *апокалипсисом двух слонов* (рис. 1.19).

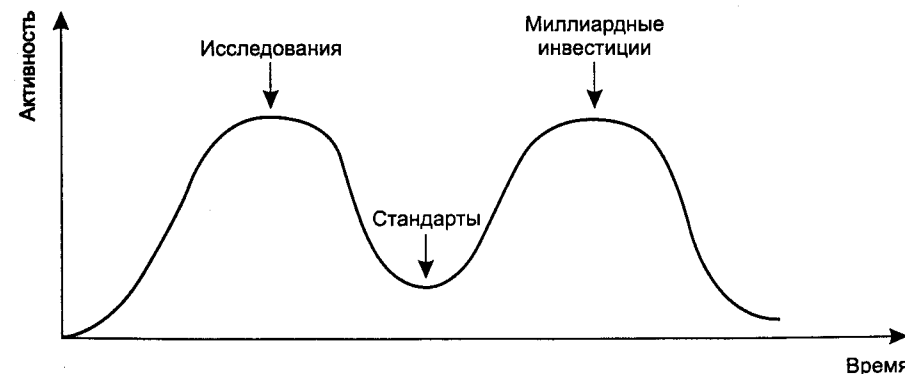


Рис. 1.19. Апокалипсис двух слонов

На этом рисунке изображена активность, сопровождающая любую новую разработку. Открытие новой темы вначале вызывает всплеск исследовательской активности в виде дискуссий, статей и собраний. Через некоторое время наступает спад активности, эту тему открывают для себя корпорации, и в результате в нее инвестируются миллиарды долларов.

Существенным является то, что стандарты пишутся именно в период между двумя «слонами». Если их создавать слишком рано, прежде чем закончатся исследования, предмет может оказаться еще слишком мало изучен и понят, что повлечет принятие плохих стандартов. Если создавать их слишком поздно, компании могут успеть вложить деньги в несколько отличных от стандартов технологий, так что принятые стандарты могут оказаться проигнорированными. Если интервал между двумя пиками активности будет слишком коротким (а все стре-

мятся делать деньги как можно быстрее), разработчики стандартов могут просто не успеть их выработать.

Теперь становится ясно, почему стандартные протоколы OSI потерпели неудачу. К моменту их появления среди исследовательских университетов уже получили широкое распространение конкурирующие с ними протоколы TCP/IP. И хотя волна инвестиций еще не обрушилась на данную область, рынок университетов был достаточно широк для того, чтобы многие разработчики стали осторожно предлагать продукты, поддерживающие протоколы TCP/IP. Когда же появился OSI, разработчики не захотели поддерживать второй стек протоколов; таким образом, начальных предложений не было. Каждая компания выжидала, пока первым начнет кто-нибудь другой, поэтому OSI так никто и не стал поддерживать.

### Плохая технология

Второй причиной, по которой модель OSI не была реализована, оказалось несовершенство как самой модели, так и ее протоколов. Выбор семиуровневой структуры стал больше политическим решением, чем техническим. В результате два уровня (сеансовый и уровень представления) почти пусты, тогда как два других (сетевой и передачи данных) перегружены.

Эталонная модель OSI вместе с соответствующими определениями служб и протоколами оказалась невероятно сложной. Если сложить в стопку распечатку официального описания стандартов, получится куча бумаги высотой в один метр. Модель тяжело реализуема и неэффективна в работе. В этом контексте вспоминается шутка Пола Мокапетриса (Paul Mockapetris), процитированная в издании Rose, 1993.

**Вопрос.** Что получится, если скрестить гангстера с международным стандартом?

**Ответ.** Человек, делающий вам предложения, которые вы не способны понять. Еще одна проблема, помимо невозможности понять стандарты OSI, заключалась в том, что некоторые функции, такие как адресация, управление потоком и обработка ошибок, повторялись снова и снова в каждом уровне. Так, например, в книге Saltzer и др. (1984) указывается, что для того, чтобы контроль за ошибками был эффективным, он должен осуществляться на самом верхнем уровне, поэтому повторение его снова и снова на каждом уровне часто оказывается излишним и неэффективным.

### Неудачная реализация

Учитывая огромную сложность модели и протоколов, громоздкость и медлительность первых реализаций не стали неожиданностью. Неудачу потерпели все, кто попытался реализовать эту модель. Поэтому вскоре понятие «OSI» стало ассоциироваться с плохим качеством. И хотя со временем продукты улучшились, ассоциации остались.

Первые реализации TCP/IP, основанные на Berkley UNIX, напротив, были достаточно хороши (не говоря уже о том, что они были открытыми). Они довольно быстро вошли в употребление, что привело к появлению большого сооб-

щества пользователей. Это вызвало исправления и улучшения реализации, в результате чего сообщество пользователей еще выросло. В данном случае обратная связь явно была положительной.

### Неудачная политика

Из-за особенностей первоначальной реализации многие, особенно в университетских кругах, считали TCP/IP частью системы UNIX. А к системе UNIX в университетских кругах в 80-е годы испытывали чувства, средние между родительскими (в те времена некорректно по отношению к правам мужского населения называемые материнскими) и чувствами к яблочному пирогу.

С другой стороны, OSI считался детищем европейских телекоммуникационных министерств, Европейского сообщества и (позднее) правительства США. Все это было лишь отчасти верным, однако сама мысль о группе правительственных чиновников, пытающихся протолкнуть неудачный в техническом отношении стандарт в глотки бедных исследователей и программистов, прокладывавших компьютерные сети в траншеях, не способствовала продвижению этой модели. Кое-кто рассматривал это развитие в том же свете, что и заявления корпорации IBM, сделанные в 1960 году, о том, что PL/I будет языком будущего, или Министерства обороны, поправившего позднее это утверждение своим заявлением, что в действительности таким языком будет Ada.

### Критика эталонной модели TCP/IP

У модели TCP/IP и ее протоколов также имеется ряд недостатков. Во-первых, в этой модели нет четкого разграничения концепций служб, интерфейса и протокола. При разработке программного обеспечения желательно провести четкое разделение между спецификацией и реализацией, что весьма тщательно делает OSI и чего не делает TCP/IP. В результате модель TCP/IP довольно бесполезна при разработке сетей, использующих новые технологии.

Во-вторых, модель TCP/IP отнюдь не является общей и довольно плохо описывает любой стек протоколов, кроме TCP/IP. Так, например, описать технологию Bluetooth с помощью модели TCP/IP совершенно невозможно.

В-третьих, хост-сетевой уровень в действительности не является уровнем в том смысле, который обычно используется в контексте уровней протоколов. Это скорее интерфейс между сетью и уровнями передачи данных. Различие между интерфейсом и уровнем является чрезвычайно важным, и здесь не следует быть небрежным.

В-четвертых, в модели TCP/IP не различаются физический уровень и уровень передачи данных. Об этом различии даже нет упоминания. Между тем они абсолютно разные. Физический уровень должен иметь дело с характеристиками передачи информации по медному кабелю, оптическому волокну и по радио, тогда как задачей уровня передачи данных является определение начала и конца кадров и передача их с одной стороны на другую с требуемой степенью надежности. Правильная модель должна содержать их как два различных уровня. В модели TCP/IP этого нет.

И наконец, хотя протоколы IP и TCP были тщательно продуманы и неплохо реализованы, многие другие протоколы были созданы несколькими студентами, работавшими над ними, пока это занятие им не наскучило. Реализации этих протоколов свободно распространялись, в результате чего они получили широкое признание, глубоко укоренились, и теперь их трудно заменить на что-либо другое. Некоторые из них в настоящее время оказались серьезным препятствием на пути прогресса. Например, протокол виртуального терминала TELNET, созданный еще для механического терминала типа Teletype, работавшего с огромной скоростью 10 символов в секунду. Ему ничего не известно о графических интерфейсах пользователя и о мышках. Тем не менее сейчас, 25 лет спустя, он все еще широко используется.

Подытожим сказанное. Несмотря на все недостатки, модель OSI (кроме сеансового уровня и уровня представления) показала себя исключительно полезной для теоретических дискуссий о компьютерных сетях. Протоколы OSI, напротив, не получили широкого распространения. Для TCP/IP верно обратное: модель практически не существует, тогда как протоколы чрезвычайно популярны. Поскольку ученые-компьютерщики любят получать свою часть пирога, в этой книге мы будем использовать модифицированную модель OSI, но рассматривать будем в основном протоколы TCP/IP и родственные им, а также новые протоколы вроде 802, SONET и Bluetooth. В результате в качестве точки отсчета для всей книги мы будем использовать гибридную модель, изображенную на рис. 1.20.

5	Прикладной уровень
4	Транспортный уровень
3	Сетевой уровень
2	Уровень передачи данных
1	Физический уровень

Рис. 1.20. Гибридная эталонная модель

## Примеры сетей

Компьютерные сети бывают очень разными: большими и маленькими, всемирно известными и почти никому не известными. Они преследуют в своей работе разные цели, имеют разные масштабы, используют разные технологии. В этом разделе мы рассмотрим несколько примеров, помогающих осознать, насколько многообразен мир сетей. Первым примером будет самая известная сеть сетей, Интернет. Вы узнаете, как она появилась, как эволюционировала и какие технологии при этом использовались. Затем мы обратимся к технологии ATM, которая часто служит ядром больших (телефонных) сетей. Технически ATM довольно сильно от-

личается от Интернета, их даже можно в некотором смысле противопоставить. Мы представим также основную технологию, используемую при создании локальных вычислительных сетей, — Ethernet. Наконец, последним примером в этом разделе будет стандарт беспроводных локальных сетей IEEE 802.11

## Интернет

Для начала следует еще раз напомнить о том, что Интернет вообще не является сетью, это собирательное название разных сетей, использующих определенные общие протоколы и предоставляющие определенные сервисы. Эта система необычна тем, что ее никто специально не планировал и не контролировал. Чтобы лучше понять, почему так получилось, мы начнем с самых истоков существования Интернета. В качестве прекрасного пособия по истории Интернета можно порекомендовать книгу, которую написал Джон Нотон (John Naughton) в 2000 году. Это редкое издание, потому что оно не только легко читается, но и содержит двадцатистраничный библиографический список параллельных мест и цитат, которые будут полезны людям, всерьез занимающимся историей. Часть материала, представленного далее, основывается именно на этой книге.

## ARPANET

История глобальных сетей началась в конце 50-х годов. В самый разгар холодной войны Министерство обороны США пожелало иметь сеть, которая могла бы пережить даже ядерную войну. В то время все военные телекоммуникации базировались на общественной телефонной сети, которая была сочтена слишком уязвимой. Графически эта уязвимость демонстрируется на рис. 1.21. Здесь черными точками обозначены коммутационные станции, с каждой из которых были связаны тысячи абонентов. Эти коммутаторы, в свою очередь, являлись абонентами для станций более высокого уровня — междугородных. Междугородные станции формировали национальные сети. При этом степень резервной избыточности была минимальной. Уязвимость заключалась в том, что потеря всего одного ключевого коммутатора или междугородной станции разделила бы сеть на изолированные участки.

Для решения этой проблемы Министерство обороны обратилось к корпорации RAND. Один из ее работников, Пол Бэрен (Paul Baran), разработал проект высоконадежной распределенной сети (рис. 1.21, б). Поскольку по линиям такой большой длины тяжело было бы передать аналоговый сигнал с допустимым уровнем искажений, Бэрен предложил передавать цифровые данные и использовать технологию коммутации пакетов. Им было написано несколько отчетов для Министерства обороны, в которых описывались подробности реализации его идей. Пентагону понравилась предложенная концепция, и компании AT&T (тогдашнему монополисту в США по части телефонных сетей) было поручено разработать прототип. AT&T сразу же отклонила идеи Бэрена. Конечно, богатейшая и крупнейшая компания не могла позволить какому-то мальчишке указывать ей, как следует строить телефонные сети. Было заявлено, что бэреновскую сеть построить невозможно, и на этом проект был закрыт.

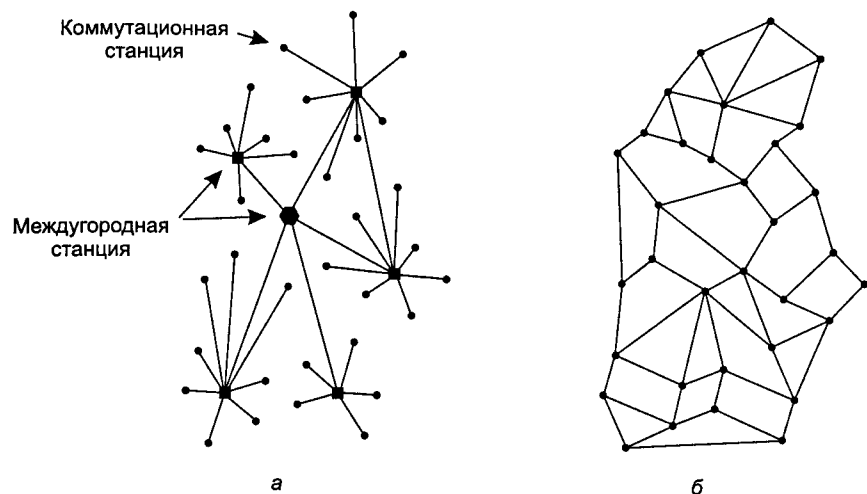


Рис. 1.21. Структура телефонной сети (а); предложенная Бареном архитектура распределенной сети (б)

Прошло еще несколько лет, но Министерству обороны так и не было предложено никакой замены существующей системе оперативного управления. Чтобы понять, как развивались события дальше, мы вспомним октябрь 1957 года, когда в СССР был запущен первый в мире искусственный спутник Земли и тем самым основной соперник США получил преимущество в космосе. Тогда президент Эйзенхауэр задумался о том, кто же допустил такой прокол. И выяснилось, что армия, флот и ВВС США только зря проедают деньги, отпущенные Пентагоном на научные исследования. Было немедленно решено создать единую научную организацию под покровительством Министерства обороны, **ARPA** (Advanced Research Projects Agency, Управление перспективного планирования научно-исследовательских работ). У ARPA не было ни ученых, ни лабораторий. У нее вообще практически ничего не было, за исключением небольшого офиса и скромного (по меркам Пентагона) бюджета. ARPA занималось тем, что выбирало из множества предлагаемых университетами и компаниями проектов наиболее перспективные и организовывало выделение грантов под эти проекты и заключение контрактов с этими организациями.

Все первые годы своего существования ARPA пыталось определиться с направлением своей деятельности, пока внимание ее директора Ларри Робертса (Larry Roberts) не привлекли компьютерные сети. Он наладил контакты с различными экспертами, пытаясь понять, какие разработки могут представлять наибольший интерес для Министерства обороны. Один из экспертов, Весли Кларк (Wesley Clark), предложил построить подсеть с коммутацией пакетов, где каждый хост имел бы собственный маршрутизатор, как показано на рис. 1.8.

После преодоления собственного скептицизма Робертс все же решился приобщить эту идею и представил некий смутный отчет, касающийся этого, на симпозиуме ACM SIGOPS, посвященном принципам работы операционных систем.

Симпозиум состоялся в Гетлингбурге, штат Теннесси, в конце 1967 года (Roberts, 1967). К большому удивлению Робертса, он услышал доклад, в котором описывалась очень похожая система, причем эта система была не только спроектирована, но и реализована под руководством Дональда Дэвиса (Donald Davis) в Национальной физической лаборатории (NPL) Англии. Разработанная NPL сеть, конечно, не охватывала всю страну — она вообще соединяла лишь несколько компьютеров на территории организации, но ее реализация доказала, что пакетная коммутация может с успехом применяться на практике. Более того, то, что услышал Робертс, практически цитировало отвергнутую когда-то разработку Бэрена! Директор ARPA уехал из Гетлингбурга с твердым намерением создать в Америке то, что позднее будет названо **ARPANET**.

Подсеть должна была состоять из специализированных мини-компьютеров, называемых **IMP** (Interface Message Processor), соединенных линиями связи, передающими информацию со скоростью 56 Кбит/с. Для повышения надежности каждый IMP должен был соединяться как минимум с двумя другими IMP. Подсеть должна была быть дейтаграммной, чтобы в случае если какие-либо линии и IMP разрушатся, сообщения могли бы автоматически выбрать альтернативный путь.

Каждый узел сети должен был состоять из IMP и хоста, находящихся в одной комнате и соединенных коротким проводом. Хост мог пересылать своему IMP сообщения длиной до 8063 бит, которые IMP разбивал на пакеты, как правило, по 1008 бит, и пересылал их далее, независимо друг от друга, к пункту назначения. Пакет пересылался дальше только после того, как он был получен целиком, — таким образом, это была первая электронная коммутирующая пакеты сеть с промежуточным хранением.

Затем агентство ARPA предложило тендер на строительство подсети. В тендере участвовали двенадцать компаний. Оценив предложения, агентство ARPA выбрало BBN, консалтинговую фирму в Кембридже, штат Массачусетс, и в декабре 1968 года подписало с ней контракт на постройку подсети и создание для нее программного обеспечения. BBN решило использовать специально модифицированные мини-компьютеры Honeywell DDP-316 с 12 Кбайт 16-разрядных слов оперативной памяти в качестве IMP. У IMP не было дисков, поскольку движущиеся детали были сочтены ненадежными. Их соединили линиями с пропускной способностью по 56 Кбит/с, арендованными у телефонных компаний. Хотя в наше время 56 Кбит/с — это выбор подростков, которые еще не могут позволить себе ADSL или прокладку качественного кабеля, в 1968 году ничего более высокоскоростного просто не существовало.

Программное обеспечение было разбито на две части: для подсети и хостов. Подсетевое программное обеспечение состояло из части соединения хост — IMP со стороны IMP, протокола IMP—IMP и протокола между IMP-источником и IMP-приемником, разработанного для улучшения надежности. Оригинальная структура сети ARPANET показана на рис. 1.22.

Вне подсети также требовалось программное обеспечение, а именно: соединение хост—IMP со стороны хоста, протокол хост—хост и прикладные программы. Как вскоре выяснилось, фирма BBN полагала, что ее задача ограничивается приемом сообщения на линии хост—IMP и передачей его на линии IMP—хост приемника.

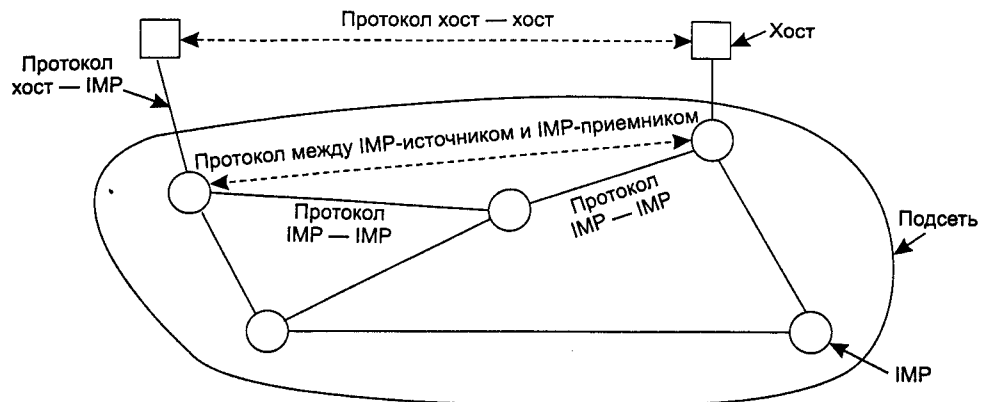


Рис. 1.22. Оригинальная структура сети ARPANET

Чтобы решить проблему программного обеспечения для хостов, Ларри Робертс летом 1969 года созвал совещание сетевых исследователей, большей частью аспирантов, в городе Сноуберд (Snowbird), штат Юта. Аспиранты ожидали, что какой-нибудь эксперт в области сетей объяснит им устройство сети и его программное обеспечение, после чего распределит между ними работу. С изумлением они обнаружили, что не было ни специалиста по сетям, ни плана. Они должны были сами решать, что нужно сделать.

Тем не менее в декабре 1969 года удалось запустить экспериментальную сеть, состоящую из четырех узлов, расположенных в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе (UCLA), Калифорнийском университете в Санта-Барбаре (UCSB), Исследовательском институте Стэнфорда (SRI, Stanford Research Institute) и университете штата Юта. Были выбраны эти четыре университета, поскольку у них был большой опыт общения с агентством ARPA; кроме того, у всех имелись различные и совершенно несовместимые компьютеры-хосты (чтобы было веселее). Сеть быстро росла по мере создания и установки новых IMP. Вскоре она охватила все Соединенные Штаты. На рис. 1.23 показано, как быстро росла сеть ARPANET в первые три года.

Помимо помощи развивающейся сети ARPANET, агентство ARPA также финансировало исследовательские работы по спутниковым сетям и разработку мобильных пакетных радиосетей. На одной знаменитой демонстрации грузовик, который ездил по Калифорнии, посылал сообщения по пакетной радиосети в SRI, которые затем передавались по ARPANET на Атлантическое побережье США и по спутниковой сети транслировались в University College в Лондоне. Таким образом, исследователь в грузовике мог работать с компьютером, находящимся в Лондоне.

При этой демонстрации также выяснилось, что имеющиеся протоколы сети ARPANET непригодны для работы с объединенными сетями. В результате были произведены дополнительные исследования в области протоколов, завершившиеся изобретением модели и протоколов TCP/IP (Cerf и Kahn, 1974). TCP/IP

был специально разработан для управления обменом данными по интернетам, что становилось все более и более важным по мере подключения все новых сетей к ARPANET.

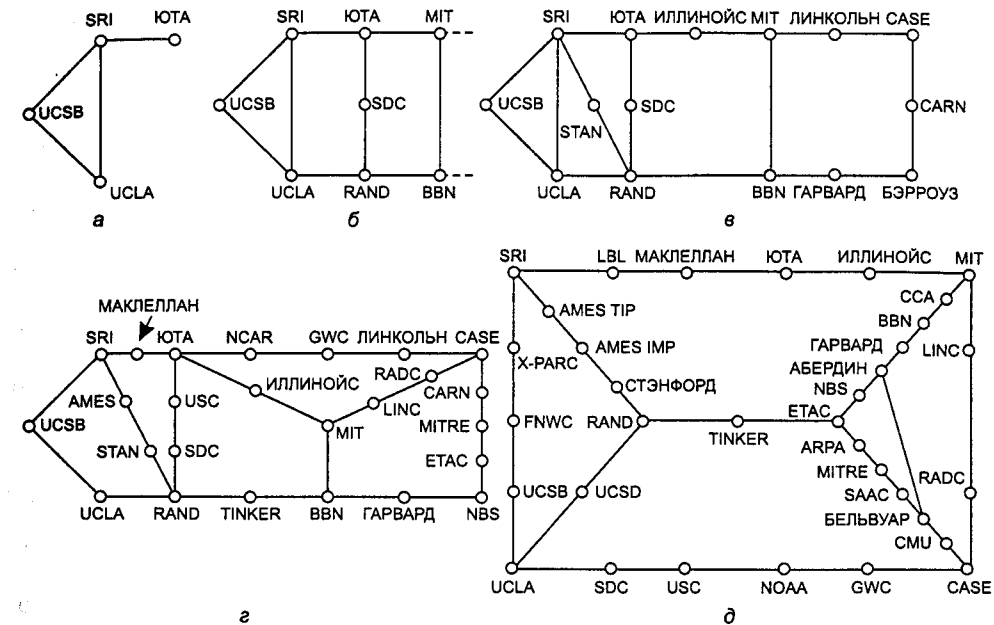


Рис. 1.23. Рост сети ARPANET: декабрь 1969 (а); июль 1970 (б); март 1971 (в); апрель 1972 (г); сентябрь 1972 (д)

Чтобы поощрить принятие новых протоколов, ARPA заключило несколько контрактов с BBN и Калифорнийским университетом в Беркли для интеграции этих протоколов в Berkeley UNIX. Исследователи в Беркли разработали удобный программный интерфейс для выхода в сеть (сокеты), а также написали множество приложений, утилит и управляющих программ, чтобы упростить работу с сетью.

Время было выбрано прекрасно. Многие университеты только что приобрели второй или третий компьютер VAX и ЛВС, чтобы их соединить, но у них не было сетевого программного обеспечения. С появлением системы UNIX 4.2 BSD, в которую вошли TCP/IP, сокеты и большое количество сетевых утилит, полный пакет был принят немедленно. Кроме того, TCP/IP позволял легко соединить локальную сеть с ARPANET, что многие и делали.

В течение 80-х годов к ARPANET были подсоединены еще ряд сетей, в основном ЛВС. По мере роста размеров глобальной сети задача поиска хостов становилась все сложнее. В результате была создана система DNS (Domain Name System — служба имен доменов), позволившая организовать компьютеры в домены и преобразовывать имена хостов в IP-адреса. С тех пор DNS стала обоб-

щенной распределенной системой баз данных, хранящей имена хостов и доменов. Мы рассмотрим ее более подробно в главе 7.

## NSFNET

В конце 70-х Национальный научный фонд США (NSF, National Science Foundation) пришел к выводу, что сеть ARPANET оказывает огромное влияние на исследовательские работы университетов, позволяя ученым всей страны обмениваться информацией и совместно работать над проектами. Однако для получения доступа к ARPANET университет должен был заключить контракт с Министерством обороны, которого у многих университетов не было. Ответом NSF стала идея создания сети-преемника ARPANET, которая была бы открыта для всех университетских исследовательских групп. Чтобы начать с чего-нибудь конкретного, Национальный научный фонд решил построить сетевую магистраль, соединив ею шесть суперкомпьютерных центров в Сан-Диего, Боулдере, Шампейне, Питтсбурге, Итаке и Принстоне. К каждому суперкомпьютеру был присоединен небольшой микрокомпьютер LSI-11, называемый **фаззбол** (fuzzball). Эти мини-компьютеры соединили выделенными линиями по 56 Кбит/с и сформировали подсеть по той же аппаратной технологии, которая использовалась в ARPANET. Однако программная технология была другой — мини-компьютеры с самого начала использовали протокол TCP/IP, составляя, таким образом, первую в мире глобальную сеть на основе протокола TCP/IP.

Национальный научный фонд также профинансировал создание нескольких (всего около 20) региональных локальных сетей, соединенных с магистралью, что позволило пользователям в тысячах университетов, исследовательских лабораторий, библиотек и музеев получить доступ к суперкомпьютерам. Вся сеть, состоящая из магистрали и региональных сетей, получила имя **NSFNET**. Она соединялась с ARPANET через линию между IMP и микрокомпьютером в компьютерном зале университета Карнеги — Меллона (Carnegie — Mellon University). Первоначальная магистраль сети NSFNET изображена на рис. 1.24.

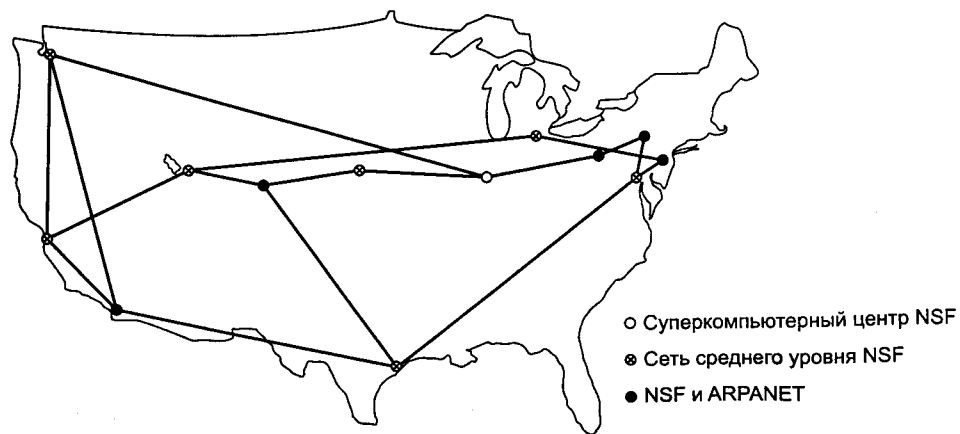


Рис. 1.24. Магистраль сети NSFNET в 1988 году

Сеть NSFNET имела мгновенный успех, ей предсказывали большое будущее. Национальный научный фонд сразу же после завершения работы над NSFNET начал планировать следующую сеть и с этой целью подписал контракт с базирующимся в штате Мичиган консорциумом MERIT. Для создания второй версии магистрали сети у оператора междугородной связи MCI (Microwave Communications, Inc. — компания, объединившаяся с тех пор с WorldCom) были арендованы волоконно-оптические каналы с пропускной способностью в 448 Кбит/с. В качестве маршрутизаторов использовались IBM PC-RT (RT-PC — RISC Technology Personal Computer — персональный компьютер на основе процессора с сокращенным набором команд). Вскоре и этого стало недостаточно, и вторая магистраль была ускорена до 1,5 Мбит/с.

Рост отрасли продолжался, но Национальный научный фонд понимал, что правительство не сможет финансировать развитие сетей постоянно. Кроме того, коммерческие организации выражали желание поучаствовать в общем деле, но уставом фонда им было запрещено использовать сети, за которые заплатил Национальный научный фонд. Впоследствии Национальный научный фонд поддержал создание компаниями MERIT, MCI и IBM некоммерческой корпорации ANS (Advanced Networks and Services, Inc.) в качестве первого шага на пути коммерциализации. В 1990 году ANS вступила во владение сетью NSFNET и усовершенствовала линии со 1,5 Мбит/с до 45 Мбит/с, сформировав **ANSNET**. Эта сеть проработала пять лет, после чего была продана компании America Online. Но к тому времени уже появилось множество коммерческих фирм, предлагающих свои услуги в области IP-коммуникаций. Стало понятно, что государству не удастся выдержать конкуренцию с ними и оно должно уйти из этого бизнеса.

В декабре 1991 года Конгресс США утвердил закон, разрешающий создание сети **NREN** (National Research and Education Network — государственная научно-исследовательская и образовательная сеть), являвшейся преемницей сети NSFNET, но работающей на гигабитных скоростях. Целью было создание государственной сети, работающей на скорости 3 Гбит/с, до конца тысячелетия. Эта сеть должна была служить прототипом для многократно обсуждавшейся информационной супермагистрали.

Для того чтобы облегчить переход с одних сетей на другие и гарантировать, что все региональные сети могут связаться друг с другом, Национальный научный фонд заключил контракт с четырьмя различными сетевыми операторами об организации пунктов доступа к сети (NAP, Network Access Point). Этими операторами были компании PacBell (Сан-Франциско), Ameritech (Чикаго), MFS (Вашингтон) и Sprint (Нью-Йорк, с которым для удобства NAP были объединены Пеннсаукен и Нью-Джерси). Каждый сетевой оператор, который хотел предоставлять услуги по соединению региональных сетей NSF, должен был подключиться ко всем пунктам NAP.

Таким образом, пакет, пересылаемый с одной сети в другую, мог выбирать, по какому каналу перемещаться от одного пункта NAP до другого. Из-за этого операторы были вынуждены соперничать друг с другом в области цен и предоставляемых услуг, как, собственно, и было задумано. Концепция единой магистрали была заменена коммерчески управляемой конкурентной инфраструктурой. Мно-

гие любят критиковать государственные структуры США за их консерватизм, а между тем не кто иные, как Министерство обороны и государственный Национальный научный фонд, создали все необходимые условия для развития Интернета, а затем передали свои закрытые разработки массовому пользователю.

В 90-х годах в других странах и регионах также были построены сети, сравнимые с NSFNET. Так, в Европе EuropaNET является IP-магистралью для исследовательских организаций, а EBONE представляет собой коммерчески ориентированную сеть. Обе сети соединяют большое число европейских городов. Скорость каналов изначально составляла 2 Мбит/с, но впоследствии была увеличена до 34 Мбит/с. В конечном счете сетевая инфраструктура в Европе, как и в США, превратилась в промышленную отрасль.

## Применение Интернета

После того как 1 января 1983 года TCP/IP стал единственным официальным протоколом, количество сетей, машин и пользователей, соединенных с ARPANET, быстро увеличивалось. Когда сети NSFNET и ARPANET объединились, рост стал экспоненциальным. Присоединились многочисленные региональные сети, была установлена связь с сетями в Канаде, Европе и сетями стран Тихоокеанского региона.

Примерно в середине 80-х это множество сетей стали называть интернетью (internet), а впоследствии Интернетом (Internet), хотя официального открытия с каким-нибудь политиком, разбивающим бутылку шампанского о маршрутизатор или хост, не было.

Силами, удерживающими части Интернета вместе, являются эталонная модель TCP/IP и стек протоколов TCP/IP. TCP/IP, благодаря которому стали возможными глобальные службы, можно уподобить единой телефонной системе или принятию в XIX веке единого стандарта ширины железнодорожных путей.

Какой смысл вкладывается в понятие подключения к Интернету? По нашему определению машина считается находящейся в Интернете, если на ней действует стек протоколов TCP/IP, у нее есть IP-адрес и возможность посылать IP-пакеты на все остальные машины в Интернете. При этом, скажем, одной возможности отправки и получения e-mail недостаточно, поскольку электронная почта при помощи шлюзов может выходить за рамки Интернета. Кроме того, вопрос осложняется тем фактом, что очень много персональных компьютеров имеют возможность позвонить интернет-провайдеру при помощи модема, получить временный IP-адрес и возможность посылать IP-пакеты другим хостам Интернета. Есть смысл считать такие машины находящимися в Интернете на тот период, пока они подключены к маршрутизатору поставщика услуг.

Традиционно (имеется в виду период примерно с 1970 по 1990 год) у Интернета было четыре основные сферы применения:

1. **Электронная почта.** Возможность создавать, посылать и получать электронную почту появилась с первых дней существования сети ARPANET и до сих пор чрезвычайно популярна. Многие люди получают десятки сообщений в день и рассматривают это как свой основной способ взаимодействия с внешним миром, а также уверены, что e-mail гораздо важнее телефона и обычной

почты. На сегодняшний день почтовые программы могут работать на компьютерах любых типов.

2. **Новости.** Конференции являются специализированными форумами, в которых пользователи могут обмениваться сообщениями по какой-нибудь определенной теме. Существуют тысячи телеконференций по техническим и нетехническим вопросам, включая компьютеры, науку, отдых и политику. В каждой конференции есть свои правила этикета, свой стиль и обычаи. Горе тому, кто их нарушит.
3. **Удаленный доступ.** При помощи таких программ, как Telnet, Rlogin, ssh и т. п., пользователи Интернета могут регистрироваться на любой машине, на которой у них имеется учетная запись.
4. **Перенос файлов.** С помощью программ FTP можно копировать файлы с одной машины, подключенной к Интернету, на другую. Подобным образом доступно огромное количество статей, баз данных и другой информации.

Вплоть до начала 90-х Интернет был весьма популярен среди академических, государственных и промышленных исследователей. Однако одно новое приложение, WWW (World Wide Web — Всемирная паутина), поставило все с ног на голову, приведя в сеть миллионы новых, далеких от академического мира пользователей. Это приложение, созданное физиком из Европейского совета по ядерным исследованиям (CERN, Conseil Européen pour la Recherche Nucleaire) Тимом Бернерс-Ли (Tim Berners-Lee), не изменило возможности Сети, но облегчило их использование. Вместе с программой Mosaic viewer, написанной в Национальном центре по применению суперкомпьютеров (NCSA, National Center for Supercomputing Applications), приложение WWW сделало возможным размещение на сайте нескольких страниц информации, содержащей текст, изображения, звук и даже видео, со встроенными ссылками на другие страницы. При щелчке на ссылке пользователь сразу перемещается на страницу, на которую указывает эта ссылка. Например, у многих компаний имеется домашняя страница, содержащая ссылки на другие страницы, на которых представлена информация о продуктах, ценах, торговле, технической поддержке, а также информация для общения с сотрудниками, для акционеров и многое другое.

За очень короткое время в Интернете появляются многочисленные страницы, содержащие карты, таблицы бирж, каталоги библиотек, записанных радиопрограмм и даже страницы со ссылками на полные тексты книг, чьи авторские права потеряли силу (Марк Твен, Чарльз Диккенс и т. д.). Все больше появляется личных (домашних) страниц.

Разумеется, столь бурный спрос не мог не вызвать соответствующее предложение, и вот в 90-е годы появляется огромное количество фирм — провайдеров услуг Интернета. Эти коммерческие компании обеспечивают доступ в Интернет компьютеров, принадлежащих как частным лицам, так и корпоративным клиентам. Наиболее распространен «наборный доступ» (dial-up), то есть доступ с помощью модема и обычных коммутируемых телефонных сетей. При этом клиенты могут пользоваться электронной почтой, WWW и любыми другими службами Сети. В конце последнего десятилетия XX века к Интернету подключались де-



сятки миллионов новых пользователей в год, что совершенно изменило характер сети. Интернет из закрытой сети для военных и ученых превратился в некую коммунальную услугу, подобную телефонной сети. Нынешнее число пользователей Сети подсчитать невозможно, но оно, несомненно, исчисляется сотнями миллионов и скоро перевалит за миллиард.

## Архитектура Интернета

В этом разделе мы попытаемся дать краткое описание сегодняшней структуры сети Интернет. Благодаря слиянию многих телефонных компаний с компаниями, предоставляющими доступ в Интернет, их сферы деятельности несколько смешались, и сейчас уже тяжело сказать, кто чем занимается. Поэтому приведенное описание оказывается, на самом деле, упрощенным по сравнению с реальной жизнью. В самом общем виде структура Интернета показана на рис. 1.25. Рассмотрим этот рисунок поподробнее.

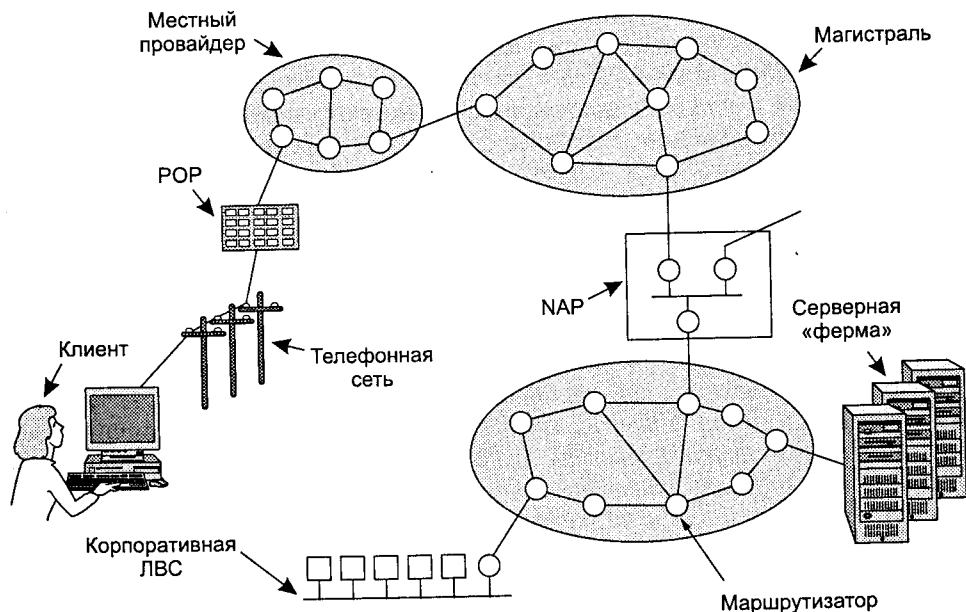


Рис. 1.25. Архитектура Интернета

Начнем с клиента, который сидит у себя дома. Предположим, он решил установить соединение с провайдером Интернета с помощью телефонной линии и модема. Модем — это специальное периферийное устройство ПК, которое преобразует цифровой сигнал компьютера в аналоговый сигнал, который можно передавать по телефонной сети. Итак, аналоговые сигналы приходят на **точку присутствия** (Point Of Presence, POP) провайдера, где они снимаются с телефонной линии и поступают в его региональную сеть. Начиная с этого момента, вся система работает только с цифровыми данными и использует коммутацию пакетов.

Если провайдером является местная телефонная компания, точка присутствия, скорее всего, будет расположена на телефонной станции — как раз там, где заканчивается линия, идущая напрямую от абонента. В ином случае точки входа могут располагаться на нескольких телефонных коммутационных станциях.

Региональная сеть провайдера Интернета состоит из взаимосвязанных маршрутизаторов в различных городах, которые он обслуживает. Если место назначения пакета — хост, обслуживаемый данным провайдером, то пакет просто доставляется туда. Если же это не так, то пакет передается оператору сетевой магистрали.

На самом верхнем уровне всей этой цепочки находится ряд магистральных операторов. В качестве таковых выступают компании типа AT&T, Sprint. В их ведении находятся крупные международные магистральные сети, образованные тысячами маршрутизаторов, соединенных волоконно-оптическими линиями с очень высокой пропускной способностью. Некоторые большие корпорации и хостинговые компании, имеющие собственные серверные системы («фермы»), обслуживающие тысячи запросов веб-страниц в секунду, соединяются с магистралями напрямую. Операторы магистральных сетей реализуют такую возможность путем сдачи в аренду помещений (так называемых **отелей для операторов связи**) для установки оборудования серверных «ферм». Обычно в этих же помещениях располагаются магистральные маршрутизаторы, что обеспечивает небольшую длину линии, а значит, высокую скорость обмена.

Если пакет предназначен для провайдера или другой компании, обслуживаемой магистральным оператором, он передается с магистрали на ближайший маршрутизатор, где происходит его отчуждение. Однако место назначения не обязательно будет относиться к данной магистрали — в мире их довольно много. Для того чтобы можно было перебросить пакет на другую магистраль, между ними существуют **точки входа в сеть** (Network Access Point, NAP). Они представляют собой специальные помещения, заполненные маршрутизаторами: каждую магистраль должен представлять по меньшей мере один маршрутизатор. Внутри этого помещения расположена также локальная сеть, объединяющая все находящееся в ней оборудование. Благодаря этому пакеты могут передаваться с маршрутизатора на маршрутизатор, то есть, фактически, с магистрали на магистраль. Кроме того, наиболее крупные магистрали связаны друг с другом не только через точки входа, но и напрямую. Это называется **частной равноранговой связью**. Один из парадоксов интернет-технологий заключается в том, что зачастую провайдеры, которые открыто конкурируют друг с другом в борьбе за клиентов, в то же самое время организуют частную равноранговую связь между собой (Metz, 2001).

На этом мы закончим наш краткий обзор архитектуры Интернета. Впереди еще много разделов, посвященных изучению отдельных компонентов этого вопроса: проектирования, алгоритмов, протоколов. Хочется напоследок отметить еще один нюанс: некоторые компании, объединяющие свои внутренние сети, часто используют те же технологии, которые используются в глобальной сети Интернет. Доступ к данным этих **интрасетей** обычно ограничивается пределами компании, но во всем остальном это тот же самый Интернет, только в миниатюре.

## Сети на основе соединений: X.25, ретрансляция кадров, АТМ

С самого появления компьютерных сетей шла война между теми, кто поддерживал идею дейтаграммных подсетей без установления соединения, и теми, кто высказывался за подсети на основе соединений. Сторонники последних — это зачастую выходцы из сообщества пользователей ARPANET/Internet. Не следует забывать о том, что изначальная идея Министерства обороны США состояла в создании такой сети, которая, даже будучи наполовину разрушенной в результате взрыва ядерной бомбы, могла бы функционировать бесперебойно. То есть основным параметром при создании таких сетей была устойчивость к повреждениям, а получением доходов от клиентов никто не был озабочен. Данный подход нашел свою реализацию в создании сетей без установления соединений, в которых маршрут каждого отдельно взятого пакета не зависит от остальных. Таким образом, выход из строя некоторого количества маршрутизаторов не мог привести к прекращению работы сети, поскольку при динамической перенастройке все равно находился какой-нибудь путь к месту назначения пакетов.

Самые ярые энтузиасты сетей на основе установления соединений — это люди, связанные с телефонными системами и компаниями. Как известно, абонент телефонной сети, прежде чем начать разговор, должен набрать номер и дождаться ответа. Примерно те же действия нужно совершить, чтобы соединиться с провайдером и передать или получить какие-нибудь данные. Соединение происходит при помощи телефонной сети. Оно является временным и поддерживается лишь до тех пор, пока абонент не повесил трубку или не отключился от провайдера. При этом все произносимые слова, как и передаваемые пакеты, следуют одним и тем же маршрутом. Если выходит из строя линия или коммутатор между начальным и конечным пунктом, то соединение разрывается. Именно это неприятное свойство не устраивало в свое время Министерство обороны.

Почему же тогда используются такие системы? Есть две причины этого:

- ◆ качество обслуживания;
- ◆ доход операторов таких сетей.

При предварительной установке соединения подсеть может зарезервировать для него некоторое количество ресурсов, например, буферное пространство или часть мощностей центрального процессора. Если другим абонентом производится попытка установить соединение, а ресурсы уже на исходе, то вызов отвергается и выдается сигнал, равнозначный сигналу «занято». Таким образом, если уж соединение установлено, значит, будет обеспечено надлежащее качество обслуживания. В сетях без установления соединения такого добиться сложно. Например, если на один и тот же маршрутизатор придет слишком большое количество пакетов, то он может «задохнуться» и потерять часть из них. Конечно, система организована так, что отправитель узнает о потерях и перешлет нужные пакеты, но общее качество обслуживания оставит тягостное впечатление. Такую сеть нельзя будет использовать для передачи аудио- и видеoinформации, если только она не будет практически свободна. Естественно, телефонные компании заботятся об

обеспечении нормальной передачи голоса, то есть аудиоинформации, отсюда их очевидные предпочтения одних технологий другим.

Вторая причина, по которой телефонные компании продолжают использовать сети, основанные на установлении соединения, — это возможность получать прибыль за выделяемое для работы пользователей время. Известно, что звонки на большие расстояния приходится оплачивать поминутно. Когда стали распространяться компьютерные сети, система поминутной оплаты вполне естественно переняла такую схему. Если вам приходится установить соединение, прежде чем начать передачу данных, то этот момент может стать началом отсчета времени работы в Сети. Если же такого момента соединения не существует, то ни о какой поминутной оплате не может быть и речи.

Между прочим, поддержка системы тарифных сборов обходится очень дорого. Если бы телефонные компании просто установили ежемесячную абонентскую плату за неограниченное время пребывания в Интернете, они сэкономили бы огромную сумму денег несмотря на то, что при этом возросла бы нагрузка на линии и оборудование. Однако некоторые политические и другие факторы не могут допустить введения такой системы оплаты. Между тем в других секторах услуг с населения взимается именно абонентская плата. Скажем, кабельное телевидение обязывает пользователей вносить ежемесячную фиксированную сумму, которая не зависит от того, сколько программ они посмотрели. А ведь здесь тоже можно было бы применить принцип оплаты просмотра каждой программы. Так сделано не было отчасти из-за дороговизны внедрения тарифной системы. Аналогично этому, многие парки развлечений продают только входные билеты, которые не ограничивают количество посещений разных аттракционов. А передвижные ярмарки с аттракционами, наоборот, берут деньги за каждую поездку на пластмассовой лошадке.

Таким образом, становится понятно, почему все сети, связанные с телефонной индустрией, никогда не откажутся от идеи подсетей с установлением соединений. Несколько удивляет, что и Интернет движется в том же направлении. Видимо, это объясняется попыткой повысить качество обслуживания, чтобы не возникало проблем с передачей мультимедийной информации. Мы еще вернемся к этому вопросу в главе 5. А теперь рассмотрим некоторые примеры сетей на основе соединений.

### X.25 и ретрансляция кадров

Первым примером сети с установлением соединений является X.25. Это была первая общественная сеть передачи данных. Родилась она в 70-е годы, когда во всем мире действовали телефонные монополии. В каждой стране имелась только одна сеть передачи данных — телефонная. Чтобы подключиться к X.25, компьютер устанавливал соединение с удаленным компьютером, то есть совершал телефонный звонок. Этому соединению присваивался уникальный номер, по которому и определялось место назначения передаваемых пакетов (в такой сети одновременно могло быть много соединений). Пакеты имели очень простой формат. Они состояли из трехбайтного заголовка, после которого следовало поле данных размером до 128 байт. Заголовок состоял из 12-битного номера соединения, порядкового

номера пакета, номера для подтверждения доставки и еще некоторой служебной информации. Сеть X.25 работала с переменным успехом в течение одного десятилетия.

В 80-е годы на смену X.25 пришла **технология ретрансляции кадров** (Frame Relay). На ее основе была построена сеть без контроля ошибок и передачи. Поскольку она была ориентирована на установление соединения, то пакеты доставлялись в нужном порядке (если, конечно, доставлялись вообще). Эти три свойства (отсутствие контроля передачи, отсутствие контроля ошибок и доставка в нормальном порядке) сделали сеть с ретрансляцией кадров похожей на некую глобальную по охвату и локальную по принципу действия сеть. Она широко применялась для соединения ЛВС разных офисов одного предприятия. Данная технология имела умеренный успех, но до сих пор кое-где используется.

### Асинхронный режим передачи (ATM)

Наконец, еще одна очень важная технология с установлением соединения носит название **ATM** (Asynchronous Transfer Mode — асинхронный режим передачи). Причиной столь странного наименования является то, что в большинстве систем, связанных с телефонной сетью, передача осуществляется с синхронизацией (то есть жестко привязана ко времени), а в ATM это не так.

Появилась эта технология в начале 90-х и вошла в жизнь компьютерных сетей во многом благодаря бурной рекламной кампании (Ginsburg, 1996; Goralsky, 1995; Ibe, 1997; Kim и др., 1994; Stallings, 2000). Было заявлено, что ATM решит абсолютно все мировые проблемы, связанные с компьютерными сетями и телекоммуникациями, объединив передачу голоса и данных, кабельное телевидение, телеграф, телетайп, почтовых голубей и консервные банки, чем бы они ни соединялись — проводами, дымовыми сигналами, звуками тамбуринов, — в единую интегрированную систему, которая умеет все и удовлетворит всех. Как ни странно, этого не произошло. По большей части, проблемы ATM были похожи на обсуждавшиеся ранее проблемы OSI: несвоевременность, неудачные технологии, реализация и политика. Только что отбившись от давления телефонных компаний, Интернет-сообщество увидело и в ATM борца против телефонных сетей — своего, так сказать, сподвижника. Но на самом деле все оказалось не совсем так, и на этот раз даже самые ярые фанатики дейтаграммных сетей убедились в том, что качество обслуживания при предоставлении такого доступа в Интернет оставляет желать лучшего.

В целом технология ATM имела больший успех, чем OSI, и продолжает использоваться глубоко в недрах телефонной системы и поныне. Занимается она там передачей IP-пакетов. Поскольку ее использование можно заметить, только очень сильно углубившись в подробности передачи данных, рядовые пользователи даже не подозревают о существовании ATM, а между тем она живет и здравствует.

### Виртуальные каналы ATM

Поскольку ATM является технологией, основанной на предварительном соединении, перед посылкой данных необходимо отправить пакет для установки связи.

По мере прохождения этого установочного пакета по узлам подсети все маршрутизаторы делают записи в своих внутренних таблицах, отмечая тем самым наличие соединения и резервируя для него определенные ресурсы. Устанавливаемые соединения в терминологии ATM часто называют **виртуальными каналами**, по аналогии с физическими каналами, имеющимися в телефонной системе. В большинстве сетей ATM также имеются **постоянные виртуальные каналы**, представляющие собой постоянные соединения между двумя удаленными друг от друга хостами. Они напоминают выделенные телефонные линии. У каждого соединения (как временного, так и постоянного) есть свой уникальный идентификатор. Виртуальный канал показан на рис. 1.26.

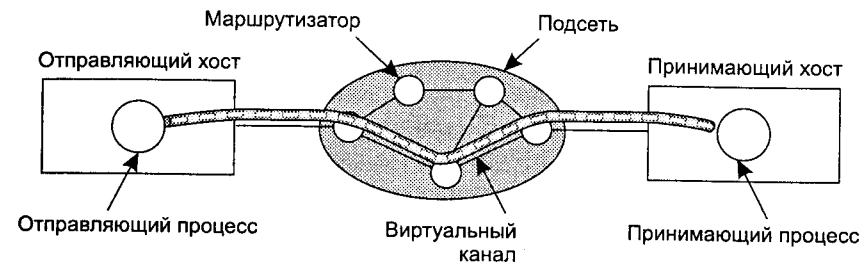


Рис. 1.26. Виртуальный канал

После установки соединения любая из сторон может начать передачу данных. В основе технологии ATM лежит идея передачи информации небольшими пакетами фиксированной длины, называемых **ячейками**. Ячейки имеют размер 53 байта, из которых 5 байт составляют заголовок, а 48 несут полезную нагрузку, как показано на рис. 1.27. Частью заголовка является идентификатор соединения, поэтому как хосты (отправляющий и принимающий), так и все маршрутизаторы, встречающиеся по пути, знают, какая ячейка принадлежит какому соединению. Эта информация позволяет маршрутизатору направить каждый входящий пакет в нужном направлении. Определение маршрута производится на аппаратном уровне с высокой скоростью. На самом деле, основным аргументом в пользу ячеек фиксированной длины является как раз тот факт, что можно легко организовать аппаратную обработку маршрутизаторами коротких пакетов известной длины. Маршрутизацию IP-пакетов можно осуществить только программно, что гораздо медленнее. Еще одним плюсом ATM является то, что можно настроить аппаратуру на размножение входящего пакета на множество выходных линий. Такое свойство требуется для организации некоего подобия телевизионной программы, которая методом широковещания пересылается большому количеству абонентов. Наконец, небольшие ячейки вряд ли смогут заблокировать линию надолго, что гарантирует определенный уровень качества обслуживания.

Все ячейки следуют по одному и тому же маршруту, поэтому верный порядок их доставки гарантируется, хотя сама доставка — нет. Если отправляется вначале ячейка № 1, затем ячейка № 2, то (если они обе прибывают на принимающий хост) не может возникнуть такой ситуации, когда придет сначала № 2, затем № 1. Однако не исключено, что один или даже оба пакета по пути потеряются. Вос-

становливать их должны протоколы более высоких уровней. И все же обратите внимание: хотя эта технология не дает абсолютных гарантий доставки, это лучше, чем то, что может обеспечить Интернет. Там пакеты могут не только потеряться, но может быть перепутан порядок их следования. ATM же обеспечивает правильный порядок доставки ячеек.

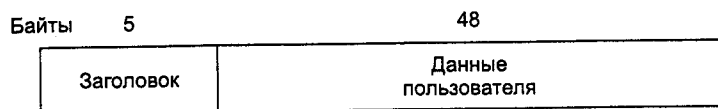


Рис. 1.27. Ячейка ATM

Сети ATM организованы по принципу традиционных региональных сетей, с линиями и коммутаторами (маршрутизаторами). Наиболее распространенные скорости работы ATM — это 155 и 622 Мбит/с, но можно использовать и более высокие скорости. Скорость 155 Мбит/с была выбрана потому, что примерно такая скорость нужна для передачи телевидения высокого разрешения. Выбор скорости в 155,52 Мбит/с был сделан для совместимости с передающей системой фирмы SONET AT&T (речь о ней пойдет в главе 2). Скорость 622 Мбит/с была выбрана для одновременной передачи четырех 155-мегабитных каналов.

## Эталонная модель ATM

У ATM есть своя эталонная модель, отличная от моделей OSI и TCP/IP. Эта модель показана на рис. 1.28. Она состоит из трех уровней: физического, ATM и адаптационного ATM-уровня, — а также включает верхние уровни, используемые пользователем.

**Физический уровень** взаимодействует с физической средой передачи данных: напряжениями, длительностями битов и т. п. ATM не предписывает на этот счет каких-нибудь правил. Напротив, сообщается, что ячейки ATM могут передаваться по проводам или по оптоволоконным кабелям сами собой, а также в упакованном виде в качестве данных по любому другому носителю. Другими словами, ATM разрабатывалась как независимая от физического носителя система.

**ATM-уровень** имеет дело с ячейками и их передачей. Он описывает схему ячейки и значение полей заголовков. Кроме того, этот уровень занимается установлением и освобождением виртуальных каналов связи. Здесь же осуществляется управление перегрузкой.

Поскольку большинство приложений не желают работать напрямую с ячейками (хотя некоторые могут это делать), уровень, расположенный над уровнем ATM, был разработан для предоставления пользователям возможности посылать пакеты, превосходящие размер ячейки. Интерфейс ATM разбивает такой пакет на ячейки, передает их по отдельности, после чего вновь собирает из них пакет на противоположной стороне. Этот уровень называется **уровнем адаптации ATM**, или **уровнем AAL**.

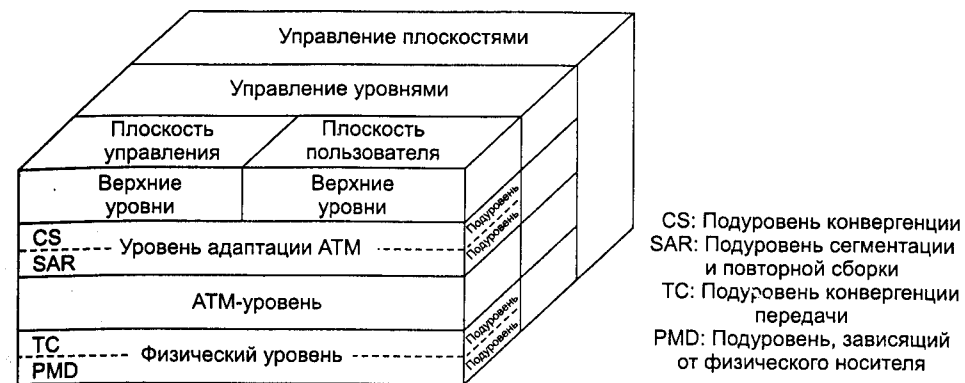


Рис. 1.28. Эталонная модель ATM

В отличие от более ранних двумерных эталонных моделей, модель ATM является трехмерной, как показано на рис. 1.28. **Плоскость пользователя** занимается транспортировкой данных, управлением потоками, исправлением ошибок и другими функциями. Задачей же **плоскости управления** является управление соединениями. Управляющие функции уровней и плоскостей занимаются управлением ресурсами и межуровневой координацией.

Физический уровень и уровень AAL подразделяются на два подуровня; нижний подуровень выполняет работу, а верхний (подуровень конвергенции) предоставляет вышестоящему уровню соответствующий интерфейс. Функции уровней и подуровней приведены на рис. 1.29.

Уровень OSI	Уровень ATM	Подуровень ATM	Функция
3/4	AAL	CS	Предоставление стандартного интерфейса (конвергенция)
		SAR	Сегментация и повторная сборка
2/3	ATM		Управление потоком Генерация/извлечение заголовков ячеек Управление виртуальным каналом/путем Объединение/разъединение ячеек
2		TC	Разборка ячеек Подсчет и проверка контрольных сумм в заголовках Генерация ячеек Упаковка ячеек в конверты или распаковка Генерация кадров
1	Физический	PMD	Управление временными параметрами сигналов Физический доступ к сети

Рис. 1.29. Уровни и подуровни ATM, их функции

Зависящий от физического носителя подуровень **PMD** (Physical Medium Dependent) обеспечивает интерфейс с физическим кабелем. Он пересылает биты и управляет временными параметрами сигналов. Этот уровень будет различным для различных носителей и кабелей.

Другим подуровнем физического уровня является подуровень **конвергенции передачи** (Transmission Convergence, TC). Уровень конвергенции передачи пересылает ячейки в виде последовательности битов уровню PMD. Это несложно. С другой стороны, подуровень конвергенции передачи принимает поток битов от подуровня PMD. Его задачей является преобразование этого битового потока в поток ячеек для уровня ATM. Он выполняет все задачи, связанные с определением начала и конца ячеек во входном потоке. В модели ATM эти функции относятся к физическому уровню. В модели OSI, а также во многих старых сетях превращение сырого потока битов в последовательность кадров или ячеек выполнялось уровнем передачи данных.

Как уже упоминалось, уровень ATM управляет ячейками, включая их создание и транспортировку. Именно здесь располагается большая часть интересных аспектов модели ATM. Этот уровень представляет собой смесь уровня передачи данных модели OSI и сетевого уровня, однако он не разбит на отдельные подуровни.

Уровень AAL состоит из двух подуровней: **подуровня сегментации и повторной сборки** (Segmentation And Reassembly, SAR) и **подуровня конвергенции** (Convergence Sublayer, CS). Нижний подуровень разбивает пакеты на ячейки при передаче и восстанавливает пакеты из ячеек при приеме. Верхний подуровень обеспечивает предоставление системами ATM определенных услуг различным приложениям (например, перенос файлов и видео по заказу предъявляют ряд требований, включая обработку ошибок, временные параметры и т. д.).

Поскольку сейчас намечилось явное устаревание технологии ATM, больше мы не будем обсуждать ее в этой книге. Тем не менее, поскольку многие системы построены с ее использованием, она продержится, вероятно, еще несколько лет. Дополнительную информацию об ATM можно почерпнуть из следующих источников: Dobrowski и Grise, 2001; Gadecki и Heckart, 1997.

## Ethernet

Интернет и ATM — это глобальные сети. Однако в различных компаниях, университетах и других организациях имеется множество компьютеров, которые необходимо соединять между собой. Эта необходимость привела к возникновению и развитию технологий локальных вычислительных сетей. В этом разделе мы вкратце рассмотрим наиболее популярную технологию ЛВС под названием Ethernet.

Ее история началась на девственно чистых, ничего не знающих о высоких технологиях Гавайских островах. Под «высокими технологиями» имеется в виду хотя бы самая обычная телефонная сеть. Даже ее там тогда еще не было. Это извлекло от назойливых звонков отдыхающих там туристов, но заметно усложняло жизнь исследователю Норману Абрамсону (Norman Abramson) и его коллегам из

Гавайского университета, которые пытались соединить пользователей, разбросанных по островам, с центральным компьютером в Гонолулу. Протягивание собственных кабелей по дну Тихого океана не входило в планы ученых, поэтому необходимо было найти какое-то альтернативное решение.

И оно нашлось. За техническую основу было принято радио ближнего радиуса действия. Каждый терминал был оборудован небольшой радиостанцией, работавшей на двух частотах, одна из которых использовалась для передачи исходящего потока (к центральному компьютеру), а другая — для входящего (все от того же центрального компьютера). Если нужно было соединиться с компьютером, радиостанция передавала пакет данных по исходящему каналу. Если в этот момент никто больше не занимался пересылкой данных, то пакет успешно уходил в нужном направлении, что удостоверялось специальным подтверждением от входящего канала принимающей стороны. Если же пакет по какой-то причине не мог быть доставлен, терминал-отправитель замечал отсутствие подтверждения и пробовал снова. Поскольку заполнять данными входящий поток каждого терминала мог только один источник — центральный компьютер, то коллизий здесь возникнуть не могло. Система была названа ALOHNET и прекрасно работала в условиях низкого трафика, однако с повышением нагрузки на сеть она быстро задохнулась.

Примерно в то же время студент по имени Боб Меткаф (Bob Metcalfe) получил диплом бакалавра в Массачусетском технологическом институте (США) и встал на путь получения звания кандидата наук в Гарвардском университете. В процессе учебы он ознакомился с разработкой Абрамсона. Она настолько заинтересовала его, что он решил провести лето на Гавайских островах, работая с Абрамсоном, перед тем как начать свою запланированную деятельность в исследовательском центре Xerox. Когда же Меткаф приступил к работе в Xerox, он обнаружил, что ученые из этой компании разработали нечто, что позднее было названо персональным компьютером. Однако эти устройства никак не были связаны между собой. Используя свои знания разработок Абрамсона, Меткаф вместе со своим коллегой Дэвидом Боггсом (David Boggs) разработал и реализовал первую локальную вычислительную сеть (Metcalfe and Boggs, 1976).

Система была названа **Ethernet**. (От *lumiferous ether*, что означает «люминесцентный эфир» — вещество, в котором, как когда-то предполагалось, распространяется электромагнитное излучение. Когда в XIX веке английский физик Джеймс Максвелл (James Maxwell) открыл явление электромагнитного излучения, было не совсем понятно, в какой среде это излучение может существовать. Ученые того времени предположили, что такая среда должна быть заполнена специальным эфиром. Только известный эксперимент, проведенный Михельсоном и Морли (Michelson — Morley) в 1887 году, убедил физиков в том, что электромагнитное излучение может распространяться в вакууме.)

Тем не менее средой передачи данных в Ethernet был не вакуум, не эфир, а толстый коаксиальный кабель, длина которого могла достигать 2,5 км (с повторителями через каждые 500 м.) К системе с помощью приемопередатчиков (трансиверов), прикрученных к кабелю, можно было подключать до 256 машин. Кабель с вычислительными машинами, параллельно подключенными к нему, на-

зывается **моноканалом**. Скорость системы составляла 2,94 Мбит/с. Схема такой сети приведена на рис. 1.30. Наиболее существенное преимущество Ethernet по сравнению с ALOHANET заключается в том, что перед началом обмена данными каждый компьютер прослушивает линию, определяя ее состояние. Если по линии уже передаются данные, значит, она занята и собственную передачу следует отложить. Такой метод обеспечивает исключение наложения данных и является довольно эффективным. В ALOHANET ничего подобного не было, поскольку там была задействована радиосвязь, и терминалу, расположенному на одном далеком острове, было тяжело определить наличие передачи с терминала, расположенного на другом далеком острове. Когда же есть один кабель, проблем с этим не возникает.

Есть одна проблема, связанная с тем, что компьютеры прослушивают линию, — непонятно, как действовать, если два или более компьютера после определения свободного состояния линии захотят начать передачу? Решение было найдено в том, чтобы компьютеры прослушивали линию и во время собственной передачи и при обнаружении интерференции с чужими данными блокировали бы линию для всех отправителей. При этом тот, кто обнаружил коллизию, должен снять свои данные с линии и в течение случайного интервала времени ожидать повторной попытки. Если и после этого возникнет коллизия, время ожидания удваивается, и т. д. Это позволяет более свободно распределить во времени попытки передачи, чтобы один из компьютеров все-таки смог начать первым.

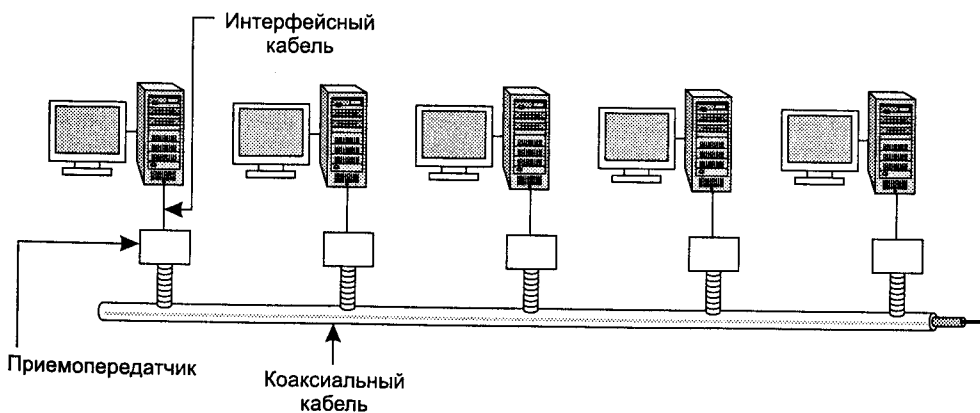


Рис. 1.30. Классическая архитектура Ethernet

Хегох Ethernet был настолько популярен, что фирмы DEC, Intel и Хегох в 1978 году совместно разработали **стандарт DIX**, описывающий Ethernet, работающий со скоростью 10 Мбит/с. С двумя небольшими изменениями DIX превратился в 1983 году в стандарт IEEE 802.3.

К сожалению, у фирмы Хегох уже был печальный опыт удачных начальных разработок (например, персональный компьютер) и неудачной маркетинговой политики — эта история описана в книге «*Fumbling the Future*» (Smith and Alexander, 1988). Когда Хегох проявила себя неспособной получить нормальный доход

от чего-либо связанного с Ethernet, кроме проводительных стандартов, **Меткаф** организовал собственную фирму 3Com и стал производить сетевые адаптеры Ethernet для ПК. Было продано более 100 миллионов экземпляров этих устройств.

Технология Ethernet продолжала развиваться, она развивается и сейчас. Уже вышли новые версии, работающие на 100 Мбит/с, 1000 Мбит/с и выше. Улучшилось качество кабелей и коммутаторов, были добавлены новые возможности. Более подробно мы обсудим Ethernet в главе 4.

Между прочим, Ethernet (IEEE 802.3) — это не единственный стандарт ЛВС. Комитетом по стандартизации зарегистрированы также технологии «маркерная шина» (802.4) и «маркерное кольцо» (802.5). Но необходимость в наличии трех более или менее совместимых стандартов вызвана причинами не столько техническими, сколько политическими. Во время стандартизации компания General Motors продвигала ЛВС с архитектурой, повторяющей Ethernet (линейный кабель). Отличие состояло только в способе определения очередности передачи. Для этого было предложено пересылать от компьютера к компьютеру специальный короткий пакет, называемый **маркером**. Начать передачу мог только тот, кто захватил маркер. Таким образом обеспечивалось отсутствие коллизий в моноканале. И все бы ничего, но General Motors заявила, что именно такая схема принципиальна для разработки автомобильной электроники. С этой позиции компанию ничто не могло сдвинуть. Несмотря на это стандарт 802.4 как-то очень быстро исчез из виду.

Аналогичным образом поступила фирма IBM, выдвинув в качестве своей новой разработки в области технологий ЛВС **маркерное кольцо**. Идея состояла в передаче маркера по кольцевому маршруту. Захватив маркер, компьютер мог осуществлять передачу и только после ее окончания передавал маркер далее. В отличие от 802.4, такая схема используется до сих пор, — правда, исключительно в вычислительных центрах IBM. Вне этих центров встретить маркерное кольцо сложно. Тем не менее, ведется разработка гигабитного маркерного кольца (802.5v), однако вряд ли эта технология сможет составить серьезную конкуренцию Ethernet. В общем, в соперничестве маркерной шины, маркерного кольца и Ethernet победила технология Ethernet, и во многом это объясняется тем, что она была первой, а все остальные разработки оказались вторичными как по времени создания, так и по уровню.

## Беспроводные ЛВС: 802.11

Почти одновременно с появлением ноутбуков у людей появились мысли о том, что неплохо было бы иметь возможность, например, по пути на работу каким-нибудь волшебным образом войти в Интернет и почитать последние новости. Разумеется, многие компании стали заниматься разработкой соответствующих аппаратных решений. Вскоре был найден очень практичный метод. Он состоял в том, чтобы оборудовать ноутбук и настольный компьютер, находящийся в офисе, радиотрансиверами небольшого радиуса действия, что позволило бы им связаться между собой. И вскоре на рынке появились первые беспроводные локальные сети, созданные разными производителями.

Проблема была в том, что сети разных фирм были совершенно несовместимы между собой. Например, компьютер, оборудованный трансивером фирмы А, был не способен работать в помещении, в котором находилась базовая станция фирмы Б. Наконец было решено привести все беспроводные ЛВС к единому стандарту. Разобраться во всем многообразии существующих технологий и выработать единую концепцию было поручено институту IEEE, который уже имел опыт стандартизации обычных ЛВС. Результатом стал стандарт 802.11, который на профессиональном жаргоне получил прозвище **WiFi**. Но этот стандарт важен и заслуживает уважения, поэтому мы будем называть его как положено — 802.11.

Данный стандарт подразумевает возможность работы в двух режимах:

- ◆ с базовой станцией;
- ◆ без базовой станции.

В первом случае связь осуществляется посредством базовой станции, называемой в терминологии 802.11 **точкой доступа**. Во втором случае компьютеры общаются непосредственно друг с другом. Этот режим иногда называют **специальной сетью**. Типичным примером является случай, когда несколько людей создают беспроводную локальную сеть, объединяя в нее свои ноутбуки. При этом они обычно находятся в помещении, в котором отсутствует базовая станция. Оба режима показаны на рис. 1.31.

Самой простой задачей IEEE было дать стандарту название. Все номера с 802.1 по 802.10 были заняты, поэтому логично было присвоить ему следующий номер: 802.11. Все остальное оказалось сложнее.

В частности, необходимо было решить следующие проблемы: найти подходящую полосу частот, желательно, удовлетворяющую международным стандартам; преодолеть сильную ограниченность дальности передачи радиоволн; обеспечить защиту информации; принять во внимание ограниченный ресурс аккумуляторов ноутбуков; подумать и о медицинской стороне вопроса (стимулируют ли радиоволны развитие раковых опухолей?); осознать предпосылки компьютерной мобильности и последствия ее реализации; наконец, построить систему с достаточно высокой пропускной способностью и разумной ценой.



Рис. 1.31. Беспроводная сеть с базовой станцией (а); специальная сеть (б)

Ко времени начала процесса стандартизации (середина 90-х) Ethernet уже играл доминирующую роль среди технологий ЛВС, поэтому было решено сделать стандарт 802.11 совместимым с Ethernet поверх канального уровня. В частности, это коснулось возможности посылать IP-пакеты по беспроводной ЛВС таким же способом, как и по обычной сети Ethernet. Тем не менее, в физическом и канальном уровнях произошли некоторые изменения, которые следовало учесть в стандарте.

Во-первых, компьютер, подключенный к Ethernet, обязан прослушивать линию перед началом передачи, и может осуществить ее, только если линия свободна. Когда дело касается беспроводной сети, эта идея не проходит. Чтобы понять, почему, взгляните на рис. 1.32. Вполне возможна ситуация, когда компьютер А передает данные компьютеру Б, но радиуса действия трансивера А не хватает, чтобы его «услышал» компьютер В. Если последний захочет обменяться данными с Б, он, конечно, может вначале прослушать эфир, но результат окажется не соответствующим действительности. Стандарт 802.11 должен был как-то решить эту проблему.

Еще один недостаток радиоволн, с которым необходимо было бороться, заключается в том, что они замечательно отражаются от твердых поверхностей, а значит, могут быть приняты несколько раз с нескольких направлений. Такой вид интерференции породил понятие **замирания вследствие многолучевого распространения**.

Третьей проблемой явилось то, что большая часть программного обеспечения была не приспособлена к мобильности компьютера. Например, текстовые процессоры часто хранят списки доступных принтеров. Когда такой компьютер переносят с одного места на другое, этот список перестает быть актуальным.

Четвертая проблема заключается в следующем. При переносе ноутбука из зоны действия одной базовой станции в зону действия другой нужно организовать соответствующий переход в работе трансивера с базовыми станциями. Эта задача известна в мире сотовой связи, но она никогда не ставилась в Ethernet-технологии, и ее надо было как-то решить.

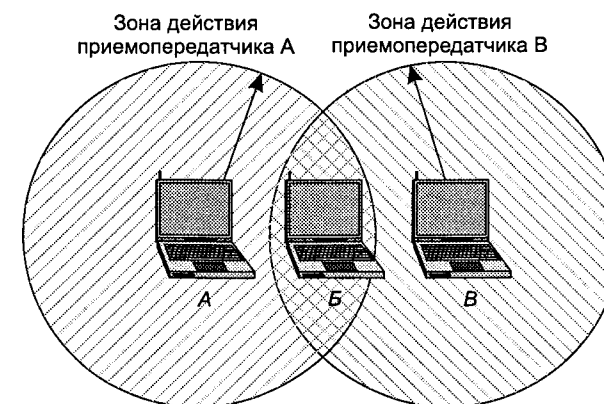


Рис. 1.32. Радиусы действия отдельных трансиверов могут не охватывать всю систему

В частности, можно представить себе сеть, состоящую из нескольких секций, в каждую из которых входит одна базовая станция, подключенная к Ethernet. Тогда в целом система выглядит как единая сеть Ethernet. Это показано на рис. 1.33. Элемент, соединяющий 802.11 с внешним миром, называется **порталом**.

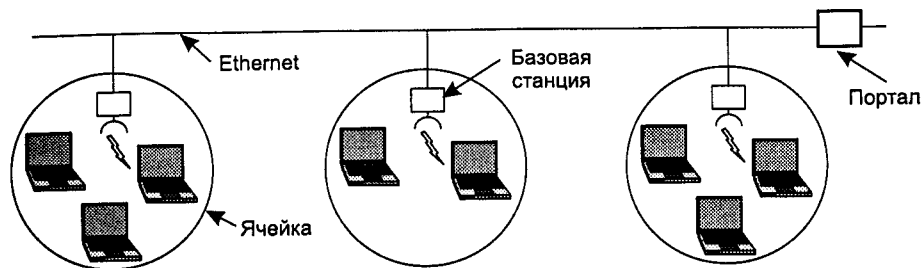


Рис. 1.33. Многосекционная сеть 802.11

Результатом работы комитета IEEE стал выпуск в 1997 году стандарта, который удовлетворял как перечисленным, так и многим другим требованиям. Беспроводная локальная сеть, которую он описывал, работала на скорости 1 Мбит/с или 2 Мбит/с. Практически сразу стали поступать жалобы пользователей на то, что сеть работала слишком медленно, поэтому была начата работа над более высокоскоростным стандартом. Разделение, произошедшее в комитете, привело к созданию в 1999 году сразу двух стандартов. IEEE 802.11a описывает сеть с расширенной полосой частот и скоростью обмена до 54 Мбит/с. 802.11b — это беспроводная сеть с такой же полосой частот, что и в базовом стандарте 802.11, но несколько иная технология модуляции позволила достигнуть скорости 11 Мбит/с. Многим это кажется важным психологическим фактором, поскольку 11 Мбит/с — это чуть быстрее, чем обычный Ethernet. Похоже, что дело идет к постепенному отмиранию изначального стандарта 802.11 со скоростью 1 Мбит/с, однако до сих пор непонятно, какое из двух расширений — 802.11a или 802.11b — выживет.

Чтобы еще больше усложнить жизнь, комитет 802 выработал еще один стандарт — 802.11g, который использует метод модуляции 802.11a и полосу частот 802.11b. Впрочем, мы еще вернемся к семейству стандартов 802.11 в главе 4.

Несомненно, 802.11 вскоре приведет к настоящей революции в компьютерном мире и в технологиях доступа в Интернет. Беспроводные сети уже устанавливаются в аэропортах, на железнодорожных станциях, в отелях, больших магазинах и университетах. Их можно найти даже в некоторых богатых кафе, где, сидя за чашечкой кофе, «золотая молодежь» может полазать по Интернету. Собственно говоря, стандарт 802.11 делает ноутбуки мобильными. Именно для этого они и были когда-то созданы.

## Стандартизация сетей

В мире существует большое количество производителей сетей, каждый из которых имеет свои представления о способах реализации различных функций. Без

координации их действий наступила бы полная неразбериха, и пользователи сетей не смогли бы с ней справиться. Единственным способом борьбы с хаосом является достижение согласия по определенным вопросам на основе сетевых стандартов.

Стандарты не только обеспечивают возможность общения различных компьютеров, но также расширяют рынок для продукции, придерживающейся стандарта, что приводит к массовому выпуску совместимой друг с другом аппаратуры, очень широко масштабной интеграции (VLSI, Very Large Scale Integration), удешевлению производства и, следовательно, к еще большему притоку потребителей на этот рынок. В следующих разделах мы рассмотрим чрезвычайно важный, но плохо изученный мир международных стандартов.

Стандарты делятся на две категории: *de facto* и *de jure*. Стандарты *de facto* (лат. «фактические») установились сами собой, без какого-либо предварительного плана. Так, например, персональные компьютеры IBM PC и их преемники стали стандартом *de facto* для небольших офисных компьютеров, поскольку десятки производителей решили довольно детально копировать машины фирмы IBM. Система UNIX стала стандартом *de facto* для операционных систем университетских компьютеров.

Стандарты *de jure* (лат. «юридические»), напротив, являются формальными, легитимными стандартами, принятыми некими авторитетными организациями по стандартизации. Международные организации по стандартизации обычно делятся на два класса: созданные на основе межправительственных договоров и добровольные организации. В области сетевых компьютерных стандартов существуют несколько организаций каждого типа, которые мы обсудим далее.

## Кто есть кто в мире телекоммуникаций

Официальный статус телефонных компаний мира в разных странах различен. На одном полюсе находятся Соединенные Штаты, в которых имеется 1500 отдельных частных телефонных компаний. До разделения в 1984 году AT&T, самая большая на тот момент корпорация в мире, полностью доминировала в этом рыночном секторе. Ее услугами пользовались около 80 % абонентов Америки, что покрывало примерно половину территории страны, тогда как все остальные компании поставляли услуги остальным клиентам (в основном провинциям). После разделения AT&T продолжает предоставлять услуги по междугородной связи, теперь уже конкурируя с другими компаниями. Семь региональных телефонных компаний (RBOC, Regional Bell Operating Company), на которые была разбита AT&T, и 1500 независимых компаний предоставляют местные телефонные услуги, а также услуги сотовой связи. Благодаря постоянному процессу объединения и раскола компаний эта отрасль промышленности находится в состоянии непрерывного изменения.

Компании в США, предоставляющие общественные услуги в области связи, называются **операторами связи общего пользования** (common carriers) или просто **операторами связи**. Предоставляемые ими услуги и цены на эти услуги описываются в документе, называемом **тарифом** (tariff), который должен быть одоб-



рен Федеральной комиссией связи США (FCC, Federal Communication Commission), если речь идет о международной связи и связи между штатами, и комиссиями по коммунальным услугам штатов — применительно к связи внутри штата.

На другом полюсе располагаются страны, в которых правительство обладает полной монополией на все средства связи, включая почту, телеграф, телефон, а часто также и радио, и телевидение. В эту категорию попадает большая часть мира. В некоторых случаях владельцем средств связи выступает национализированная компания, в других им является просто особая ветвь правительства, обычно называемая **Министерством связи** или РТТ (Postal Telegraph and Telephone administration — Управление почтово-телеграфной и телефонной связи). Сейчас во всем мире наблюдается тенденция перехода от государственной монополии к либерализации и конкуренции. Большинство европейских стран уже передало целиком или частично эту отрасль в руки независимых собственников, но кое-где процесс пока еще идет слишком медленно.

При таком разнообразии поставщиков услуг, очевидно, имеется необходимость в обеспечении совместимости во всемирном масштабе. Совместимости, гарантирующей пользователям (и компьютерам) разных стран возможность связаться друг с другом. На самом деле, эта потребность существовала уже очень давно. В 1865 году представители многих европейских государств собрались, чтобы сформировать союз, который явился предшественником сегодняшнего Международного союза телекоммуникаций (ITU, International Telecommunications Union). Задачей этого союза стала стандартизация международных средств связи. В то время еще нечего было стандартизировать, кроме телеграфа, но уже тогда было ясно, что если половина стран будет использовать азбуку Морзе, а другая половина — какой-либо другой код, то возникнут проблемы. С появлением международной телефонной связи ITU занялся также разработкой стандартов в области телефонии. В 1947 году международный союз телекоммуникаций вошел в состав учреждений Организации Объединенных Наций.

Международный союз телекоммуникаций состоит из трех главных секторов:

- ◆ сектор радиосвязи (ITU-R);
- ◆ сектор стандартизации телекоммуникаций (ITU-T);
- ◆ сектор развития (ITU-D).

Сектор радиосвязи (ITU-R) занимается вопросами предоставления радиочастот конкурирующим компаниям во всем мире. Нас же в первую очередь интересует сектор стандартизации телекоммуникаций (ITU-T), рассматривающий вопросы, связанные с телефонными системами и системами передачи данных. С 1956 по 1993 год ITU-T назывался Консультативным комитетом по международной телефонной и телеграфной связи (ССИТТ, Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique). 1 марта 1993 года ССИТТ был реорганизован и переименован в ITU-T, что больше отражало роль этой организации. Как ССИТТ, так и ITU-T выпускали рекомендации в области телефонных систем и систем передачи данных. Рекомендации ССИТТ встречаются еще довольно часто, как, например, ССИТТ X.25, хотя с 1993 года рекомендации носят эмблему ITU-T.

В ITU-T входят представители

- ◆ национальных административных структур;
- ◆ соответствующего промышленного сектора;
- ◆ организаций;
- ◆ регулятивных органов.

В ITU-T входят примерно 200 представителей различных ведомств, включая практически все организации ООН. В США отсутствует РТТ, но кто-то же должен представлять государственные структуры. Эта роль выпала Государственному департаменту. Возможно, он участвует в решении вопросов взаимодействия ITU-T с другими государствами, что коррелирует с собственным направлением деятельности Госдепартамента. В состав ITU-T входит примерно 500 представителей соответствующего промышленного сектора, среди которых есть и телефонные компании (например, AT&T, Vodafone, WorldCom), и производители телекоммуникационной аппаратуры (например, Cisco, Nokia, Nortel), и производители компьютеров (например, Compaq, Sun, Toshiba), производители микросхем (например, Intel, Motorola, TI), медиа-компании (например, AOL Time Warner, CBS, Sony) и другие заинтересованные компании (например, Boeing, Samsung, Xerox). Различные некоммерческие научные организации и промышленные консорциумы (например, IFIP и IATA) также входят в состав представителей промышленного сектора. Другую группу составляют представители относительно небольших организаций, заинтересованных в конкретных направлениях стандартизации. Регулятивные органы наблюдают за развитием телекоммуникационного бизнеса. Среди них, например, Федеральная комиссия связи США.

Задачей ITU-T является разработка технических рекомендаций в области телефонии, телеграфа и интерфейсов передачи данных. Подобные рекомендации часто становятся международными стандартами, как, например, V.24 (известный также как EIA RS-232), описывающий расположение и назначение контактов разъема, используемого в большинстве асинхронных терминалов и внешних модемов.

Следует заметить, что рекомендации ITU-T являются всего лишь предложениями, которые правительство любой страны может принять или проигнорировать. (Потому что правительства подобны тринадцатилетним мальчишкам, которые терпеть не могут, когда им приказывают что-то делать. Лучше скромно порекомендовать.) На практике никто не может помешать стране принять свой собственный телефонный стандарт, отличающийся от всех других, однако тем самым эта страна сама себя отрешит от всего мира. Возможно, такой подход будет работать в Северной Корее, но во всем остальном мире это будет настоящей проблемой. Так что использование названия «рекомендации» для стандартов ITU-T можно считать выдумкой для умиротворения националистов.

Собственно работа в ITU-T осуществляется исследовательскими группами (Study Groups), состав которых часто достигает 400 человек. В настоящее время работают 14 таких групп, занимающихся самыми разными вопросами, начиная от концепции оплаты телефонных услуг и заканчивая службами мультимедиа. Чтобы сделать возможной какую-либо работу, исследовательские группы разделяются на рабочие группы (Working Parties), подразделяющиеся, в свою очередь,

на экспертные команды (Expert Teams), которые также делятся на группы. Бюрократия и здесь остается бюрократией.

Несмотря на все это ITU-T справляется с работой. Текущий выход этой организации — около 3000 рекомендаций в год, что составляет 60 000 страниц печатного текста. Многие из них широко применяются на практике. Например, популярный стандарт V-90 для модемов со скоростью 56 Кбит/с является ничем иным, как рекомендацией ITU.

По мере того, как телекоммуникации завершают начатый ими в 80-е годы переход от национальных систем к глобальным, стандарты становятся все более важным аспектом их развития, и все большее число организаций желает принять участие в их формировании. Дополнительную информацию об ITU см. Inger, 1994.

## Кто есть кто в мире международных стандартов

Международные стандарты разрабатываются Международной организацией по стандартизации (International Organization for Standardization, ISO), добровольной организацией, созданной в 1946 году. В нее входят национальные организации по стандартизации из 89 стран. Среди ее членов такие организации, как ANSI (США), BSI (Великобритания), AFNOR (Франция), DIN (Германия) и др.

ISO выпускает стандарты, касающиеся широкого спектра вопросов, начиная от болтов и гаек (буквально) до покраски телефонных столбов (не говоря уж о стандартах на какао-бобы (ISO 2451), рыболовные сети (ISO 1530), женское нижнее белье (ISO 4416)... Сложно придумать такую вещь, для которой не существовало бы стандарта ISO). К настоящему времени выпущено более 13 000 стандартов, включая стандарты OSI. В ISO входят почти 200 технических комитетов (Technical Committee, TC), нумерованных последовательно, по мере их создания, каждый из которых занимается своим отдельным вопросом. Так, например, TC1 занимается болтами и гайками (стандартизацией диаметра и шага резьбы). Компьютеры и обработка информации входят в сферу деятельности TC97. Каждый технический комитет делится на подкомитеты (subcommittee, SC), которые, в свою очередь, состоят из рабочих групп (working group, WG).

Основная работа проводится в рабочих группах, в которые входит более 100 000 добровольцев по всему миру. Многие из этих «добровольцев» работают по найму в компаниях, чьи продукты должны быть стандартизованы. Другие являются государственными служащими, пытающимися сделать свой национальный стандарт международным. Ученые эксперты также принимают активное участие во многих рабочих группах.

В области телекоммуникационных стандартов ISO и ITU-T часто сотрудничают (ISO является членом ITU-T), чтобы не допустить возникновения двух несовместимых международных стандартов.

Представителем США в ISO является **Национальный институт стандартизации США (ANSI, American National Standards Institute)**, который, несмотря на свое название, является частной неправительственной некоммерческой организацией. Ее членами являются производители, операторы связи и другие заинтересованные стороны. Стандарты ANSI часто принимаются ISO в качестве международных.

Для принятия стандартов Международной организацией по стандартизации ISO разработана процедура, позволяющая добиться принятия мнения, одобренного максимально возможным количеством сторон. Процесс начинается, когда одна из национальных организаций по стандартизации чувствует потребность в появлении международного стандарта в определенной области. Тогда формируется рабочая группа, которая вырабатывает **предварительный план (Committee Draft, CD)**. Этот набросок передается всем остальным членам технического комитета. На критику проекта отводится шесть месяцев. Если проект получает одобрение значительного большинства, то откорректированный документ получает название **чернового международного стандарта (DIS, Draft International Standard)**; после этого он опять циркулирует в различных группах, где за него голосуют и снабжают его комментариями. На основании этого подготавливается, утверждается и публикуется окончательный документ, называемый **международным стандартом (IS, International Standard)**. В некоторых случаях черновым вариантам, CD или DIS приходится проходить через многократные изменения и голосования, пока они не наберут достаточного количества голосов. Этот процесс может длиться несколько лет.

**Национальный институт стандартов и технологий США (NIST, National Institute of Standards and Technology)** является агентством Министерства торговли США (U.S. Dept. of Commerce). Ранее он назывался Национальным бюро стандартов (National Bureau of Standards). Он выпускает стандарты, обязательные для закупок, проводимых правительством США, кроме закупок Министерства обороны, у которого имеются свои стандарты.

Одним из основных игроков на поле стандартизации является Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers) — крупнейшая профессиональная организация в мире. Помимо выпуска ряда журналов и организации разнообразных конференций, IEEE также разрабатывает стандарты в области электротехники и электроники. Например, комитет IEEE 802 выпустил ряд ключевых стандартов в области локальных компьютерных сетей, часть из которых мы рассмотрим в этой книге. Реальная работа проводится, как правило, внутри рабочих групп, которые перечислены в табл. 1.4. Рабочие группы комитета 802 никогда не считались преуспевающими. Номер 802.x вовсе не был залогом успеха. Однако стремительный взлет популярности стандартов типа 802.3 и 802.11 изменил ситуацию.

**Таблица 1.4.** Рабочие группы комитета 802. Наиболее важные отмечены звездочкой (\*). Те, что помечены галочкой (v), бездействуют. Отмеченные крестиком (†) самоликвидировались за ненадобностью

Номер	Тема разработок
802.1	Общее представление и архитектура ЛВС
802.2 v	Управление логическим каналом
802.3 *	Ethernet
802.4 v	Маркерная шина (одно время использовалась в промышленных сетях)

Таблица 1.4 (продолжение)

Номер	Тема разработок
802.5	Маркерное кольцо (вклад фирмы IBM в технологии ЛВС)
802.6 v	Двойная двунаправленная шина (ранние региональные сети)
802.2 v	Техническая консультативная группа по широкополосным технологиям
802.8 †	Техническая консультативная группа по оптоволоконным технологиям
802.9 v	Изохронные ЛВС (для приложений реального времени)
802.10 v	Виртуальные ЛВС и защита информации
802.11 *	Беспроводные ЛВС
802.12 v	Приоритеты запросов (для AnyLAN фирмы Hewlett-Packard)
802.13	Счастливый номер. Почему-то его никто не выбрал.
802.14 v	Кабельные модемы (рабочая группа распалась: в области кабельных модемов ее опередил промышленный консорциум)
802.15 *	Персональные сети (Bluetooth)
802.16 *	Широкополосные беспроводные ЛВС
802.17	Гибкая технология пакетного кольца

## Кто есть кто в мире стандартов Интернета

Всемирная сеть Интернет имеет свой механизм стандартизации, значительно отличающийся от ITU-T и ISO. В двух словах, основное отличие заключается в том, что сотрудники ITU и ISO носят деловые костюмы, тогда как стандарты Интернета разрабатывают в основном люди в джинсах (ну, кроме тех, кто работает в Сан-Диего — на них надеты шорты и футболки с коротким рукавом).

На совещания ITU-T и ISO собираются администраторы корпораций и государственные гражданские служащие, для которых стандартизация является работой. Они считают, что стандартизация — Очень Нужная Вещь, и посвящают ей свою жизнь. Для людей Интернета, напротив, анархия является делом принципа, однако когда сотни миллионов делают какое-то общее дело, иногда им все же приходится о чем-то договариваться, чтобы хоть что-то работало. Волей-неволей стандарты оказываются необходимыми.

Когда была запущена сеть ARPANET, Министерство обороны США создало неофициальный комитет для наблюдения за сетью. В 1983 году этот комитет был переименован в **Совет по деятельности Интернета** (Internet Activities Board, **IAB**). Перед советом были поставлены несколько расширенные задачи, а именно: удерживать исследователей, включенных в проекты ARPANET и Интернет, в более или менее одном направлении, что напоминало попытку выпаса стада кошек. Значение сокращения IAB было затем изменено на **Совет по архитектуре Интернета** (Internet Architecture Board).

Каждый из приблизительно десяти членов IAB возглавлял специальную комиссию по отдельному важному вопросу. Совет по архитектуре Интернета собирался несколько раз в год для обсуждения результатов работы и представления

отчета Министерству обороны и NSF, которые в то время осуществляли основное финансирование в этой области. Когда требовался какой-либо стандарт (например, новый алгоритм маршрутизации), члены совета прорабатывали этот вопрос, после чего объявляли об изменениях аспирантам, занимавшимся реализацией программного обеспечения сетей. Стандарты оформлялись в виде набора технических отчетов, называемых **RFC** (Requests for Comments). RFC доступны в Интернете для всех желающих ([www.ietf.org/rfc](http://www.ietf.org/rfc)). Они пронумерованы в хронологическом порядке их создания. На сегодняшний день существует около 3000 этих документов. На многие из них мы будем ссылаться в этой книге.

К 1989 году Интернет вырос настолько, что подобный неформальный подход к его стандартам перестал работать. К тому моменту многие производители предлагали продукцию на основе протокола TCP/IP и не хотели ее менять просто потому, что десятку исследователей пришла в головы одна хорошая идея. Летом 1989 года IAB был снова реорганизован. Исследователи были переведены в **группу исследования Интернета** (Internet Research Task Force, IRTF), подконтрольную IAB, и в **группу проектирования Интернета** (Internet Engineering Task Force, IETF). В совете IAB появились люди, представляющие более широкий спектр организаций, чем исследовательское сообщество. Вначале это была группа, в которой члены работали в течение двух лет, после чего сами назначали своих преемников. Затем было создано **Общество Интернета** (Internet Society), в которое вошли люди, заинтересованные в Интернете. Таким образом, Интернет-сообщество в каком-то смысле сравнимо с Ассоциацией по вычислительной технике (ACM, Association for Computing Machinery) или IEEE. Оно управляется избираемыми доверенными лицами, которые утверждают состав IAB.

Идея этого разделения заключалась в том, чтобы сосредоточить IRTF на долгосрочных исследованиях, а IETF — на краткосрочных инженерных вопросах. Проблемная группа IETF была разделена на рабочие группы, каждая из которых решала свою задачу. Первое время председатели рабочих групп встречались друг с другом в составе руководящего комитета для координации совместных исследовательских усилий. Рабочие группы занимались такими вопросами, как новые приложения, информация для пользователей, OSI-интеграция, маршрутизация и адресация, безопасность, управление сетью и стандарты. В конце концов было сформировано так много рабочих групп (более 70), что их объединили по областям, после чего в руководящем комитете стали собираться председатели областей.

Кроме того, был принят более формальный процесс стандартизации по аналогии с процедурой, принятой в ISO. Чтобы стать **предлагаемым стандартом**, основная идея должна быть полностью изложена в RFC и должна представлять достаточный интерес, гарантирующий ее рассмотрение. Затем, чтобы стать **проектом стандарта**, должна быть создана работающая реализация, которую нужно тщательно протестировать минимум двумя независимыми сайтами в течение 4 месяцев. Если IAB уверен, что идея здравая и программное обеспечение работает, он может объявить RFC стандартом Интернета. Некоторые стандарты Интернета стали стандартами Министерства обороны США (MIL-STD), что сделало их обязательными к применению поставщиками министерства. Дэвид Кларк (David

Clark) как-то высказал замечание, ставшее ныне популярным, о стандартизации Интернета, состоящей из «грубого консенсуса и работающей программы».

## Единицы измерения

Во избежание путаницы необходимо предварить дальнейшие рассуждения замечанием по поводу единиц измерения. В computer science традиционной английской системе обычно предпочитают десятичную систему мер. Основные префиксы, используемые при этом, приведены в табл. 1.5. Обычно они сокращаются по первым буквам их названий, причем, если префикс имеет вес, больший 1, то он пишется с заглавной буквы (Кбайт, Мбайт и т. д.). Единственное исключение исторически составляет сокращение Кбит/с. Таким образом, линия, работающая на скорости 1 Мбит/с, передает  $10^6$  бит в секунду, а таймер на 100 пс изменяет свое состояние каждую  $10^{-10}$ -ю долю секунды. Поскольку «милли» и «микро» начинаются с одной и той же буквы, то принято обозначать «милли» буквой «м», а «микро» — буквами «мк» или греческой буквой «μ».

Таблица 1.5. Основные префиксы метрической системы

Степень	В явном виде	Префикс	Степень	В явном виде	Префикс
$10^{-3}$	0,001	Милли	$10^3$	1000	Кило
$10^{-6}$	0,000001	Микро	$10^6$	1 000 000	Мега
$10^{-9}$	0,000000001	Нано	$10^9$	1 000 000 000	Гига
$10^{-12}$	0,000000000001	Пико	$10^{12}$	1 000 000 000 000	Тера
$10^{-15}$	0,000000000000001	Фемто	$10^{15}$	1 000 000 000 000 000	Пета
$10^{-18}$	0,000000000000000001	Атто	$10^{18}$	1 000 000 000 000 000 000	Экса
$10^{-21}$	0,00000000000000000001	Цепто	$10^{21}$	1 000 000 000 000 000 000 000	Цетта
$10^{-24}$	0,000000000000000000000001	Йокто	$10^{24}$	1 000 000 000 000 000 000 000 000	Йотта

Также необходимо отметить, что единицы измерения, используемые для обозначения объемов памяти, емкости дисков, размеров файлов и баз данных, несколько отличаются от принятых в других областях. Например, «кило» означает не 1000 ( $10^3$ ), а 1024 ( $2^{10}$ ), что соответствует общей двоичной концепции computer science. Размеры памяти всегда представляют собой степени двойки. Так, в 1 Кбайте содержится 1024 байт, а не 1000 байт. Аналогично, в 1 Мбайте содержится  $2^{20}$ , то есть 1 048 576 байт, а в 1 Гбайте, соответственно, —  $2^{30}$  (1 073 741 824) байт. База данных на 1 Тбайт содержит  $2^{40}$  (1 099 511 627 776) байт. Тем не менее, линия при скорости 1 Кбит/с передает 1000 бит/с, а ЛВС, работающая со скоростью 10 Мбит/с, может передавать 10 000 000 бит/с — скорости не измеряются степенями двойки. К сожалению, многие путают эти две системы счисления, особенно когда дело касается емкости дисков. Чтобы избежать двусмысленности, еще раз повторюсь: по крайней мере, в нашей книге сим-

волы Кбайт, Мбайт и Гбайт будут означать  $2^{10}$ ,  $2^{20}$  и  $2^{30}$  байт соответственно, а «биты» так и будут «битами». Поэтому символы Кбит/с, Мбит/с и Гбит/с будут означать соответственно  $10^3$ ,  $10^6$  и  $10^9$  бит в секунду.

## Краткое содержание следующих глав

В этой книге обсуждаются как теоретические, так и практические вопросы построения компьютерных сетей. Большая часть глав начинается с обсуждения основных принципов, за которыми следует ряд примеров, иллюстрирующих эти принципы. На протяжении всей книги в качестве примеров используются две действующие сети — Интернет и беспроводные сети. Эти сети очень важны и актуальны, а кроме того, они очень разные. Там, где это важно, будут даны и другие примеры.

Структура книги соответствует гибридной модели, изображенной на рис. 1.20. В главе 2 мы рассмотрим иерархию протоколов, начиная с самого нижнего из них. В ней мы изучим основные положения в области обмена данными. Кроме того, в главе 2 обсуждаются проводная и беспроводная передача, а также спутниковые телекоммуникационные системы. Этот материал относится к физическому уровню, хотя мы будем обсуждать не столько аппаратные, сколько архитектурные аспекты. Также будут обсуждаться несколько примеров физического уровня, такие как коммутируемая телефонная сеть общего пользования, мобильная телефонная сеть, а также сеть кабельного телевидения.

В главе 3 рассматривается канальный уровень и его протоколы. Каждый последующий пример будет сложнее предыдущего. Далее проводится анализ этих протоколов и обсуждаются некоторые важные действующие протоколы, включая HDLC (используемый в сетях с низкими и средними скоростями) и PPP (используется в Интернете).

В главе 4 рассматривается подуровень доступа к носителям, являющийся частью канального уровня. В основном, он определяет следующего, кто может использовать сеть, состоящую из одного совместно используемого канала (моноканала). Такая архитектура применяется в большинстве локальных сетей, а также в некоторых спутниковых сетях. Приводится ряд примеров из области обычных ЛВС, беспроводных ЛВС (в частности, Ethernet), беспроводных региональных сетей, Bluetooth и спутниковых сетей. Также обсуждаются мосты и коммутаторы, используемые для объединения нескольких локальных сетей.

В главе 5 описывается сетевой уровень, в частности маршрутизация. Обсуждаются как статические, так и динамические алгоритмы маршрутизации. Даже очень хороший алгоритм рассчитан на сеть с определенным уровнем загрузки. При превышении этого уровня могут возникать заторы, их предотвращение и борьба с ними также обсуждается в этой главе. Однако более общим вопросом, чем предотвращение заторов, является обеспечение необходимого уровня обслуживания. Мы обсудим и это. Кроме того, затрагивается ряд проблем, возникающих при связи разнородных сетей. Особое внимание уделяется сетевому уровню применительно к Интернету.

Глава 6 посвящена транспортным уровням. Основное внимание уделяется протоколам, ориентированным на соединение, поскольку в них нуждаются многие приложения. Детально обсуждаются пример транспортной службы и ее реализация. Приводится реально работающий код для этого несложного примера, который дает представление о том, как программно реализуется данный уровень. Подробно описываются транспортные протоколы Интернета — TCP и UDP. Обсуждаются также вопросы их эффективности. Также в главе 6 будут упомянуты транспортные уровни беспроводных сетей.

В главе 7 описывается прикладной уровень, его протоколы и приложения. Первое, к чему мы обратимся, будет служба DNS — интернет-аналог телефонной книги. Затем речь пойдет об электронной почте и о протоколах, которые в ней используются. Много места уделено веб-технологиям. В разделах, посвященных им, подробно обсуждается статическое и динамическое содержимое страниц, рассказывается о том, что происходит на стороне клиента и сервера, рассматриваются протоколы, производительность, беспроводной Веб и др. Наконец, будут раскрыты и вопросы мультимедиа в Сети, включая потоковый звук, интернет-радио и видео.

Глава 8 посвящена вопросам защиты информации. В этой теме есть аспекты, касающиеся всех уровней, именно поэтому данная глава завершает книгу. Она начинается с объяснения основ криптографии. После этого приводятся примеры применения криптографии для налаживания безопасных соединений, защиты электронной почты и веб-страниц. Заканчивается глава обсуждением некоторых вопросов, в которых защита информации обеспечивает некоторые права человека. Речь идет о свободе слова, цензуре и других насущных социальных проблемах.

Глава 9 содержит аннотированный список предлагаемой литературы, организованный по главам. Его цель — помочь читателям, желающим продолжить изучение сетей. В главе также содержится алфавитный список литературы, упоминаемой в тексте книги.

Сайт автора в издательстве Prentice Hall (<http://www.prenhall/tanenbaum>) содержит страничку со ссылками на различные самоучители, ответы на часто задаваемые вопросы, а также ссылки на сайты компаний и промышленных консорциумов, профессиональных организаций, комитетов по стандартизации, технологиям, документации и т. д.

## Резюме

Компьютерные сети могут использоваться для оказания различных услуг как компаниям, так и частным лицам. В компаниях сети персональных компьютеров часто обеспечивают доступ к корпоративной информации. Обычно они строятся в соответствии с моделью «клиент-сервер», причем клиентские станции на рабочих местах в офисе связаны с мощными серверами, расположенными в специальном помещении. Частным лицам сеть предоставляет доступ к широкому спектру информационных и развлекательных ресурсов. Многие пользователи для входа

в Интернет используют модем, с помощью которого они соединяются со своим провайдером, хотя все больше людей устанавливает дома постоянное подключение. Новой и очень перспективной областью является технология беспроводных сетей, применяемая для таких целей как мобильный доступ к электронной почте и мобильная коммерция.

Грубо говоря, все сети могут быть разделены на локальные, региональные, глобальные и объединенные, каждая со своими характеристиками, технологиями, скоростями и областями применения. Локальные сети охватывают здание и работают с очень высокой скоростью. Региональные охватывают город — примером этого могут служить сети кабельного телевидения, используемые в последнее время для доступа в Интернет. Глобальные сети охватывают страну или континент. Локальные и региональные сети являются некоммутируемыми (то есть они не имеют маршрутизаторов), глобальные же сети являются коммутируемыми. Беспроводные сети становятся очень популярными, особенно беспроводные ЛВС. Сети можно соединять между собой, получая объединенные сети.

Сетевое программное обеспечение состоит из протоколов, или правил, по которым процессы обмениваются информацией. Протоколы могут быть ориентированными на соединение и не требующими соединения. Большая часть сетей поддерживает иерархию протоколов, в которой каждый уровень предоставляет услуги вышестоящему уровню, не раскрывая ему подробностей своей работы. Стек протоколов обычно базируется на модели OSI или модели TCP/IP. В обеих моделях имеется сетевой, транспортный и прикладной уровни, но они различаются в остальных уровнях. Вопросы разработки включают в себя уплотнение каналов, управление передачей, обнаружение ошибок и т. д. В книге уделяется много внимания протоколам и их проектированию.

Итак, сети предоставляют пользователям определенные услуги, реализуемые на основе установления соединений или без соединений. Есть сети, которые на одних уровнях используют первый из этих принципов, на других (более низких) — второй.

К хорошо известным сетям относятся Интернет, ATM, Ethernet и беспроводные ЛВС стандарта 802.11. Сеть Интернет выросла из ARPANET, к которой был добавлен ряд других сетей. Таким образом, Интернет является объединенной сетью, Сетью сетей, число которых сегодня измеряется тысячами. Интернет характеризуется, прежде всего, использованием стека протоколов TCP/IP. ATM широко используется в телефонной системе при передаче данных на большие расстояния. Ethernet — это наиболее популярная технология ЛВС, встречается в крупнейших компаниях и университетах. Наконец, беспроводные ЛВС с удивительно высокими скоростями (до 54 Мбит/с) тоже постепенно входят в нашу жизнь.

Для того чтобы миллионы компьютеров могли общаться друг с другом, нужны как аппаратные, так и программные стандарты. Разрабатываются они такими организациями, как ITU-T, ISO, IEEE и IAB. Каждая из них работает в своей области, и все вместе они реализуют процесс стандартизации компьютерных сетей.

## Вопросы

- Представьте, что вы научили свою собаку, сенбернара Берни, приносить вам коробку с тремя 8-миллиметровыми магнитными лентами вместо бутылки бренди. (Потому что с некоторых пор вы стали рассматривать заканчивающееся место на жестком диске как трагедию.) На каждой ленте помещается 7 Гбайт информации. Собака обучена бежать к вам, где бы вы ни находились, со скоростью 18 км/ч. В каком диапазоне расстояний скорость передачи данных собакой будет выше, чем у линии, чья фактическая скорость работы составляет 150 Мбит данных в секунду?
- Альтернативой локальной сети является большая система разделения времени с терминалом для каждого пользователя. Приведите два преимущества клиент-серверной системы, использующей локальную сеть.
- На производительность системы «клиент-сервер» влияют два параметра сети: пропускная способность (сколько бит в секунду она может передавать) и время ожидания (сколько секунд требуется на доставку первого бита от клиента до сервера). Приведите пример: а) сети с высокой пропускной способностью и большим временем ожидания; б) сети с низкой пропускной способностью и малым временем ожидания.
- Какие еще характеристики, кроме пропускной способности и времени ожидания, нужно оптимизировать для получения высокого качества обслуживания в сетях цифровой передачи речи?
- Одним из факторов, влияющих на время ожидания в сетях с коммутацией пакетов и промежуточным хранением, является задержка при сохранении и переадресации пакета коммутатором. Если время коммутации составляет 10 мкс, будет ли это основной задержкой в работе клиент-серверной системы, в которой клиент находится в Нью-Йорке, а сервер — в Калифорнии? Скорость распространения сигнала в медной линии принять равной  $2/3$  скорости света в вакууме.
- Система «клиент-сервер» использует спутниковую сеть. Орбита вращения спутника удалена от поверхности Земли на 40 000 км. Какова будет минимально возможная задержка при ожидании ответа на запрос в такой системе?
- В будущем, когда у всех дома будет терминал, подключенный к компьютерной сети, станут возможными мгновенные референдумы по важным законодательным вопросам. В конце концов существующие законодательные органы могут быть распущены, что позволит народу выражать свою волю напрямую. Позитивные аспекты такой прямой демократии очевидны. Обсудите некоторые негативные аспекты.
- Пять маршрутизаторов необходимо соединить в подсеть с двухточечным соединением. Каждые два маршрутизатора разработчики могут соединить высокоскоростной, среднескоростной, низкоскоростной линией или никак не соединять. Предположим, компьютеру требуется 100 мс для моделирования

и анализа каждой топологии. Сколько компьютерного времени понадобится для выбора варианта, лучше всего соответствующего ожидаемой нагрузке?

- Группа из  $2^n - 1$  маршрутизаторов соединены в централизованное бинарное дерево с маршрутизатором в каждом узле. Маршрутизатор  $i$  общается с маршрутизатором  $j$ , посылая сообщения корню дерева. Затем корень дерева посылает это сообщение маршрутизатору  $j$ . Выведите приближительную формулу числа прыжков сообщения для большого  $n$ , предполагая, что все пары маршрутизаторов одинаковы.
- Отрицательной чертой широковещательной подсети является потеря мощности вследствие попытки одновременного доступа к каналу нескольких хостов. В качестве простейшего примера, предположим, что время делится на равные интервалы, в которые каждый из  $n$  хостов пытается использовать канал с вероятностью  $p$ . Какой процент интервалов будет потерян из-за конфликтов?
- Назовите две причины использования многоуровневых протоколов.
- Президент корпорации Specialty Paint Corp. решает объединить усилия с местной пивоваренной фабрикой для производства невидимой пивной банки (в качестве средства борьбы с мусором). Президент просит свой юридический отдел рассмотреть эту идею, а те, в свою очередь, обращаются за помощью в технический отдел. В результате начальник технического отдела звонит начальнику технического отдела пивоваренного завода, чтобы обсудить технические аспекты проекта. После этого оба инженера докладывают своим юридическим отделам, которые затем обсуждают друг с другом по телефону юридические вопросы. Наконец, два президента корпораций обсуждают финансовую сторону дела. Является ли данный пример иллюстрацией многоуровневого протокола в духе модели OSI?
- Какова принципиальная разница между ориентированным на соединение и не требующим соединения обменом информацией?
- Представим себе две сети, предоставляющие надежные ориентированные на соединение службы. Одна из сетей обеспечивает надежный поток байтов, а другая — надежный поток сообщений. Идентичны ли эти сети? Если да, то почему проводится различие? Если нет, объясните на примере, чем они различаются.
- Что означает термин «согласование» (negotiation) в контексте обсуждения сетевых протоколов? Приведите пример.
- На рис. 1.15 изображен некоторый сервис. Подразумевается ли наличие других сервисов на этом рисунке? Если да, то где? Если нет, то почему?
- В некоторых сетях уровень передачи данных обрабатывает ошибки передачи, требуя повторной передачи поврежденных кадров. Если вероятность повреждения кадра равна  $p$ , каким будет среднее число попыток, необходимых для передачи кадра, при условии, что подтверждения никогда не теряются?
- Какой из уровней OSI выполняет следующее:
  - разбивает передаваемый поток битов на кадры;
  - определяет, какой из маршрутов подсети использовать?

Если данные, измененные на уровне передачи данных, называются кадрами, а измененные на сетевом уровне — пакетами, означает ли это, что в кадре содержатся пакеты или что в пакете содержатся кадры? Ответ поясните.

Система обладает  $n$ -уровневой иерархией протоколов. Приложения обмениваются сообщениями длиной  $M$  байт. На каждом из уровней добавляется заголовок из  $h$  байт. Какой процент пропускной способности занят заголовками?

Приведите две общие черты эталонных моделей OSI и TCP/IP. Приведите два различия этих моделей.

В чем основное различие между протоколами TCP и UDP?

Подсеть на рис. 1.21, б проектировалась таким образом, чтобы выстоять во время ядерной войны. Сколько бомб потребуется, чтобы разбить сеть на две изолированные части, если одна бомба разрушает узел со всеми линиями, подходящими к нему.

Интернет удваивается в размерах приблизительно каждые 18 месяцев. Точное число хостов неизвестно, но один аналитик в 2001 году назвал цифру в 100 млн. хостов. Сколько будет хостов в Интернете в 2010 году? Вы сами верите в это? Поясните свою точку зрения.

При передаче файла между двумя компьютерами возможны (как минимум) две стратегии подтверждений. В первом случае файл может быть разбит на отдельные пакеты, получение которых подтверждается получателем индивидуально, но получение всего файла не подтверждается. Во втором случае получение каждого пакета не подтверждается, а подтверждается получение всего файла. Обсудите оба варианта.

Почему в ATM используются короткие ячейки фиксированного размера?

Какой длины (в метрах) был один бит в соответствии со стандартом 802.3? Для вычислений примите скорость работы равной 10 Мбит/с, а скорость распространения сигнала равной  $2/3$  скорости света в вакууме.

Имеется несжатое изображение размером  $1024 \times 768$  пикселей, 3 байта/пиксел. Сколько времени потребуется на его передачу с помощью модема, работающего со скоростью 56 Кбит/с? С помощью кабельного модема, работающего на 1 Мбит/с? По Ethernet со скоростью передачи 10 Мбит/с? По Ethernet со скоростью 100 Мбит/с?

Ethernet и беспроводные сети имеют много общего, но есть и различия. Одним из свойств Ethernet является возможность передачи только одного кадра в каждый момент времени. Унаследовал ли стандарт 802.11 это свойство?

Беспроводные сети легко устанавливаются, что делает их относительно недорогими, потому что стоимость установки обычной сети часто превышает стоимость оборудования. Тем не менее, у них есть некоторые недостатки. Назовите два из них.

Назовите два преимущества и два недостатка наличия международных стандартов для сетевых протоколов.

Когда у системы имеются постоянная и съемная части, как у проигрывателя компакт-дисков и компакт-диска, важно, чтобы система была стандартизированной,

чтобы различные компании могли выпускать как постоянные, так и съемные части, стыкующиеся друг с другом. Приведите три примера международных стандартов вне компьютерной области. Теперь приведите три примера отсутствия международных стандартов вне компьютерной области.

33. Перечислите, какие действия вы производите ежедневно при помощи компьютерных сетей. Как изменится ваша жизнь, если сети вдруг перестанут существовать?
34. Узнайте, какие сети установлены в вашем учебном заведении или на работе. Опишите их типы, топологии, методы коммутации.
35. Программа *ping* позволяет отправлять тестовый пакет по указанному адресу и исследовать время его прохождения в одну и в другую сторону. Попробуйте воспользоваться этой программой, чтобы выяснить, сколько времени следуют данные по различным известным адресам. Используя полученные данные, постройте график зависимости времени прохождения пакета от расстояния. Лучше всего использовать для экспериментов серверы университетов, поскольку их расположение очень хорошо известно. Например, *berkeley.edu* находится в Беркли, штат Калифорния, *mit.edu* — в Кембридже, Массачусетс, *vu.nl* — в Амстердаме, Голландия, *www.usyd.edu.au* — в Сиднее, Австралия и *www.uct.ac.za* — в Кейптауне, Южная Африка.
36. Посетите сайт IETF ([www.ietf.org](http://www.ietf.org)) и изучите, чем занимается эта организация. Возьмите в качестве примера любой понравившийся вам проект и напишите краткий отчет о том, что он собой представляет.
37. Стандартизация — это очень важный аспект развития сети. ITU и ISO — это ведущие организации, занимающиеся стандартизацией. Посетите их веб-сайты ([www.itu.org](http://www.itu.org) и [www.iso.org](http://www.iso.org)) и изучите, чем они занимаются. Напишите краткий отчет об областях стандартизации, в которых преуспели эти организации.
38. Интернет состоит из огромного числа сетей. Их взаимное расположение определяет топологию Интернета. Очень много информации на тему топологии Интернета можно найти на различных веб-сайтах. С помощью поисковых программ найдите соответствующую информацию и напишите краткий отчет по итогам исследования.

## Глава 2

# Физический уровень

- ◆ Теоретические основы передачи данных
- ◆ Управляемые носители информации
- ◆ Беспроводная связь
- ◆ Спутники связи
- ◆ Коммутируемая телефонная сеть общего пользования
- ◆ Мобильная телефонная система
- ◆ Кабельное телевидение
- ◆ Резюме
- ◆ Вопросы

В этой главе мы рассмотрим нижний уровень иерархии компьютерных сетей. Он определяет механические, электрические и временные характеристики сетей. Начнем с теоретического анализа передачи данных, чтобы с удивлением обнаружить, что природа накладывает определенные ограничения на то, что и как можно передавать с помощью физического носителя.

Затем мы обсудим три типа сред передачи — управляемую (медный провод и оптоволокно), радиоэфир (наземная радиосвязь) и радиоэфир, связанный со спутниковыми системами. Мы изучим основы ключевых технологий передачи данных, применяемых в современных сетях.

Оставшаяся часть главы посвящена трем примерам систем связи, которые используются на практике в глобальных сетях. Мы начнем с телефонной системы (стационарной); второй пример — мобильная телефонная система; третий — кабельное телевидение. Все они на уровне магистралей используют оптоволокно, но организованы по-разному, а по мере приближения к конечному пользователю в них применяются все более отличающиеся друг от друга технологии.

## Теоретические основы передачи данных

Информация может передаваться по проводам за счет изменения какой-либо физической величины, например напряжения или силы тока. Представив значение напряжения или силы тока в виде однозначной функции времени  $f(t)$ , мы сможем смоделировать поведение сигнала и подвергнуть его математическому анализу. Этому анализу и посвящены следующие разделы.

### Ряды Фурье

В начале XIX столетия французский математик Жан-Батист Фурье (Jean-Baptiste Fourier) доказал, что любая периодическая функция  $g(t)$  с периодом  $T$  может быть разложена в ряд (возможно, бесконечный), состоящий из сумм синусов и косинусов:

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft); \quad (2.1),$$

где  $f = 1/T$  — основная частота (гармоника),  $a_n$  и  $b_n$  — амплитуды синусов и косинусов  $n$ -й гармоник, а  $c$  — константа. Подобное разложение называется **рядом Фурье**. Разложенная в ряд Фурье функция может быть восстановлена по элементам этого ряда, то есть если период  $T$  и амплитуды гармоник известны, то исходная функция может быть восстановлена с помощью суммы ряда (2.1).

Информационный сигнал, имеющий конечную длительность (все информационные сигналы имеют конечную длительность), может быть разложен в ряд Фурье, если представить, что весь сигнал бесконечно повторяется снова и снова (то есть интервал от  $T$  до  $2T$  полностью повторяет интервал от 0 до  $T$ , и т. д.).

Амплитуды  $a_n$  могут быть вычислены для любой заданной функции  $g(t)$ . Для этого нужно умножить левую и правую стороны уравнения (2.1) на  $\sin(2\pi kft)$ , а затем проинтегрировать от 0 до  $T$ . Поскольку:

$$\int_0^T \sin(2\pi kft) \sin(2\pi nft) dt = \begin{cases} 0 & \text{при } k \neq n, \\ T/2 & \text{при } k = n, \end{cases}$$

остается только один член ряда:  $a_n$ . Ряд  $b_n$  исчезает полностью. Аналогично, умножая уравнение (2.1) на  $\cos(2\pi kft)$  и интегрируя по времени от 0 до  $T$ , мы можем вычислить значения  $b_n$ . Если проинтегрировать обе части уравнения, не изменяя его, то можно получить значение константы  $c$ . Результаты этих действий будут следующими:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi nft) dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi nft) dt, \quad c = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt.$$

### Сигналы с ограниченным спектром

Чтобы понять, какое отношение все вышеизложенное имеет к передаче данных, рассмотрим конкретный пример — передачу двоичного кода ASCII символа «b». Для этого потребуется 8 бит (то есть 1 байт). Задача — передать следующую после-



довательность бит: 01100010. На рис. 2.1, а слева изображена зависимость выходного напряжения от времени на передающем компьютере. В результате анализа Фурье для данного сигнала получаем следующие значения коэффициентов:

$$a_n = \frac{1}{\pi n} [\cos(\pi n/4) - \cos(3\pi n/4) + \cos(6\pi n/4) - \cos(7\pi n/4)];$$

$$b_n = \frac{1}{\pi n} [\sin(3\pi n/4) - \sin(\pi n/4) + \sin(7\pi n/4) - \sin(6\pi n/4)];$$

$$c = 3/4.$$

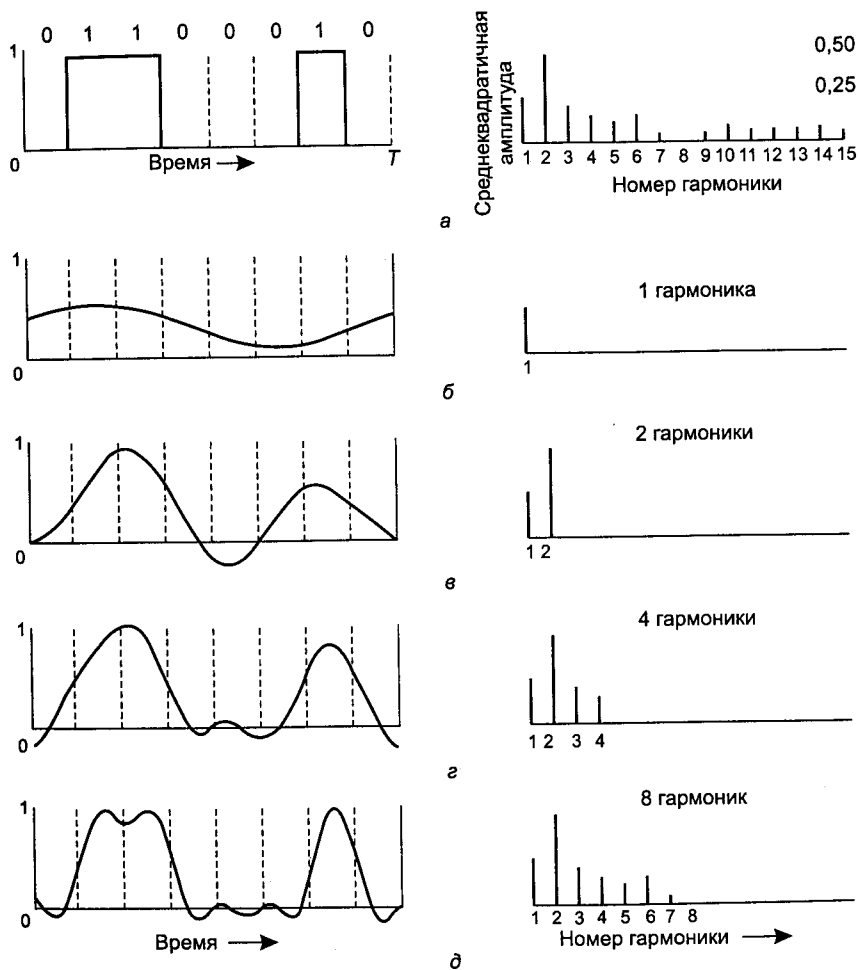


Рис. 2.1. Двоичный сигнал и его среднеквадратичные гармоники Фурье (а); последовательные приближения к оригинальному сигналу (б-д)

Среднеквадратичные амплитуды  $\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$  для нескольких первых гармоник показаны на рис. 2.1, а справа. Эти значения представляют интерес, поскольку

их квадраты пропорциональны энергии, передаваемой на соответствующей частоте.

Ни один канал связи не может передавать сигналы без потери мощности. Если бы все гармоники ряда Фурье уменьшались при передаче в равной степени, то сигнал уменьшался бы по амплитуде, но не искажался (то есть у него была бы та же самая замечательная прямоугольная форма, как на рис. 2.1, а). К сожалению, все каналы связи уменьшают гармоники ряда Фурье в разной степени, тем самым искажая передаваемый сигнал. Как правило, амплитуды передаются без уменьшения в частотном диапазоне от 0 до некоей частоты  $f_c$  (измеряемой в периодах в секунду или герцах (Гц)), при этом высокочастотная составляющая сигнала (выше частоты  $f_c$ , называемой *частотой среза*) заметно ослабляется. Этот диапазон частот называется **полосой пропускания**. На практике срез вовсе не является таким резким, поэтому обычно в упомянутую полосу пропускания включают те частоты, которые передаются с потерей мощности, не превышающей 50 %.

Полоса пропускания является физической характеристикой среды передачи данных и зависит обычно от конструкции, толщины и длины носителя. Иногда для намеренного уменьшения полосы пропускания, доступной абонентам, в линию включается специальное устройство — *фильтр*. Например, кабель, используемый в телефонии при небольших расстояниях, имеет полосу пропускания, равную 1 МГц, однако телефонные компании с помощью частотных фильтров урезают ее, предоставляя пользователям лишь 3100 Гц. Такой полосы, впрочем, вполне хватает для отчетливой передачи речи, зато за счет уменьшения расходовемых каждым абонентом ресурсов повышается общая эффективность системы.

Теперь посмотрим, как будет выглядеть сигнал, изображенный на рис. 2.1, а, если полоса пропускания канала будет такой, что через него будут проходить только самые низкие частоты (то есть функция  $g(t)$  будет аппроксимирована лишь несколькими первыми членами рядов уравнения (2.1)). На рис. 2.1, б показан сигнал на выходе канала, пропускающего лишь первую (основную,  $f$ ) гармонику сигнала. Аналогично, рис. 2.1, в-д показывают спектры и восстановленные сигналы для каналов с более широкой полосой пропускания.

При заданной скорости передачи в битах, равной  $b$  бит/с, время, требуемое для передачи, скажем, 8 бит, будет равно  $8/b$  секунд. Таким образом, частота первой гармоники равна  $b/8$  Гц. Обычная телефонная линия, часто называемая **речевым каналом**, имеет искусственно созданную частоту среза около 3000 Гц. Это ограничение означает, что номер самой высокой гармоники, прошедшей сквозь телефонный канал, примерно (срез не очень крутой) равен  $3000/(b/8)$  или  $24\,000/b$ .

Для некоторых скоростей передачи данных эти значения показаны в табл. 2.1. Из приведенных данных ясно, что попытка передать по речевому каналу данные на скорости 9600 бит/с превратит сигнал, показанный на рис. 2.1, а, в нечто подобное рис. 2.1, в, что сделает прием исходного потока битов с приемлемым качеством практически невозможным. Очевидно, что у сигналов, передаваемых со скоростью 38 400 бит/с и выше, нет никаких шансов пройти через речевой канал, даже при полном отсутствии помех на линии. Другими словами, ограничение по-

лосы пропускания частот канала ограничивает его пропускную способность для передачи двоичных данных, даже для идеальных каналов. Однако схемы, использующие несколько уровней напряжений, существуют и позволяют достичь более высоких скоростей передачи данных. Мы обсудим это далее в этой главе.

**Таблица 2.1.** Соотношение между скоростью передачи данных и числом гармоник

Скорость, бит/с	T, мс	1-я гармоника, Гц	Количество пропускаемых гармоник
300	26,67	37,5	80
600	13,33	75	40
1200	6,67	150	20
2400	3,33	300	10
4800	1,67	600	5
9600	0,83	1200	2
19 200	0,42	2400	1
38 400	0,21	4800	0

## Максимальная скорость передачи данных через канал

В 1924 году американский ученый Х. Найквист (H. Nyquist) из компании AT&T пришел к выводу, что существует некая предельная скорость передачи даже для идеальных каналов. Он вывел уравнение, позволяющее найти максимальную скорость передачи данных в бесшумном канале с ограниченной полосой пропускания частот. В 1948 году Клод Шеннон (Claude Shannon) продолжил работу Найквиста и расширил ее для случая канала со случайным (то есть термодинамическим) шумом. Мы кратко рассмотрим результаты работы Найквиста и Шеннона, ставшие сегодня классическими.

Найквист доказал, что если произвольный сигнал прошел через низкочастотный фильтр с полосой пропускания  $H$ , то такой отфильтрованный сигнал может быть полностью восстановлен по дискретным значениям этого сигнала, измеренным с частотой  $2H$  в секунду. Производить измерения сигнала чаще, чем  $2H$  в секунду, нет смысла, так как более высокочастотные компоненты сигнала были отфильтрованы. Если сигнал состоит из  $V$  дискретных уровней, то уравнение Найквиста будет выглядеть так:

$$\text{максимальная скорость передачи данных} = 2H \log_2 V, \text{ бит/с}$$

Так, например, бесшумный канал с частотой пропускания в 3 кГц не может передавать двоичные (то есть двухуровневые) сигналы на скорости, превосходящей 6000 Кбит/с.

Итак, мы рассмотрели случай бесшумных каналов. При наличии в канале случайного шума ситуация резко ухудшается. Уровень термодинамического шума в канале измеряется отношением мощности сигнала к мощности шума и называется отношением сигнал/шум. Если обозначить мощность сигнала  $S$ , а мощность

шума —  $N$ , то отношение сигнал/шум будет равно  $S/N$ . Обычно сама величина отношения не употребляется. Вместо нее используется ее десятичный логарифм, умноженный на 10:  $10 \lg S/N$ . Такая единица называется **децибелом** (decibel, dB, дБ). Таким образом, если отношение сигнал/шум 10, это соответствует 10 дБ, отношение 100 равно 20 дБ, отношение 1000 равно 30 дБ и т. д. Производители стереоусилителей часто указывают полосу частот (частотный диапазон), в котором их аппаратура имеет линейную амплитудно-частотную характеристику в пределах 3 дБ. Отклонение в 3 дБ соответствует ослаблению сигнала примерно в два раза (потому что  $\log_{10} 3 \approx 0,5$ ).

Главным результатом, который получил Шеннон, было утверждение о том, что максимальная скорость передачи данных в канале с полосой частот  $H$  Гц и отношением сигнал/шум, равным  $S/N$ , можно вычислить по формуле

$$\text{максимальная скорость передачи данных} = H \log_2(1+S/N).$$

Например, канал с частотной полосой пропускания в 3000 Гц и отношением мощностей сигнала и термального шума в 30 дБ (обычные параметры для аналоговой части телефонной системы) никогда не сможет передавать более 30 000 бит/с, независимо от способа модуляции сигнала, то есть количества используемых уровней сигнала, частоты дискретизации и т. д. Результат, полученный Шенноном и подкрепленный постулатами теории информации, применим к любому каналу с гауссовским (термальным) шумом. Попытки доказать обратное следует считать обреченными не провал. Однако следует заметить, что данная теорема описывает верхний, теоретический предел пропускной способности информационного канала, и реальные системы редко достигают его.

## Управляемые носители информации

Назначением физического уровня сети является передача необработанного потока битов от одной машины к другой. Для передачи могут использоваться различные физические носители информации, называемые также средой распространения сигнала. Каждый из них имеет характерный набор полос пропускания, задержек, цен и простоты установки и использования. Носители можно разделить на две группы: управляемые носители, такие как медный провод и оптоволоконный кабель, и неуправляемые, например радиосвязь и передача по лазерному лучу без кабеля. Мы рассмотрим их в следующих разделах.

## Магнитные носители

Один из самых простых способов перенести данные с одного компьютера на другой — записать их на магнитную ленту или другой съемный носитель (например, перезаписываемый DVD), физически перенести эти ленты и диски к пункту назначения и там прочитать их. Поскольку такой метод значительно проще применения, скажем, геостационарного спутника связи, он часто оказывается гораздо более эффективным в экономическом отношении, особенно для приложений,

в которых высокая пропускная способность или цена за бит являются ключевыми факторами.

Разобраться в данном вопросе нам помогут несложные вычисления. Стандартная кассета с лентой Ultrium вмещает 200 Гбайт. В коробку размером 60×60×60 помещается около 1000 таких кассет, что дает общую емкость 1600 Тбит (1,6 Пбит). Коробка с кассетами может быть доставлена в пределах США в течение 24 часов службой Federal Express или другой компанией. Эффективная полоса пропускания при такой передаче составляет 1600 Тбит/86 400 с, или 19 Гбит/с. Если же пункт назначения находится всего в часе езды, то пропускная способность составит свыше 400 Гбит/с. Ни одна компьютерная сеть пока не в состоянии даже приблизиться к таким показателям.

Если представить себе банк данных на много гигабайт, который должен ежедневно архивировать данные на запасном компьютере (чтобы иметь возможность продолжать работу даже в случае сильного наводнения или землетрясения), то похоже, что никакая технология передачи данных пока и не начала приближаться к производительности магнитных лент.

Если мы теперь взглянем на этот вопрос с экономической точки зрения, то получим сходную картину. Оптовая цена кассеты составляет около \$40. Коробка с лентами обойдется в \$4000, при этом одну и ту же ленту можно использовать десятки раз. Прибавим \$1000 на перевозку (а на самом деле, гораздо меньше) и получим около \$5000 за передачу 200 Тбайт или 3 цента за гигабайт. Ни одна сеть на земле не может соперничать с этим. Мораль этой истории такова:

*Не думай свысока о скорости передачи данных автомобилем, полным кассет, с грохотом передвигающимся по дороге.*

## Витая пара

Хотя скорость передачи данных с помощью магнитных лент отличная, однако величина задержки при такой передаче очень велика. Время передачи измеряется минутами или часами, а не миллисекундами. Для многих приложений требуется мгновенная реакция удаленной системы (в подключенном режиме). Одним из первых и до сих пор часто применяемых средств передачи является **витая пара**. Этот носитель состоит из двух изолированных медных проводов, обычный диаметр которых составляет 1 мм. Провода свиваются один вокруг другого в виде спирали, чем-то напоминая молекулу ДНК. Это позволяет уменьшить электромагнитное взаимодействие нескольких расположенных рядом витых пар. (Два параллельных провода образуют простейшую антенну, витая пара — нет.)

Самым распространенным применением витой пары является телефонная линия. Почти все телефоны соединяются с телефонными компаниями при помощи этого носителя. Витая пара может передавать сигнал без ослабления мощности на расстояние, составляющее несколько километров. На более дальних расстояниях требуются повторители. Большое количество витых пар, тянущихся на большое расстояние в одном направлении, объединяются в кабель, на который надевается защитное покрытие. Если бы пары проводов, находящиеся внутри таких кабелей, не были свиты, то сигналы, проходящие по ним, накладывались бы друг

на друга. Телефонные кабели диаметром несколько сантиметров можно видеть протянутыми на столбах.

Витые пары могут использоваться для передачи как аналоговых, так и цифровых данных. Полоса пропускания зависит от диаметра и длины провода, но в большинстве случаев на расстоянии до нескольких километров может быть достигнута скорость несколько мегабит в секунду. Благодаря довольно высокой пропускной способности и небольшой цене витые пары широко распространены и, скорее всего, будут популярны и в будущем.

Витые пары применяются в нескольких вариантах, два из которых особенно важны в области компьютерных сетей. Витые пары **категории 3** состоят из двух изолированных проводов, свитых друг с другом. Четыре такие пары обычно помещаются вместе в пластиковую оболочку. До 1988 года большинство офисных зданий были оснащены кабелями третьей категории, тянущимися из кабельного центра на каждом этаже в отдельные офисы. Подобная схема позволяла соединять до четырех обычных телефонов или по два многоканальных телефона в каждом офисе с оборудованием телефонной компании, установленном в **кабельном центре**.

Начиная с 1988 года в офисах стали использоваться более новые витые пары **категории 5**. Они похожи на витые пары третьей категории, но имеют большее число витков на сантиметр длины проводов. Это позволяет еще сильнее уменьшить наводки между различными каналами и обеспечить улучшенное качество передачи сигнала на большие расстояния. Витые пары категории 5 более приемлемы для высокоскоростной компьютерной связи. Вскоре, вероятно, появятся кабели категорий 6 и 7, способные передавать сигнал с полосой пропускания соответственно 250 и 600 МГц (сравните с полосами в 16 и 100 МГц для категорий 3 и 5).

Все эти типы соединений часто называются **UTP** (unshielded twisted pair — неэкранированная витая пара), в противоположность громоздким дорогим экранированным кабелям из витых пар корпорации IBM, которые она представила на рынке в 1980 году, но которые так и не стали популярными за пределами фирмы IBM. Разные типы UTP схематично изображены на рис. 2.2.



Рис. 2.2. UTP категории 3 (а); UTP категории 5 (б)

## Коаксиальный кабель

Другим распространенным средством передачи данных является **коаксиальный кабель**. Он лучше экранирован, чем витая пара, поэтому может обеспечить передачу данных на более дальние расстояния с более высокими скоростями. Широко применяются два типа кабелей. Один из них, 50-омный, обычно используется для передачи исключительно цифровых данных. Другой тип кабеля, 75-омный,

часто применяется для передачи аналоговой информации, а также в кабельном телевидении. В основе такого разделения лежат скорее исторические, нежели технические факторы (например, первые дипольные антенны имели импеданс 300 Ом, и проще всего было использовать уже существующие преобразователи с отношением импеданса 4:1).

Коаксиальный кабель состоит из покрытого изоляцией твердого медного провода, расположенного в центре кабеля. Поверх изоляции натянута цилиндрический проводник, обычно выполненный в виде мелкой медной сетки. Он покрыт наружным защитным слоем изоляции (пластиковой оболочкой). Вид кабеля в разрезе показан на рис. 2.3.

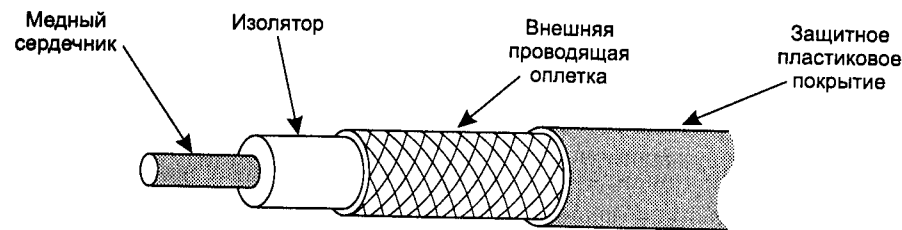


Рис. 2.3. Коаксиальный кабель

Конструкция и специальный тип экранирования коаксиального кабеля обеспечивают высокую пропускную способность и отличную помехозащищенность. Максимальная пропускная способность зависит от качества, длины и соотношения сигнал/шум линии. Современные кабели имеют полосу пропускания около 1 ГГц. Коаксиальные кабели широко применялись в телефонных системах, но теперь на линиях большой протяженности их все чаще заменяют оптоволоконными кабелями. Однако коаксиальные кабели все еще широко используются для кабельного телевидения, а также в некоторых региональных сетях.

## Волоконная оптика

Быстрое развитие компьютерных технологий вызывает чувство гордости у многих представителей этой индустрии. Первый персональный компьютер фирмы IBM, созданный в 1981 году, работал с тактовой частотой 4,77 МГц. Спустя 20 лет этот показатель вырос до 2 ГГц. Прирост множителя составил 20 за декаду. Не так уж плохо.

За тот же период скорость передачи данных выросла с 56 Кбит/с (ARPANET) до 1 Гбит/с (современная оптическая связь), это означает рост в 125 раз за каждые 10 лет. При этом вероятность ошибки при передаче уменьшилась с  $10^{-5}$  на бит почти до нуля.

В настоящее время процессоры начинают приближаться к своим физическим пределам. Скорость света преодолеть невозможно, непросто решить и проблему отвода тепловой энергии. Существующая ныне оптоволоконная технология, напротив, может развивать скорость передачи данных вплоть до 50 000 Гбит/с (50 Тбит/с), и при этом много специалистов занято поиском более совершенных

материалов. Сегодняшний практический предел в 10 Гбит/с обусловлен нашей неспособностью быстрее преобразовывать электрические сигналы в оптические и обратно, хотя в лабораторных условиях уже достигнута скорость 100 Гбит/с на одинарном волокне.

В гонке компьютеров и средств связи победили последние. Мысль о практически бесконечной полосе пропускания (при ненулевой стоимости, разумеется) еще не усвоена до конца поколением ученых-компьютерщиков, приученных мыслить в категориях низких ограничений Найквиста и Шеннона, накладываемых на медный провод. Новая точка зрения должна заключаться в том, что все компьютеры безнадежно медленны, и сетям следует любой ценой избегать вычислений независимо от того, какая часть полосы пропускания при этом будет потеряна. В данном разделе мы рассмотрим технологию передачи данных по оптическому волокну.

Оптоволоконная система передачи данных состоит из трех основных компонентов: источника света, носителя, по которому распространяется световой сигнал, и приемника сигнала, или детектора. Световой импульс принимают за единицу, а отсутствие импульса — за ноль. Свет распространяется в сверхтонком стеклянном волокне. При попадании на него света детектор генерирует электрический импульс. Присоединив к одному концу оптического волокна источник света, а к другому — детектор, мы получим однонаправленную систему передачи данных. Система принимает электрические сигналы и преобразует их в световые импульсы, передающиеся по волокну. На другой стороне происходит обратное преобразование в электрические сигналы.

Такая передающая система была бы бесполезна, если бы свет по дороге рассеивался и терял свою мощность. Однако в данном случае используется один интересный физический закон. Когда луч света переходит из одной среды в другую, например, из стекла (расплавленного и застывшего кварца) в воздух, луч отклоняется (эффект рефракции или преломления) на границе «стекло—воздух», как показано на рис. 2.4, а. Здесь мы видим, что луч света падает под углом  $\alpha_1$ , выходя под углом  $\beta_1$ . Соотношение углов падения и отражения зависит от свойств смежных сред (в частности, от их коэффициентов преломления). Если угол падения превосходит некоторую критическую величину, луч света целиком отражается обратно в стекло, а в воздух ничего не проходит. Таким образом, луч света, падающий на границу сред под углом, превышающим критический, оказывается запертым внутри волокна, как показано на рис. 2.4, б, и может быть передан на большое расстояние почти без потерь.

На рис. 2.4, б показан только один пойманный луч света, однако поскольку любой луч света с углом падения, превышающим критический, будет отражаться от стенок волокна, то и множество лучей будет одновременно отражаться под различными углами. Про каждый луч говорят, что он обладает некоторой **модой**, а оптическое волокно, обладающее свойством передавать сразу несколько лучей, называется **многомодовым**. Однако если уменьшить диаметр волокна до нескольких длин волн света, то волокно начинает действовать подобно волноводу, и свет может двигаться только по прямой линии, без отражений от стенок волокна. Такое волокно называется **одномодовым**. Оно стоит дороже, но может использо-

ваться при передаче данных на большие расстояния. Сегодняшние одномодовые волоконные линии могут работать со скоростью 50 Гбит/с на расстоянии до 100 км. В лабораториях были достигнуты и более высокие скорости, правда, на меньших дистанциях.

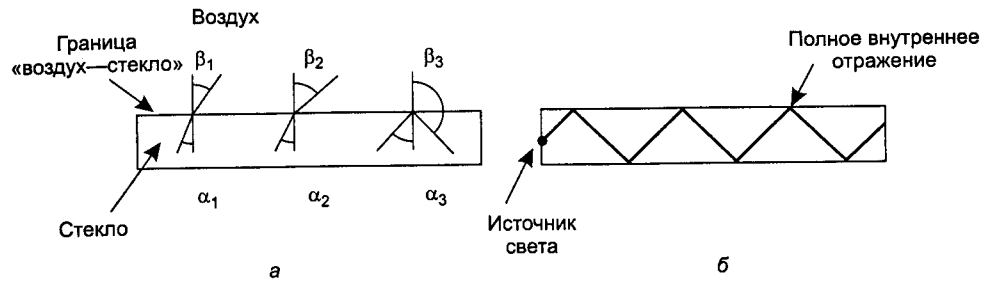


Рис. 2.4. Три примера преломления луча света, падающего под разными углами, на границе кварцевого волокна и воздуха (а); луч света, пойманный полным внутренним отражением (б)

## Прохождение света по волокну

Оптическое волокно изготавливается из стекла, которое, в свою очередь, производится из песка — недорогого необработанного материала, доступного в неограниченных количествах. Изготовление стекла было известно уже в Древнем Египте, однако, чтобы свет мог проникнуть сквозь стекло, его толщина не должна превышать 1 мм, чего в то время было невозможно достичь. Стекло, достаточно прозрачное, чтобы его можно было использовать в окнах зданий, было изобретено в эпоху Возрождения. Для современных оптических кабелей применяется настолько прозрачное стекло, что если бы океаны вместо воды состояли из него, то дно океана было бы так же ясно видно, как поверхность суши с борта самолета в ясный день.

Ослабление силы света при прохождении через стекло зависит от длины волны. Для стекла, используемого в оптическом волокне, зависимость ослабления от длины волны в децибелах на километр длины волокна показана на рис. 2.5. Ослабление в децибелах вычисляется по формуле

$$\text{Ослабление в децибелах} = 10 \lg \frac{\text{передаваемая мощность}}{\text{принимаемая мощность}}$$

Например, ослаблению мощности в два раза соответствует на графике  $10 \lg 2 = 3$  дБ. На графике изображена ближняя инфракрасная часть спектра, используемая на практике. Видимый свет имеет несколько более короткие длины волн — от 0,4 до 0,7 мкм (1 мкм равен  $10^{-6}$  м).

В системах связи используются три диапазона длин волн: 0,85, 1,30 и 1,55 мкм соответственно. Последние два обладают хорошими характеристиками ослабления (менее 5 % потерь на километр). Диапазон 0,85 мкм обладает более высоким ослаблением, однако его преимуществом является то, что для этой длины волны лазеры и электроника могут быть сделаны из одного и того же материала (арсе-

нида галлия). Все три диапазона обладают полосой пропускания от 25 000 до 30 000 ГГц.

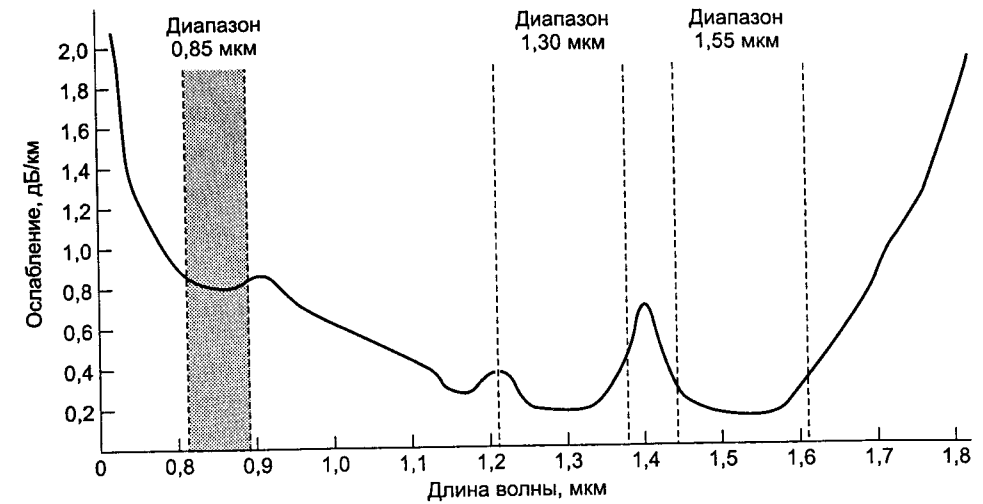


Рис. 2.5. Ослабление света в инфракрасной области спектра при прохождении через оптическое волокно

Световые импульсы удлиняются по мере их продвижения по волокну. Это удлинение называется **световой дисперсией**. Величина удлинения зависит от длины волны. Чтобы не допустить перекрывания соседних расширяющихся импульсов, можно увеличить расстояние между ними, однако при этом придется уменьшить скорость передачи. К счастью, было обнаружено, что эффект дисперсии можно предотвратить, если придавать импульсам специальную форму, а именно обратной величины от гиперболического косинуса. В этом случае будет возможно посылать импульсы на тысячи километров без искажения формы. Такие импульсы называются **удиненными волнами**. Значительная часть исследователей намерена перейти от лабораторных исследований уединенных волн к их промышленному использованию.

## Оптоволоконные кабели

Структура оптоволоконного кабеля схожа с описанной ранее структурой коаксиального провода. Разница состоит лишь в том, что в первом нет экранирующей сетки. На рис. 2.6, а показана отдельная оптоволоконная жила. В центре ее располагается стеклянная сердцевина, по которой распространяется свет. В многомодовом оптоволокне диаметр сердечника составляет 50 мкм, что примерно равно толщине человеческого волоса. Сердечник в одномодовом волокне имеет диаметр от 8 до 10 мкм.

Сердечник покрыт слоем стекла с более низким, чем у сердечника, коэффициентом преломления. Он предназначен для более надежного предотвращения выхода света за пределы сердечника. Внешним слоем служит пластиковая оболочка,

защищающая остекление. Оптоволоконные жилы обычно группируются в пучки, защищенные внешней оболочкой. На рис. 2.6, б показан трехжильный кабель.

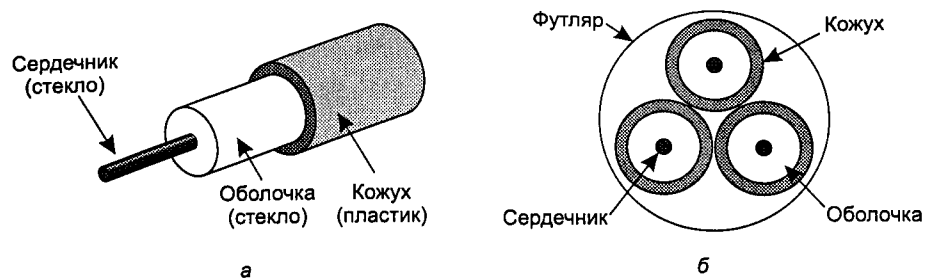


Рис. 2.6. Вид одиночного волокна сбоку (а); поперечное сечение трехжильного кабеля (б)

Обычно кабели кладутся в грунт на глубину около 1 м, где их могут случайно повредить грызуны или экскаватор. У побережья трансокеанические кабели укладываются в траншеи специальным механизмом. На большой глубине их обычно просто кладут на дно, где их могут зацепить рыболовные траулеры или перегрызть акулы.

Соединение отрезков кабеля может осуществляться тремя способами. Во-первых, на конец кабеля может прикрепляться специальный разъем, с помощью которого кабель вставляется в оптическую розетку. Подобное соединение приводит к потере 10–20 % силы света, зато оно позволяет легко изменить конфигурацию системы.

Во-вторых, они могут механически сращиваться — два аккуратно отрезанных конца кабеля укладываются рядом друг с другом и зажимаются специальной муфтой. Улучшение прохождения света достигается выравниванием концов кабеля. При этом через соединение пропускается свет, и задачей является добиться максимального соответствия мощности выходного сигнала мощности входного. Одно механическое сращивание кабелей занимает у опытного монтажника сетей около 5 минут и дает в результате потерю 10 % мощности света.

В-третьих, два куска кабеля могут быть сплавлены вместе. Сплавное соединение почти так же хорошо, как и сплошной кабель, но даже при таком методе происходит небольшое уменьшение мощности света.

Во всех трех типах соединений в точке соединения могут возникнуть отражения, и отраженный свет может интерферировать с сигналом.

Для передачи сигнала по оптоволоконному кабелю могут использоваться два типа источника света: светоизлучающие диоды (LED, Light Emitting Diode) и полупроводниковые лазеры. Они обладают различными свойствами, как показано в табл. 2.2. Их длина волны может быть настроена при помощи интерферометров Фабри—Перо (Fabry—Perot) или Маха—Цандера (Mach—Zehnder), устанавливаемых между источником и кабелем. Интерферометры Фабри—Перо представляют собой простые резонансные углубления, состоящие из двух параллельных зеркал. Свет падает перпендикулярно зеркалам, углубление отбирает те длины волн, которые укладываются в его размер целое число раз. Интерферометры Ма-

ха—Цандера разделяют свет на два луча, которые проходят различное расстояние и снова соединяются на выходе. Синфазными на выходе интерферометра окажутся лучи строго определенной длины.

Таблица 2.2. Сравнительные характеристики светодиодов и полупроводниковых лазеров

Характеристика	Светодиод	Полупроводниковый лазер
Скорость передачи данных	Низкая	Высокая
Тип волокна	Многомодовые	Многомодовые или одномодовые
Расстояние	Короткое	Дальнее
Срок службы	Долгий	Короткий
Чувствительность к температуре	Невысокая	Значительная
Цена	Низкая	Высокая

Приемный конец оптического кабеля представляет собой фотодиод, генерирующий электрический импульс, когда на него падает свет. Обычное время срабатывания фотодиода — около 1 нс, что ограничивает скорость передачи данных 1 Гбит/с. Термальный шум также имеет место, поэтому импульс света должен быть довольно мощным, чтобы его можно было обнаружить на фоне шума. При достаточной мощности импульса можно добиться пренебрежимо малой частоты ошибок.

## Оптоволоконные сети

Волоконная оптика может использоваться как для междугородной связи, так и для локальных сетей, хотя ее установка значительно сложнее, чем подключение к Ethernet. Одним из вариантов соединений оптических кабелей в локальную сеть является кольцо, которое можно рассматривать как набор соединений «точка—точка», как показано на рис. 2.7. Интерфейс каждого компьютера пропускает свет далее по кольцу, а также служит Т-образным соединением, позволяющим данному компьютеру принимать и передавать сообщения.

Применяются два типа интерфейсов. Пассивный интерфейс состоит из двух ответвлений, вплавленных в основной кабель. На конце одного ответвления устанавливается светодиод или лазерный диод (для передачи), а на другом конце размещается принимающий фотодиод. Само разветвление является абсолютно пассивным элементом и поэтому в высшей степени надежным, поскольку поломка светодиода или фотодиода не приводит к разрыву кольца. Отрезанным от сети в этом случае окажется только один компьютер.

Другим типом интерфейса, показанным на рис. 2.7, является **активный повторитель**. Входящий световой импульс преобразуется в нем в электрический сигнал, усиливается при необходимости до требуемого уровня и снова пересылается в виде светового пучка. Интерфейс с компьютером представляет собой обыкновенный медный провод, соединяющий его с регенератором сигнала. Чисто оптические повторители сейчас тоже используются. Такие устройства не требуют преобразования света в электрический сигнал и обратно, поэтому они могут работать на очень больших скоростях.

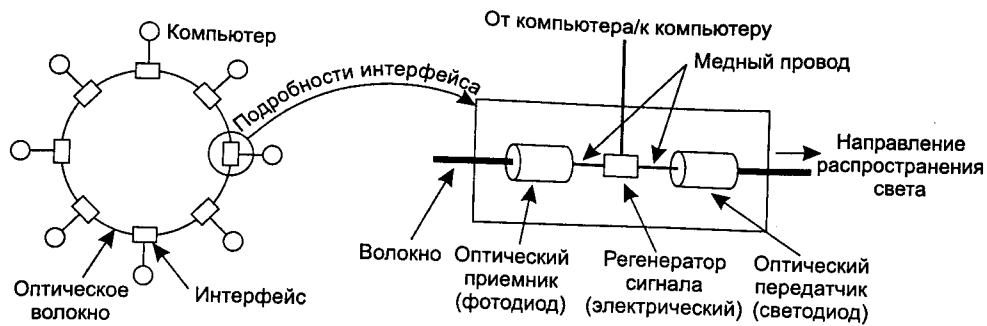


Рис. 2.7. Оптоволоконное кольцо с активными повторителями

При поломке активного повторителя кольцо разрывается и вся сеть перестает работать. С другой стороны, поскольку сигнал регенерируется каждым интерфейсом, соединения между компьютерами могут быть многокилометровой длины, что позволяет строить кольцо сколь угодно большой величины. Пассивный интерфейс ослабляет сигнал внутри каждого соединения, что сильно ограничивает количество компьютеров и размер кольца.

Кольцевая топология не является единственно возможной схемой построения локальной сети с использованием оптических кабелей. Построив сеть с топологией **пассивной звезды**, можно реализовать широковещание на основе оптоволоконных кабелей, как показано на рис. 2.8. В подобной конструкции каждый интерфейс состоит из оптического волокна, соединяющего передатчики с одним торцом стеклянного цилиндра, тогда как к другому торцу цилиндра присоединяются приемные оптические кабели. Таким образом, свет, испускаемый одним передатчиком, видит

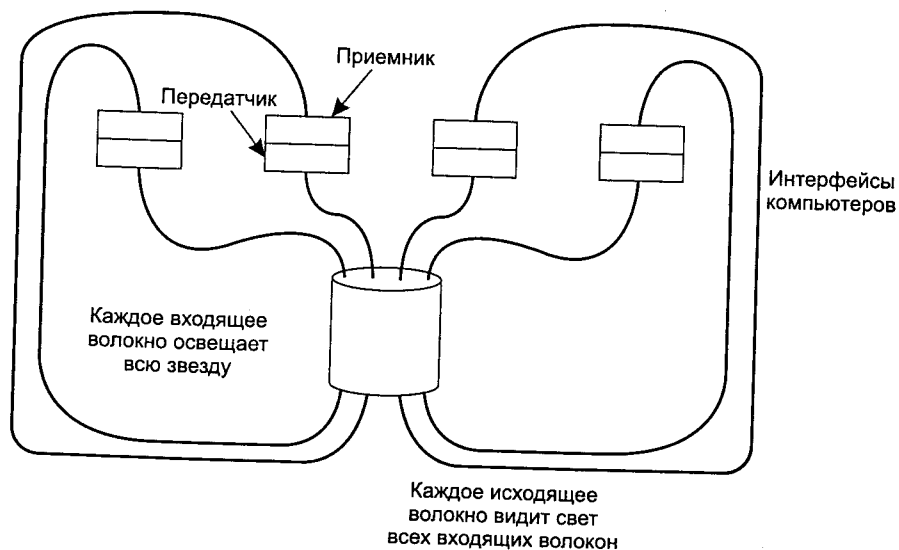


Рис. 2.8. Соединение типа «пассивная звезда» в оптоволоконных сетях

сразу все приемники. Именно так организуется широковещание. Поскольку энергия светового пучка разделяется в цилиндре между выходными линиями, количество узлов в подобной сети ограничивается чувствительностью фотодиодов.

## Сравнение характеристик оптического волокна и медного провода

Сравнение характеристик оптического волокна и медного провода весьма поучительно. Оптическое волокно обладает рядом преимуществ. Во-первых, оно обеспечивает значительно более высокие скорости передачи, чем медный провод. Уже благодаря этому именно оптическое волокно должно применяться в высококачественных профессиональных сетях. Благодаря низкому коэффициенту ослабления, повторители для оптоволоконной связи требуются лишь через каждые 50 км, по сравнению с 5 км для медных проводов, что существенно снижает затраты для линий дальней связи. Преимуществом оптического волокна также является его толерантность по отношению к внешним электромагнитным возмущениям. Оно не подвержено коррозии, поскольку стекло является химически нейтральным. Это делает оптоволокно идеальным для применения на химических предприятиях.

Это может показаться странным, но телефонные компании любят оптическое волокно еще по одной причине: оно тонкое и легкое. Многие каналы для кабелей заполнены до отказа, так что новый кабель некуда положить. Если вынуть из такого канала все медные кабели и заменить их оптическими, то останется еще много свободного места, а медь можно очень выгодно продать скупщикам цветного металла. Кроме того, оптический кабель значительно легче медного. Тысяча медных витых пар длиной в 1 км весит около 8000 кг. Пара оптоволоконных кабелей весит всего 100 кг при гораздо большей пропускной способности, что значительно снижает затраты на дорогие механические системы. При прокладке новых маршрутов оптоволоконные кабели выигрывают у медных благодаря гораздо более низким затратам на их прокладку.

Наконец, оптоволоконные кабели не теряют свет, и к ним довольно сложно подключиться, что способствует их надежности и сохранности.

Отрицательной стороной оптоволоконной технологии является то, что для работы с ней требуются определенные навыки, которые имеются далеко не у всех инженеров. Кабель довольно хрупкий и ломается в местах сильных изгибов. Кроме того, поскольку оптическая передача данных является строго однонаправленной, для двухсторонней связи требуется либо два кабеля, либо две частотные полосы в одном кабеле. Наконец, оптический интерфейс стоит дороже электрического. Тем не менее очевидно, что будущее цифровой связи на расстояниях более нескольких метров — за волоконной оптикой. Подробнее обо всех аспектах оптоволоконных сетей см. (Necht, 2001).

## Беспроводная связь

В наше время появляется все большее количество информационных «наркоманов» — людей с потребностью постоянно находиться в подключенном режиме (on-line). Таким пользователям никакие кабельные соединения, будь то витая пара, коаксиальный кабель или оптическое волокно, не подходят. Им требуются по-

лучать данные непосредственно на переносные компьютеры, лэптопы, ноутбуки, электронные записные книжки, карманные компьютеры, палмтопы и компьютеры, встроенные в наручные часы. Короче говоря, они предпочитают пользоваться устройствами, не привязанными к наземным инфраструктурам. Для таких пользователей беспроводная связь является необходимостью. В данном разделе мы познакомимся с основами беспроводной связи, поскольку у нее есть ряд других важных применений, кроме предоставления доступа в Интернет желающим побродить по нему, лежа на пляже.

Существует мнение, что в будущем останется только два типа связи — оптоволоконная и беспроводная. Все стационарные (то есть не переносные) компьютеры, телефоны, факсы и т. д. будут соединяться оптоволоконными кабелями, а все переносные — с помощью беспроводной связи.

При некоторых обстоятельствах беспроводная связь может иметь свои преимущества и для стационарных устройств. Например, если прокладка оптоволоконного кабеля осложнена природными условиями (горы, джунгли, болота и т. д.), то беспроводная связь может оказаться предпочтительнее. Следует отметить, что современная беспроводная связь зародилась на Гавайских островах, где людей разделяли большие пространства Тихого океана и обычная телефонная система оказалась неприменима.

## Электромагнитный спектр

Движение электронов порождает электромагнитные волны, которые могут распространяться в пространстве (даже в вакууме). Это явление было предсказано британским физиком Джеймсом Клерком Максвеллом (James Clerk Maxwell) в 1865 году. Первый эксперимент, при котором их можно было наблюдать, поставил немецкий физик Генрих Герц (Heinrich Hertz) в 1887 году. Число колебаний электромагнитных колебаний в секунду называется **частотой**,  $f$ , и измеряется в герцах (в честь Генриха Герца). Расстояние между двумя последовательными максимумами (или минимумами) называется **длиной волны**. Эта величина традиционно обозначается греческой буквой  $\lambda$  (лямбда).

Если в электрическую цепь включить антенну подходящего размера, то электромагнитные волны можно с успехом принимать приемником на некотором расстоянии. На этом принципе основаны все беспроводные системы связи.

В вакууме все электромагнитные волны распространяются с одной и той же скоростью, независимо от их частоты. Эта скорость называется **скоростью света**,  $c$ . Ее значение приблизительно равно  $3 \cdot 10^8$  м/с, или около одного фута (30 см) за наносекунду. (Можно было бы переопределить, воспользовавшись таким совпадением, *фут*, постановив, что он равен расстоянию, которое проходит электромагнитная волна в вакууме за 1 нс. Это было бы логичнее, чем измерять длины размер сапога какого-то давно умершего короля.) В меди или стекле скорость света составляет примерно 2/3 от этой величины, кроме того, слегка зависит от частоты. Скорость света современная наука считает верхним пределом скоростей. Быстрее не может двигаться никакой объект или сигнал.

Величины  $f$ ,  $\lambda$  и  $c$  (в вакууме) связаны фундаментальным соотношением

$$\lambda f = c. \quad (2.2)$$

Поскольку  $c$  является константой, то, зная  $f$ , мы можем определить  $\lambda$ , и наоборот. Существует мнемоническое правило, которое гласит, что  $\lambda f \approx 300$ , если  $\lambda$  измеряется в метрах, а  $f$  — в мегагерцах. Например, волны с частотой 100 МГц имеют длину волны около 3 м, 1000 МГц соответствует 0,3 м, а длине волны 0,1 м соответствует частота 3000 МГц.

На рис. 2.9 изображен электромагнитный спектр. Радио, микроволновый, инфракрасный диапазоны, а также видимый свет могут быть использованы для передачи информации с помощью амплитудной, частотной или фазовой модуляции волн. Ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучения были бы даже лучше благодаря их высоким частотам, однако их сложно генерировать и модулировать, они плохо проходят сквозь здания и, кроме того, они опасны для всего живого. Диапазоны, перечисленные в нижней части рис. 2.9, представляют собой официальные названия ИТУ, основанные на длинах волн. Так, например, низкочастотный диапазон (LF, Low Frequency) охватывает длины волн от 1 км до 10 км (что приблизительно соответствует диапазону частот от 30 кГц до 300 кГц). Сокращения LF, MF и HF обозначают Low Frequency (низкая частота), Medium Frequency (средняя частота) и High Frequency (высокая частота) соответственно. Очевидно, при назначении диапазонам названий никто не предполагал, что будут использоваться частоты выше 10 МГц, поэтому более высокие диапазоны получили названия VHF (very high frequency — очень высокая частота), UHF (ultrahigh frequency — ультравысокая частота, УВЧ), SHF (superhigh frequency — сверхвысокая частота, СВЧ), EHF (Extremely High Frequency — чрезвычайно высокая частота) и THF (Tremendously High Frequency — ужасно высокая частота). Выше последнего диапазона имена пока не придуманы, но если следовать традиции, появятся диапазоны Невероятно (Incredibly), Поразительно (Astonishingly) и Чудовищно (Prodigiously) высоких частот (ITF, ATF и PTF).

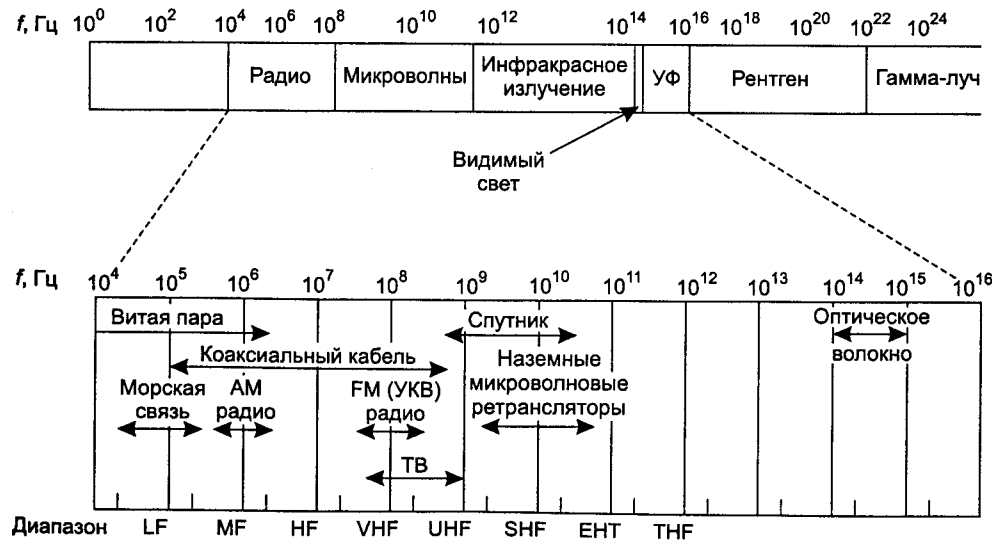


Рис. 2.9. Электромагнитный спектр и его применение в связи



Свойства радиоволн зависят от частоты. При работе на низких частотах радиоволны хорошо проходят сквозь препятствия, однако мощность сигнала в воздухе резко падает по мере удаления от передатчика. Соотношение мощности и удаленности от источника выражается примерно так:  $1/r^2$ . На высоких частотах радиоволны вообще имеют тенденцию распространяться исключительно по прямой линии и отражаться от препятствий. Кроме того, они поглощаются, например, дождем. Радиосигналы любых частот подвержены помехам со стороны двигателей с искрящими щетками и другого электрического оборудования.

Благодаря способности радиоволн распространяться на большие расстояния взаимные помехи, вызываемые одновременно работающими пользователями, представляют собой серьезную проблему. Поэтому все государства ведут очень строгий учет владельцев радиопередатчиков, за одним исключением (обсуждаемым далее).

В диапазонах VLF радиоволны LF и MF распространяются вдоль поверхности земли, как показано на рис. 2.10, а. Эти волны можно поймать радиоприемником на расстоянии около 1000 км, если используются низкие частоты, и на несколько меньших расстояниях, если частоты повыше. Радиовещание с амплитудной модуляцией (AM) использует диапазон средних волн (MF), по этой причине, например, передачи Бостонской средневолновой радиостанции не слышны в Нью-Йорке. Радиоволны этих диапазонов легко проникают сквозь здания, вследствие чего переносные радиоприемники работают и в помещениях. Основным препятствием для использования этих диапазонов для передачи данных является их относительно низкая пропускная способность (см. уравнение (2-3)).

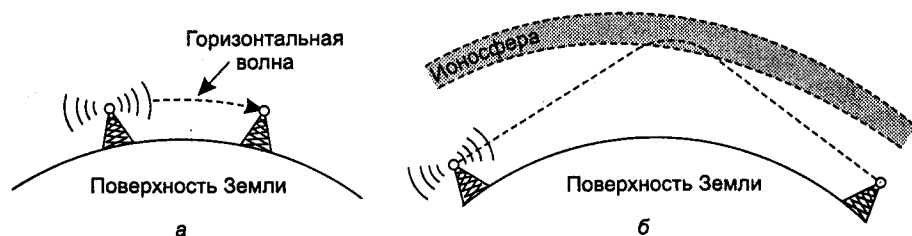


Рис. 2.10. Волны диапазонов VLF, LF и MF огибают неровности поверхности Земли (а); волны диапазона HF отражаются от ионосферы (б)

Радиоволны диапазонов HF и VHF поглощаются землей. Однако те из них, которые доходят до ионосферы, представляющей собой слой заряженных частиц, расположенный на высоте от 100 до 500 км, отражаются ею и посылаются обратно к поверхности Земли, как показано на рис. 2.10, б. При определенных атмосферных условиях сигнал может отразиться несколько раз. Радиохобби используют такие диапазоны частот для дальней связи. Военные также осуществляют связь в диапазонах HF и VHF.

## Связь в микроволновом диапазоне

На частотах выше 100 МГц радиоволны распространяются почти по прямой, поэтому могут быть сфокусированы в узкие пучки. Концентрация энергии в виде узкого пучка при помощи параболической антенны (вроде всем известной спут-

никовой телевизионной тарелки) приводит к улучшению соотношения сигнал/шум, однако для подобной связи передающая и принимающая антенны должны быть довольно точно направлены друг на друга. Кроме того, подобная направленность позволяет использовать несколько передатчиков, установленных в ряд, сигналы от которых принимаются также установленными в ряд приемными антеннами без взаимных помех. До изобретения оптоволоконной связи подобные микроволновые антенны в течение десятков лет составляли основу междугородной телефонной связи. На самом деле компания MCI, один из основных конкурентов AT&T, построила целую систему микроволновой связи с передачей сигнала от одной башни к другой. Расстояние между антеннами составляло десятки километров. Эта технология нашла отражение даже в названии компании: аббревиатура оператора междугородней связи MCI изначально расшифровывалась как Microwave Communications, Inc. С тех пор, впрочем, MCI уже успела перейти на оптоволоконные сети и объединилась с компанией WorldCom.

Микроволны распространяются строго по прямой, поэтому при слишком большом удалении антенн друг от друга на пути следования сигнала может оказаться земная поверхность (например, так случится, если поставить передатчик в Сан-Франциско, а приемник — в Амстердаме). Чем выше ретрансляционные башни, тем больше может быть расстояние между ними. Максимальное расстояние между повторителями можно очень грубо оценить как корень квадратный из их высоты. Так, при высоте ретрансляторов 100 м расстояние между ними может быть около 80 км.

В отличие от радиоволн с более низкими частотами, микроволны плохо проходят сквозь здания. Кроме того, даже при точной фокусировке луча на приемной антенне при прохождении сквозь пространство луч довольно значительно расширяется в диаметре. Часть волн может отражаться атмосферными слоями, благодаря чему на своем пути к приемной антенне отраженные волны пройдут большее расстояние, чем прямые. Это означает, что первые будут отличаться от последних по фазе, что может привести к подавлению сигнала. Такой эффект называется **многолучевым затуханием** и довольно часто представляет собой серьезную проблему. Наличие этого эффекта зависит от погоды и от частоты. Некоторые операторы связи держат около 10 % своих каналов свободными и временно переключаются на них в случае возникновения многолучевого затухания на какой-либо частоте.

Потребности во все большем диапазоне частот заставляют постоянно совершенствовать технологию, благодаря чему для связи используются все более высокие частоты. Диапазоны частот до 10 ГГц теперь применяются довольно широко, однако при частотах выше 4 ГГц появляется новая проблема: поглощение водой. Длина волн при такой частоте составляет всего несколько сантиметров, и такие волны сильно поглощаются дождем. Такой эффект может быть весьма полезен для тех, кто хочет соорудить огромную наружную микроволновую печь, чтобы жарить пролетающих мимо птичек, однако он представляет собой серьезную проблему в области радиосвязи. Пока что единственным решением является отключение линий связи, пересекаемых полосой дождя, и переключение на обходные пути.

Свойства радиоволн зависят от частоты. При работе на низких частотах радиоволны хорошо проходят сквозь препятствия, однако мощность сигнала в воздухе резко падает по мере удаления от передатчика. Соотношение мощности и удаленности от источника выражается примерно так:  $1/r^2$ . На высоких частотах радиоволны вообще имеют тенденцию распространяться исключительно по прямой линии и отражаться от препятствий. Кроме того, они поглощаются, например, дождем. Радиосигналы любых частот подвержены помехам со стороны двигателей с искрящими щетками и другого электрического оборудования.

Благодаря способности радиоволн распространяться на большие расстояния взаимные помехи, вызываемые одновременно работающими пользователями, представляют собой серьезную проблему. Поэтому все государства ведут очень строгий учет владельцев радиопередатчиков, за одним исключением (обсуждаемым далее).

В диапазонах VLF радиоволны LF и MF распространяются вдоль поверхности земли, как показано на рис. 2.10, а. Эти волны можно поймать радиоприемником на расстоянии около 1000 км, если используются низкие частоты, и на несколько меньших расстояниях, если частоты повыше. Радиовещание с амплитудной модуляцией (AM) использует диапазон средних волн (MF), по этой причине, например, передачи Бостонской средневолновой радиостанции не слышны в Нью-Йорке. Радиоволны этих диапазонов легко проникают сквозь здания, вследствие чего переносные радиоприемники работают и в помещениях. Основным препятствием для использования этих диапазонов для передачи данных является их относительно низкая пропускная способность (см. уравнение (2-3)).

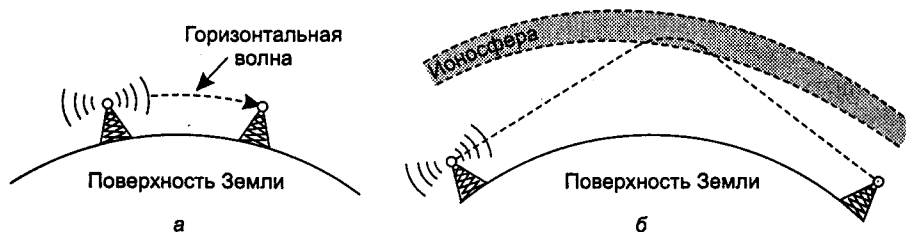


Рис. 2.10. Волны диапазонов VLF, LF и MF огибают неровности поверхности Земли (а); волны диапазона HF отражаются от ионосферы (б)

Радиоволны диапазонов HF и VHF поглощаются землей. Однако те из них, которые доходят до ионосферы, представляющей собой слой заряженных частиц, расположенный на высоте от 100 до 500 км, отражаются ею и посылаются обратно к поверхности Земли, как показано на рис. 2.10, б. При определенных атмосферных условиях сигнал может отразиться несколько раз. Радиохобби используют такие диапазоны частот для дальней связи. Военные также осуществляют связь в диапазонах HF и VHF.

## Связь в микроволновом диапазоне

На частотах выше 100 МГц радиоволны распространяются почти по прямой, поэтому могут быть сфокусированы в узкие пучки. Концентрация энергии в виде узкого пучка при помощи параболической антенны (вроде всем известной спут-

никовой телевизионной тарелки) приводит к улучшению соотношения сигнал/шум, однако для подобной связи передающая и принимающая антенны должны быть довольно точно направлены друг на друга. Кроме того, подобная направленность позволяет использовать несколько передатчиков, установленных в ряд, сигналы от которых принимаются также установленными в ряд приемными антеннами без взаимных помех. До изобретения оптоволоконной связи подобные микроволновые антенны в течение десятков лет составляли основу междугородной телефонной связи. На самом деле компания MCI, один из основных конкурентов AT&T, построила целую систему микроволновой связи с передачей сигнала от одной башни к другой. Расстояние между антеннами составляло десятки километров. Эта технология нашла отражение даже в названии компании: аббревиатура оператора междугородней связи MCI изначально расшифровывалась как Microwave Communications, Inc. С тех пор, впрочем, MCI уже успела перейти на оптоволоконные сети и объединилась с компанией WorldCom.

Микроволны распространяются строго по прямой, поэтому при слишком большом удалении антенн друг от друга на пути следования сигнала может оказаться земная поверхность (например, так случится, если поставить передатчик в Сан-Франциско, а приемник — в Амстердаме). Чем выше ретрансляционные башни, тем больше может быть расстояние между ними. Максимальное расстояние между повторителями можно очень грубо оценить как корень квадратный из их высоты. Так, при высоте ретрансляторов 100 м расстояние между ними может быть около 80 км.

В отличие от радиоволн с более низкими частотами, микроволны плохо проходят сквозь здания. Кроме того, даже при точной фокусировке луча на приемной антенне при прохождении сквозь пространство луч довольно значительно расширяется в диаметре. Часть волн может отражаться атмосферными слоями, благодаря чему на своем пути к приемной антенне отраженные волны пройдут большее расстояние, чем прямые. Это означает, что первые будут отличаться от последних по фазе, что может привести к подавлению сигнала. Такой эффект называется **многолучевым затуханием** и довольно часто представляет собой серьезную проблему. Наличие этого эффекта зависит от погоды и от частоты. Некоторые операторы связи держат около 10 % своих каналов свободными и временно переключаются на них в случае возникновения многолучевого затухания на какой-либо частоте.

Потребности во все большем диапазоне частот заставляют постоянно совершенствовать технологию, благодаря чему для связи используются все более высокие частоты. Диапазоны частот до 10 ГГц теперь применяются довольно широко, однако при частотах выше 4 ГГц появляется новая проблема: поглощение водой. Длина волн при такой частоте составляет всего несколько сантиметров, и такие волны сильно поглощаются дождем. Такой эффект может быть весьма полезен для тех, кто хочет соорудить огромную наружную микроволновую печь, чтобы жарить пролетающих мимо птичек, однако он представляет собой серьезную проблему в области радиосвязи. Пока что единственным решением является отключение линий связи, пересекаемых полосой дождя, и переключение на обходные пути.

Микроволновая радиосвязь стала настолько широко использоваться в междугородной телефонии, сотовых телефонах, телевидении и других областях, что начала сильно ощущаться нехватка ширины спектра. Данная связь имеет ряд преимуществ перед оптоволоконным. Главное из них состоит в том, что не нужно прокладывать кабель, соответственно, не нужно платить за аренду земли на пути сигнала. Достаточно купить маленькие участки земли через каждые 50 км и установить на них ретрансляционные вышки, обойдя, таким образом, телефонные кабельные системы. Именно поэтому корпорации MCI удалось быстро внедриться в рынок междугородной связи. Компания Sprint пошла другим путем: она была образована Южной Тихоокеанской железной дорогой (South Pacific Railroad), которая уже владела правами на большой участок пути и просто закапывала кабель рядом с железнодорожным полотном.

Кроме того, микроволновая связь является относительно недорогой. Установка двух примитивных вышек (это могут быть просто большие столбы на четырех растяжках) с антеннами на каждой из них, скорее всего, обойдется дешевле, чем прокладка 50 км кабеля в перенаселенной городской местности или в горах. Это может быть также дешевле, чем аренда оптоволоконной линии у телефонной компании, особенно если телефонная компания еще не полностью расплатилась за медный кабель, который она уже сменила на оптоволоконный.

## Политика распределения частот

Для предотвращения анархии при использовании частот существуют определенные национальные и международные соглашения, касающиеся политики их распределения. Понятно, что всем хочется сделать связь максимально быстрой, поэтому все хотели бы получить в свое распоряжение максимально широкий спектр. Национальные правительства распределяют частоты между AM- и FM-радиостанциями, телевидением, операторами сотовой связи, а также телефонными компаниями, полицией, морскими и аэронавигационными службами, военными, администрацией и еще многими другими потенциальными клиентами. Международное агентство ITU-R (WARC) пытается скоординировать действия различных структур, чтобы можно было производить устройства, способные работать в любой точке планеты. Тем не менее, рекомендации ITU-R не являются обязательными для исполнения. Так, например, Федеральная комиссия по связи, FCC (Federal Communication Commission), занимающаяся раздачами частотных диапазонов в США, иногда пренебрегает этими рекомендациями — чаще всего из-за соответствующей убедительной просьбы какой-нибудь влиятельной политической группировки, которой требуется конкретная часть спектра.

Даже если определенный диапазон выделен под конкретные цели (например, под сотовую связь), то встает новый вопрос: как распределять те или иные частоты внутри диапазона между операторами связи? В прошлом были популярны три алгоритма. Первый из них, часто называемый **конкурсом красоты**, подразумевал подробные объяснения претендентов, доказывающие, что именно предлагаемый ими сервис лучше всего отвечает интересам общественности. После этого «жюри» решает, чья история выглядит самой красивой. Такая направленность на угождение администрации, зачастую подкрепленная, что называется, рублем, ведет лишь к развитию взяточничества, коррупции, nepotизма и т. д. Более того,

даже если какой-нибудь честный чиновник видит, что иностранная фирма может сделать для отечественного потребителя больше, чем иные национальные компании, то ему придется долго это доказывать, преодолевая сопротивление своих коллег.

Такие наблюдения в конце концов привели к созданию альтернативного алгоритма — обычной **лотереи** среди компаний, желающих получить свою долю спектрального пирога. Проблема здесь лишь в том, что в лотерею могут участвовать и фирмы, совершенно не заинтересованные ни в каких частотах. Например, если определенная частотная полоса достается какому-нибудь крупному ресторатору, он может очень выгодно продать его, ничем не рискуя.

Этот алгоритм очень бурно критиковался за то, что выиграть могут совершенно случайные лица. Результатом стало внедрение третьего алгоритма — **аукциона**. На аукционных торгах частоту выигрывал тот покупатель, который мог выложить наибольшую сумму. Когда в Англии в 2000 году проводился аукцион между операторами мобильной связи третьего поколения, ожидаемая сумма доходов составляла 4 миллиарда долларов. Она достигла 40 миллиардов, поскольку операторы просто впали в бешенство в борьбе за будущее своего бизнеса, предпочитая умереть, но не уйти с рынка мобильной связи. Эти события очень заинтересовали правительства других стран, которые тоже были не прочь получить такой доход, не прикладывая никак усилий. На аукционную систему перешли многие, и она работала, оставляя на своем пути обессиленные такой конкурентной борьбой компании, в один миг оказавшиеся на грани банкротства. В лучшем случае компаниям, выигравшим частоту, требуется несколько лет, чтобы выплатить все свои долги.

Совершенно другим подходом является следующий: вообще не распределять частоты. Пусть каждый работает на той частоте, которая ему больше нравится, но следит за мощностью своих передатчиков: она не должна быть такой, чтобы сигналы накладывались друг на друга. В соответствии с этим принципом, было решено выделить несколько частотных диапазонов, называемых **ISM** (Industrial, Scientific, Medical, то есть промышленные, научные, медицинские). Для работы в этих диапазонах не требуется специальной лицензии. Устройства, открывающие ворота гаража, домашние радиотелефоны, радиоуправляемые игрушки, беспроводные мыши и многие-многие другие устройства работают на ISM. Для уменьшения интерференции между независимыми устройствами, работающими в одном и том же диапазоне, комиссией FCC им предписывается использовать технологию расширенного спектра (см. ранее). Такие правила принимаются во всем мире.

Конкретные диапазоны ISM в разных странах свои. Например, в США устройства мощностью менее 1 Вт могут использовать диапазоны, показанные на рис. 2.11, без получения лицензии FCC. Диапазон 900 МГц — это лучшее, что есть во всем наборе ISM, но он уже перегружен и к тому же доступен не во всех странах. Диапазон 2,4 ГГц работает в большинстве стран, но подвержен помехам от микроволновых печей и радарных устройств. В этом же диапазоне работает система Bluetooth и некоторые ЛВС стандарта 802.11. Есть еще один, новый стандартный диапазон 5,7 ГГц, но он находится в начальной стадии своего развития, поэтому оборудование для него стоит очень дорого. Однако, поскольку многие сети 802.11 активно используют его, он становится все более популярным.

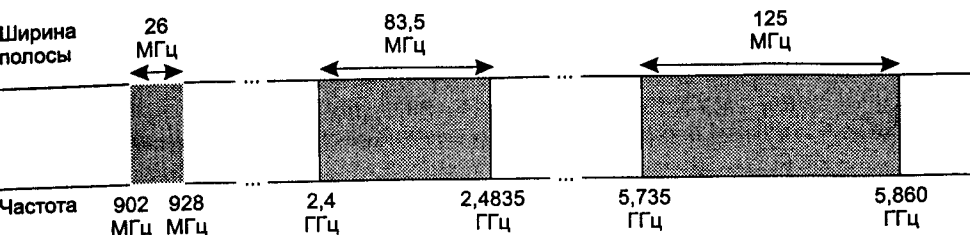


Рис. 2.11. Диапазоны ISM в США

## Инфракрасные и миллиметровые волны

Инфракрасное и миллиметровое излучения без использования кабеля широко применяется для связи на небольших расстояниях. Дистанционные пульты управления для телевизоров, видеомагнитофонов и стереоаппаратуры используют инфракрасное излучение. Они относительно направленные, дешевые и легко устанавливаемые, но имеют один важный недостаток: инфракрасное излучение не проходит сквозь твердые объекты (попробуйте встать между телевизором и пультом). Мы начали с рассмотрения длинных радиоволн и постепенно продвигаемся к видимому свету, и уже инфракрасные волны мало напоминают радиоволны и ведут себя, как свет.

С другой стороны, тот факт, что инфракрасные волны не проходят сквозь стены, является также и положительным. Ведь это означает, что инфракрасная система в одной части здания не будет интерферировать с подобной системой в соседней комнате — вы, к счастью, не сможете управлять со своего пульта телевизором соседа. Кроме того, это повышает защищенность инфракрасной системы от прослушивания по сравнению с радиосистемой. По этой причине для использования инфракрасной системы связи не требуется государственная лицензия, в отличие от радиосвязи (кроме диапазонов ISM). Связь в инфракрасном диапазоне применяется в настольных вычислительных системах (например, для связи ноутбуков с принтерами), но все же не играет значимой роли в телекоммуникации.

## Связь в видимом диапазоне

Ненаправленные оптические сигналы использовались в течение нескольких веков. Герой американской войны за независимость Пол Реввер (Paul Revere) в 1775 году в Бостоне использовал двоичные оптические сигналы, информируя с колокольни Старой Северной церкви (Old North Church) население о наступлении англичан. Более современным приложением является соединение локальных сетей в двух зданиях при помощи лазеров, установленных на крышах. Связь с помощью когерентных волн лазера является сугубо однонаправленной, поэтому для двусторонней связи необходимо на каждой крыше установить по лазеру и по фотодетектору. Такая технология позволяет организовать связь с очень высокой пропускной способностью при очень низкой цене. Кроме того, такая система довольно просто монтируется и, в отличие от микроволновой связи, не требует лицензии FCC (Федеральной комиссии связи США).

Узкий луч является сильной стороной лазера, однако он создает и некоторые проблемы. Чтобы попасть миллиметровым лучом в мишень диаметром 1 мм на расстоянии 500 м, требуется снайперское искусство высочайшей пробы. Обычно на лазеры устанавливаются линзы для небольшой расфокусировки луча.

Недостатком лазерного луча является также неспособность проходить сквозь дождь или густой туман, хотя в солнечные ясные дни он работает прекрасно. Тем не менее, автор однажды присутствовал на конференции в современной европейской гостинице, где организаторы заботливо предоставили комнату, полную терминалов, чтобы участники конференции могли читать свою электронную почту во время скучных презентаций. Поскольку местная телефонная станция не желала устанавливать большое количество телефонных линий всего на три дня, организаторы установили лазер на крыше и нацелили его на здание университетского компьютерного центра, который находится на расстоянии нескольких километров. В ночь перед конференцией они проверили связь — она работала прекрасно. В 9 часов следующего утра, в ясный солнечный день связь была полностью потеряна и отсутствовала весь день. Вечером организаторы опять тщательно проверили связь и снова убедились в ее прекрасной работе. На следующий день связи опять не было.

Когда конференция закончилась, организаторы обсудили эту проблему. Как выяснилось, в дневное время солнце нагревало крышу, горячий воздух от нее поднимался и отклонял лазерный луч, начинавший танцевать вокруг детектора (рис. 2.12). Этот эффект можно наблюдать невооруженным глазом в жаркий день на шоссе или над горячим радиатором автомобиля. Борясь с этим эффектом, астрономы располагают свои телескопы высоко в горах, подальше от атмосферы.

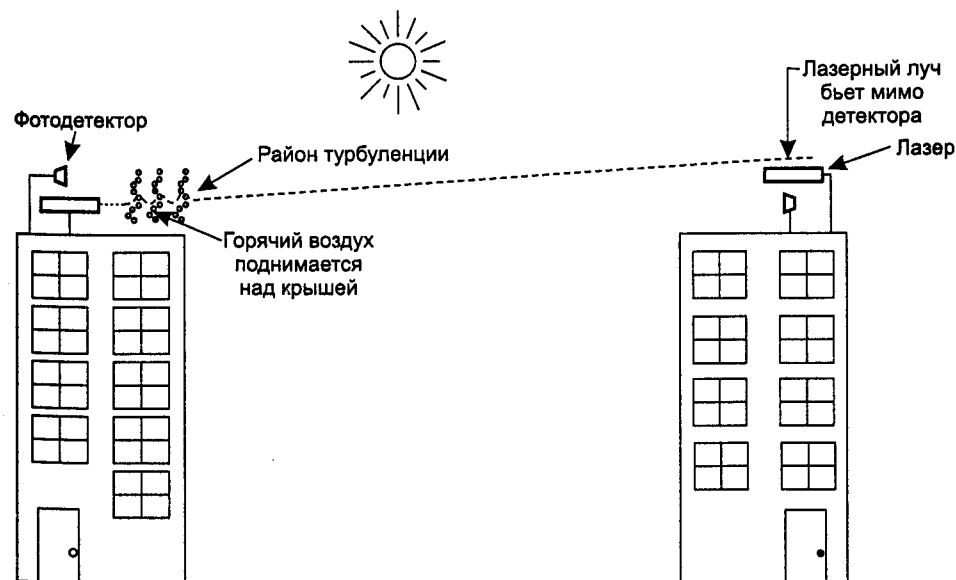


Рис. 2.12. Конвекционные потоки мешают работать лазерной системе. На рисунке изображена двунаправленная система с двумя лазерами

## Спутники связи

В 1950-х и начале 60-х годов люди пытались организовать связь при помощи сигналов, отраженных от металлических метеозондов. К сожалению, мощность таких сигналов была слишком мала, и их практическое значение оказалось ничтожным. Затем ВМФ США обнаружил, что в небе постоянно висит некое подобие метеозонда — это была Луна. Была построена система для связи береговых служб с кораблями, в которой использовалось отражение сигналов от естественного спутника Земли.

Дальнейший прогресс в создании коммуникаций с помощью небесных тел на этом приостановился до запуска первого спутника связи. Ключевым отличием искусственной «луны» являлось то, что на спутнике было установлено оборудование, позволяющее усилить входящий сигнал перед отправкой его обратно на Землю. Это превратило космическую связь из забавного курьеза в мощную технологию.

Спутникам связи присущи определенные свойства, делающие их чрезвычайно привлекательными для самых разных областей применения. Проще всего представить себе спутник связи в виде своего рода огромного микроволнового повторителя, висящего в небе. Он включает в себя несколько **транспондеров**, каждый из которых настроен на определенную часть частотного спектра. Транспондеры усиливают сигналы и преобразуют их на новую частоту, чтобы при отправке на Землю отраженный сигнал не накладывался на прямой.

Нисходящий луч может быть как широким, покрывающим огромные пространства на Земле, так и узким, который можно принять в области, ограниченной лишь несколькими сотнями километров. Последний метод называется **трубой**.

В соответствии с законом Кеплера, период обращения спутника равен радиусу орбиты в степени  $3/2$ . Таким образом, чем выше орбита, тем дольше период. Вблизи поверхности Земли период обращения вокруг нее составляет примерно 90 минут. Следовательно, спутники, расположенные на малой высоте, слишком быстро исчезают из вида приемно-передающих устройств, расположенных на Земле, поэтому необходимо организовывать непрерывные зоны покрытия. На высоте 35 800 км период составляет 24 часа. А на высоте 384 000 км спутник будет обходить Землю целый месяц, в чем может убедиться любой желающий, наблюдая за Луной.

Конечно, период обращения спутника очень важно иметь в виду, но это не единственный критерий, по которому определяют, где его разместить. Необходимо принимать во внимание так называемые пояса Ван Аллена (Van Allen belts) — области скопления частиц с большим зарядом, находящихся в зоне действия магнитного поля Земли. Любой спутник, попав в такой пояс, довольно быстро будет уничтожен этими частицами. В результате учета этих факторов были выделены три зоны, в которых можно безопасно размещать искусственные спутники. Они изображены на рис. 2.13. Из этого же рисунка можно узнать о некоторых из их свойств. Мы вкратце рассмотрим спутники, размещаемые в каждой из этих трех зон.

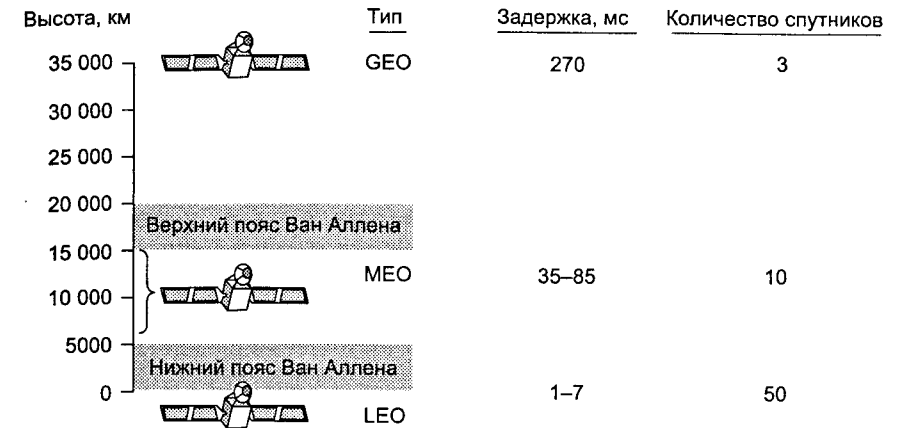


Рис. 2.13. Спутники связи и их свойства: высота орбиты, задержка, число спутников, необходимое для покрытия всей поверхности земного шара

## Геостационарные спутники

В 1945 году писатель-фантаст Артур С. Кларк (Arthur S. Clarke) подсчитал, что спутник, расположенный на высоте 35 800 км на круговой экваториальной орбите, будет оставаться неподвижным относительно Земли. А значит, следить за ним будет гораздо проще (Clarke, 1945). Он развил свою мысль и описал целую коммуникационную систему, использующую такие (пилотируемые) **геостационарные спутники**. Он описал орбиты, солнечные батареи, радиочастоты и даже процедуры связи. К сожалению, в конце концов он пришел к неутешительному выводу о том, что такие спутники вряд ли будут иметь практическое значение, потому что на их борту невозможно разместить энергоемкие, хрупкие ламповые усилители. В связи с этим Кларк не стал больше развивать свою идею, хотя и написал несколько фантастических рассказов о подобных искусственных спутниках.

Положение вещей изменило изобретение транзистора, и вот в июле 1962 года производится запуск первого в мире спутника связи Telstar.

С тех пор спутники связи стали многомиллиардным бизнесом и единственным прибыльным делом, связанным с космическими технологиями. Про спутники, вращающиеся на большой высоте, говорят, что они расположены на **геостационарной орбите** (GEO, Geostationary Earth Orbit).

Современные технологии таковы, что расположение спутников чаще, чем через каждые  $2^\circ$  в 360-градусной экваториальной плоскости, является нерациональным. В противном случае возможна интерференция сигналов. Итак, если на каждые два градуса приходится 1 спутник, то всего их в экваториальной плоскости можно разместить  $360/2 = 180$ . Сто восемьдесят спутников могут одновременно находиться в небе и вращаться в одной и той же плоскости на одной и той же высоте. Тем не менее у каждого транспондера есть возможность работы на разных частотах и с разной поляризацией, что позволяет увеличить максимальную пропускную способность всей системы.

Со временем возникла необходимость предотвращения беспорядочного использования околоземных орбит. Навести порядок в небе было поручено организации ИТУ. Процесс выделения орбит очень сильно связан с политикой, причем многие страны в борьбе за свой «кусочек» неба напоминают далеких предков человека из каменного века. Это объясняется очень высокими потенциальными доходами, которые государство может извлечь, сдавая в аренду кусочки космоса. В то же время некоторые страны заявляют, что их государственные границы в высоту простираются до самой Луны и что использование орбит, проходящих над их территорией, иностранными государствами является нелегальным. Жаркие споры на эту тему подогревает еще и тот факт, что коммерческая связь — это далеко не единственное применение спутников связи, а значит, и их орбит. Ими пользуются операторы спутникового телевидения, правительственные структуры и военные.

Современные спутники могут быть довольно большими, весят до 4000 кг и потребляют до нескольких киловатт электроэнергии, вырабатываемой солнечными батареями. Эффекты гравитации, вызванные Солнцем, Луной и другими планетами, постепенно вызывают смещение с орбит и изменение ориентации. Приходится компенсировать это с помощью бортовых двигателей. Действия по сохранению параметров орбит спутников называются **позиционированием**. И все же приходит момент, когда топливо у бортовых двигателей заканчивается (такое случается примерно один раз в десять лет). Тогда спутник начинает беспомощно дрейфовать, постепенно сходя с орбиты. Понятно, что он перестает быть дееспособным и его нужно отключать. Обычно спутники связи заканчивают свою жизнь, постепенно входя в плотные слои атмосферы и сгорая там либо падая на землю.

Участки орбит — это не единственный предмет, за который борются страны и отдельные компании. Разумеется, распределению между всеми желающими подлежат и рабочие диапазоны частот, поскольку нисходящие сигналы спутников могут вызывать помехи в работе микроволновых устройств. Поэтому ИТУ были выделены частотные диапазоны, предназначенные исключительно для спутников связи. Самые важные из них показаны на табл. 2.3.

**Таблица 2.3.** Основные частотные диапазоны спутников связи

Диапазон	Нисходящие сигналы	Восходящие сигналы	Ширина полосы	Проблемы
L	1,5 ГГц	1,6 ГГц	15 МГц	Узкая полоса; переполнен
S	1,9 ГГц	2,2 ГГц	70 МГц	Узкая полоса; переполнен
C	4,0 ГГц	6,0 ГГц	500 МГц	Наземная интерференция
Ku	11 ГГц	14 ГГц	500 МГц	Дождь
Ka	20 ГГц	30 ГГц	3500 МГц	Дождь, стоимость оборудования

Диапазон С был первой полосой частот, предназначенной для трафика коммерческих спутников. Он разбивается на два поддиапазона. Один из них предназначен для сигналов с Земли (восходящих), другой — для сигналов со спутника (нисходящих). Таким образом, для двусторонней передачи требуется сразу два

канала. Они уже переполнены пользователями, поскольку на тех же частотах работают наземные микроволновые устройства связи. В 2000 году, в соответствии с международным соглашением, было добавлено два дополнительных диапазона: S и L. Тем не менее, они тоже весьма узки и уже заполнены.

Следующий высокочастотный диапазон коммерческой связи называется Ku (K under, то есть «под K»). Полоса пока еще не переполнена, и работающие на этих частотах спутники могут располагаться на угловом расстоянии 1° друг от друга. У диапазона Ku имеется еще одна проблема: волны этих частот глушатся дождем. Вода очень плохо пропускает микроволновый сигнал. К счастью, очень сильные ливни обычно бывают весьма узко локализованы, поэтому проблему удастся решить с помощью нескольких наземных установок, расположенных довольно далеко друг от друга. Цена, которую приходится платить за «проблему дождя», весьма высока: это дополнительные антенны, кабели и электронные устройства для быстрого переключения станций. Наконец, самым высокочастотным диапазоном является Ka (K above, то есть «над K»). Основной проблемой является пока еще очень высокая стоимость оборудования для работы на этих частотах. Помимо коммерческих диапазонов, существует также множество военных и правительственных.

На современном спутнике имеется порядка 40 транспондеров, полоса каждого из которых составляет 80 МГц. Обычно каждый транспондер работает по принципу узкой трубы, однако недавно появились спутники, оснащенные бортовыми процессорами для обработки сигналов. В первых спутниках разделение транспондеров по каналам было статическим: весь доступный рабочий диапазон просто разделялся на несколько фиксированных полос. Теперь же сигнал транспондера разделяется на временные слоты, то есть каждому пользователю выделяется на передачу определенный промежуток времени. Далее в этой главе мы изучим оба принципа (частотное и временное мультиплексирование) более подробно.

Первые геостационарные спутники связи имели один луч, который охватывал примерно 1/3 земной поверхности и назывался **точечным лучом**. Однако по мере удешевления, уменьшения размеров и энергоемкости микроэлектронных элементов стали появляться более сложные стратегии. Стало возможно оборудовать каждый спутник несколькими антеннами и несколькими транспондерами. Каждый нисходящий луч сфокусировали на небольшой территории; таким образом смогли осуществить одновременную передачу нескольких сигналов. Обычно эти так называемые **пятна** имеют форму овала и могут иметь относительно малые размеры — порядка нескольких сотен километров. Американский спутник связи охватывает широким лучом 48 штатов, а также имеет два узких луча для Аляски и Гавайских островов.

Новым витком развития спутников связи стало создание недорогих миниатюрных апертурных терминалов — **VSAT** (Very Small Aperture Terminal) (Abgarnson, 2000). У этих небольших станций имеется антенна диаметром всего 1 м (сравните с 10-метровой антенной GEO), их выходная мощность составляет примерно 1 Вт. Скорость работы в направлении Земля — спутник обычно составляет 19,2 Кбит/с, зато связь спутник — Земля можно поддерживать на скорости 512 Кбит/с и выше. Спутниковое широкоэмитательное телевидение использует эту технологию для односторонней передачи сигнала.

Многим микростанциям VSAT не хватает мощности для того, чтобы связываться друг с другом (через спутник, разумеется). Для решения этой проблемы устанавливаются специальные наземные концентраторы с большой мощной антенной. Концентратор (хаб) распределяет трафик между несколькими VSAT, как показано на рис. 2.14. В таком режиме либо приемник, либо передатчик обязательно имеет большую антенну и мощный усилитель. Недостатком такой системы является наличие задержек, достоинством — низкая цена за полноценную систему для конечного пользователя.

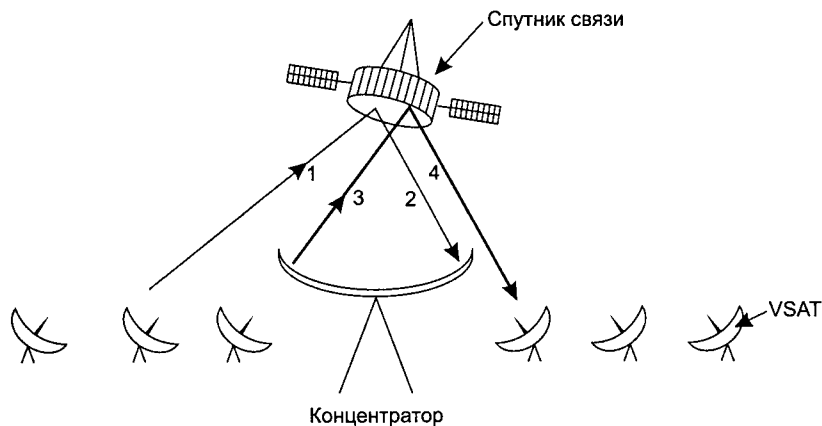


Рис. 2.14. Хаб распределяет трафик между несколькими VSAT

Системы VSAT имеют большие перспективы использования в сельской местности. Об этом как-то не очень часто вспоминают, но половина населения земного шара живет минимум в часе ходьбы от ближайшего телефона. Протянуть телефонные линии ко всем селам и деревням не по карману большинству стран так называемого третьего мира. Однако средств на установку тарелки VSAT, питающейся от солнечной батареи, может хватить не только у администрации региона, но и у частных лиц. Таким образом, VSAT — это технология, которая может позволить организовать связь в любой точке планеты.

Спутники связи обладают рядом свойств, которые радикально отличают их от любых наземных систем связи между абонентами. Во-первых, несмотря на предельно высокую скорость распространения сигнала (собственно, она практически равна скорости света — 300 000 км/с), расстояния между наземными приемно-передающими устройствами и спутниками таковы, что в технологии GEO задержки оказываются весьма значительными. В зависимости от взаимного расположения пользователя, наземной станции и спутника время передачи может составлять 250–300 мс. Обычно оно составляет 270 мс (соответственно, в два раза больше — 540 мс — в системах VSAT, работающих через хаб).

Для сравнения, сигнал в наземных микроволновых системах связи распространяется со скоростью примерно 3 мкс/км, а коаксиальный кабель и оптоволокно имеют задержку порядка 5 мкс/км. Разница задержек здесь объясняется тем, что в твердых телах сигнал распространяется медленнее, чем в воздухе.

Еще одним важным свойством спутников является то, что они являются исключительно широкоэмитальным средством передачи данных. На отправку сообщения сотням абонентов, находящихся в зоне следа спутника, не затрачивается никаких дополнительных ресурсов по сравнению с отправкой сообщения одному из них. Для некоторых применений это свойство очень полезно. Например, можно представить себе кэширование на спутнике популярных веб-страниц, что резко повысит скорость их загрузки на сотни компьютеров, находящихся довольно далеко друг от друга. Конечно, широкоэмитальное вещание симулируется обычными двухточечными сетями, однако спутниковое вещание в этом случае обходится значительно дешевле. С другой стороны, с точки зрения защиты информации и конфиденциальности данных, спутники — это прямо-таки беда: кто угодно может прослушивать абсолютно все. Здесь на защиту тех, кому важен ограниченный доступ к информации, встает криптография.

Спутники связи обладают еще одним замечательным свойством — независимостью стоимости передачи от расстояния между узлами. Звонок другу, живущему за океаном, стоит столько же, сколько звонок подруге, живущей в соседнем доме. Космические телекоммуникационные технологии, кроме того, обеспечивают очень высокую степень защиты от ошибок и могут быть развернуты на местности практически мгновенно, что очень важно для военных.

## Средневысотные спутники

На гораздо более низких высотах, нежели геостационарные спутники, между двумя поясами Ван Аллена, располагаются **средневысотные спутники** (MEO, Medium-Earth Orbit Satellites). Если смотреть на них с Земли, то будет заметно их медленное дрейфование по небосводу. Средневысотные спутники делают полный оборот вокруг нашей планеты примерно за 6 часов. Соответственно, наземный приемопередатчикам необходимо следить за их перемещением. Поскольку эти спутники находятся гораздо ниже, чем геостационарные, то и «засвечиваемое» ими пятно на поверхности Земли имеет более скромные размеры. Зато для связи с ними требуются менее мощные передатчики. Спутники MEO не используются в телекоммуникациях<sup>1</sup>, поэтому в дальнейшем мы не будем их рассматривать. Примерами средневысотных спутников являются 24 спутника системы **GPS** (Global Positioning System, глобальная система определения местонахождения), вращающихся вокруг Земли на высоте около 18 000 км.

## Низкоорбитальные спутники

Снизим высоту еще больше и перейдем к рассмотрению **низкоорбитальных спутников** (LEO, Low-Earth Orbit Satellites). Для того чтобы создать целостную систему, охватывающую весь земной шар, нужно большое количество таких спутников. Причиной тому является, прежде всего, высокая скорость их движения по орбите. С другой стороны, благодаря относительно небольшому расстоя-

<sup>1</sup> В настоящее время средневысотные спутники находят все большее применение в телекоммуникациях, особенно в сотовой телефонной связи. — *Примеч. перев.*

нию между наземными передатчиками и спутниками не требуется особо мощных наземных передатчиков, а задержки составляют всего лишь несколько миллисекунд. В этом разделе мы рассмотрим три примера спутников LEO, два из которых относятся к голосовой связи, а один — к службам Интернета.

## Iridium

Как уже было сказано ранее, в течение первых 30 лет существования спутников связи низкоорбитальные спутники использовались очень мало, поскольку они появлялись и исчезали из зоны видимости передатчика слишком быстро. В 1990 году фирма Motorola совершила большой прорыв в этой области, попросив FCC разрешить ей запустить 77 спутников связи для нового проекта Iridium (77-м элементом таблицы Менделеева является иридий). Впрочем, планы вскоре изменились, и было решено использовать только 66 спутников, поэтому проект следовало бы переименовать в Dysprosium<sup>1</sup>, но это было бы менее благозвучно. Идея состояла в том, что на место исчезающего из вида спутника будет тотчас приходиться следующий, этакая карусель. Предложение породило новую волну безумной конкуренции среди коммуникационных компаний. Каждая из них захотела «повесить» в небе свою цепочку низкоорбитальных спутников.

После семи лет притирки компаний друг к другу и решения вопросов финансирования в 1997 году совместными усилиями удалось, наконец, запустить спутники. Услуги связи начали предоставляться с ноября 1998 года. К сожалению, коммерческий спрос на большие и тяжелые телефоны спутниковой связи оказался незначительным, потому что за семь лет конкурентной борьбы, которые прошли до запуска проекта Iridium, сотовая связь шагнула очень далеко вперед. В результате Iridium практически не приносил прибыли, и в августе 1999 года его пришлось объявить банкротом — это было одно из самых эффективных корпоративных фиаско в истории. Спутники, как и другое имущество (стоимостью порядка \$5 миллиардов), были проданы инвестору за \$25 миллионов в качестве своего рода космического гаража. Проект Iridium был вновь запущен в марте 2001 года.

Эта система предоставляла (и предоставляет) связь с любой точкой земного шара при помощи ручных устройств, связывающихся напрямую со спутниками. Можно передавать речь, данные, факсы, информацию для пейджеров, а также навигационную информацию. И все это работает и на суше, и на море, и в воздухе! Основными клиентами Iridium являются судоходные, авиационные компании, фирмы, занимающиеся поиском нефти, а также частные лица, путешествующие в местах, где отсутствует телекоммуникационная инфраструктура (например, пустыни, джунгли, некоторые страны третьего мира).

Спутники Iridium вращаются по околоземной круговой полярной орбите на высоте 750 км. Они составляют ожерелье, ориентированное вдоль линий долготы (по одному спутнику на 32° долготы). Шесть таких ожерелий опоясывают Землю, как показано на рис. 2.15. Люди, которые не очень искушены в химической науке, могут представить себе всю эту систему в виде огромного атома диспрозия с Землей в качестве ядра и спутниками в качестве электронов.

Каждый спутник имеет до 48 ячеек (пятен от лучей сигналов). Итого всю поверхность Земли, наподобие пчелиных сот, покрывают 1628 ячеек, как показано на рис. 2.15, б. На один спутник приходится 3840 каналов связи; соответственно, на все спутники — 253 440. Некоторые каналы используются пейджинговыми компаниями и для навигации, остальные — для передачи данных и речи.

Интересным свойством Iridium является то, что эта система обеспечивает пересылку данных между очень удаленными друг от друга абонентами путем передачи сигнала по цепочке от одного спутника к другому. Представьте себе двух человек, один из которых стоит на Северном полюсе, другой — на Южном. Они могут спокойно разговаривать друг с другом, при этом данные будут передаваться по «ожерелью» из спутников.

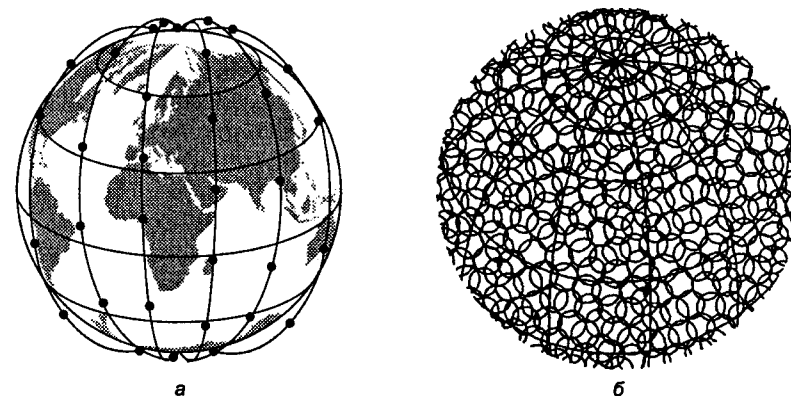


Рис. 2.15. Шесть ожерелий Земли из спутников Iridium (а); 1628 движущихся ячеек охватывают всю Землю (б)

## Globalstar

Альтернативой проекту Iridium является система Globalstar. Он построен на 48 низкоорбитальных спутниках, но имеет иную схему ретрансляции сигналов. Если в Iridium в качестве маршрутизаторов используются сами спутники, передающие по цепочке сигнал (что требует наличия на них довольно сложного оборудования), то в Globalstar применяется обычный принцип «узкой трубы». Допустим, звонок приходит на спутник с Северного полюса. Принятый сигнал отправляется обратно на Землю и захватывается крупной наземной приемно-передающей станцией рядом с домиком Санта-Клауса. Маршрутизация производится между такими станциями, разбросанными по всему миру. Наземная цель сигнала — ближайший ко второму абоненту наземный маршрутизатор. Через находящийся рядом с ним спутник вызов поступает к абоненту. Преимуществом такой схемы является то, что наиболее сложное оборудование устанавливается на поверхности Земли, а здесь работать с ним гораздо проще, чем на орбите. К тому же использование мощных наземных антенн позволяет принимать слабый сигнал со спутника; значит, можно уменьшить потребляемую мощность телефонов. В результате телефоны передают сигналы с мощностью всего несколько милливольт, и наземные антенны получают очень слабый сигнал даже после его усиления спутником. Тем не менее такой мощности хватает для нормальной работы.

<sup>1</sup> Диспрозий — 66-й элемент таблицы Менделеева. — Примеч. перев.



## Teledesic

Проект Iridium был рассчитан на абонентов, находящихся в различных нетривиальных местах. Наш следующий пример — проект Teledesic — предназначен для пользователей Интернета по всему миру, которым требуется высокая пропускная способность канала. Крестными отцами этой системы в 1990 году стали Крейг МакКоу (Craig McCaw), пионер мобильной связи, и Билл Гейтс (Bill Gates), всемирно известный основатель фирмы Microsoft, — он был очень недоволен улиточной скоростью, с которой телефонные компании предоставляли якобы высокую пропускную способность. Целью Teledesic было обеспечить миллионы пользователей Интернета спутниковым каналом связи со скоростью 100 Мбит/с и передачей данных в направлении спутник — Земля со скоростью до 720 Мбит/с. Для этого нужна небольшая стационарная антенна типа VSAT, полностью независимая от телефонной системы. Понятно, что телефонным операторам такая система невыгодна. При здоровой рыночной экономике это должно приводить к здоровой конкуренции.

Изначально система предполагала размещение на низковысотной орбите 288 спутников с малым следом на поверхности Земли, расположенных в 12 плоскостях прямо под нижним поясом Ван Аллена, на высоте 1350 км. Позднее было решено изменить схему, и стало 30 спутников с увеличенным следом на поверхности. Передача должна осуществляться в высокочастотном и еще не переполненном диапазоне с широкой полосой — Ka. Teledesic представляет собой космическую систему с коммутацией пакетов, при этом каждый спутник является маршрутизатором и может пересылать данные на соседние спутники. Когда пользователь запрашивает полосу для передачи данных, она предоставляется ему динамически на 50 мс. Систему предполагается запустить в 2005 году.

## Спутники против оптоволоконна

Такое сравнение не только уместно, но и поучительно. Всего лишь 20 лет назад люди смогли осознать, что будущее телекоммуникационных систем — за спутниками связи. В конце концов, телефонная система не особо менялась последние 100 лет; похоже, что не изменится и еще через 100 лет. Такая стабильность вызвана в том числе и мощной регулятивной средой, которая обязывала телефонные компании предоставлять качественный сервис за разумные деньги и взамен предлагала гарантированную прибыль за счет инвестиций. Для тех, кому требовалось передавать не только речь, но и данные, сделали модемы на 1200 бит/с. Собственно, это все, что долгое время предоставляла телефонная система.

В 1984 году в США и чуть позднее в Европе стала возникать конкурентная борьба в области связи, которая все поставила с ног на голову. Телефонные компании занялись прокладкой оптического волокна для междугородной телефонии и стали предоставлять услуги высокоскоростного доступа в Интернет, например, по ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line, асимметричная цифровая абонентская линия). Наконец-то стали снижаться искусственно завышенные тарифы на дальнюю связь, за счет которых долгое время удерживались низкие тарифы на местные переговоры.

Довольно неожиданно оптоволоконные кабели стали победителями среди средств связи. Тем не менее, у спутников имеются свои области применения, в которых оптоволоконно, увы, бессильно. Рассмотрим некоторые из этих областей.

Во-первых, несмотря на то что у отдельно взятого оптического волокна пропускная способность выше, чем у всех спутников вместе взятых, большинству пользователей это мало что дает. Пока что оптоволоконные кабели используются в основном в телефонных сетях для обеспечения большого количества одно-временных звонков, а частному сектору такие технологии малодоступны. При применении спутниковой системы достаточно установить антенну на крыше дома, и пользователь получит очень неплохую пропускную способность линии, никак не связанной с телефонной сетью. Эту идею использует, например, Teledesic.

Второй областью применения спутниковой связи является мобильная телефония. Очень многие люди испытывают потребность в том, чтобы быть постоянно на связи — во время путешествий, за рулем автомобиля, во время авиаперелетов и морских круизов. Оптоволоконно в этих ситуациях протянуть невозможно, а вот спутниковая связь будет работать без проблем. Тем не менее, возможно, оптимальным вариантом является все-таки сочетание сотовой и оптоволоконной связи (за исключением случаев морских вояжей и авиаперелетов).

Третья область касается вопросов, в которых принципиально широко вещание. Сообщение, отправленное через спутник, могут получить одновременно тысячи абонентов на Земле. Например, постоянно меняющуюся информацию о ситуации на мировых биржах проще и дешевле распространять среди огромного количества пользователей с помощью спутника, а не наземной эмуляции широко вещания.

В-четвертых, нельзя забывать о местах, куда либо очень тяжело протянуть кабель, либо этого не позволяют сделать скудные средства местных бюджетов. В таких регионах обычно плохо развита наземная инфраструктура. Поэтому, например, Индонезия имеет спутник для внутреннего телефонного трафика. Приобрести его оказалось дешевле, чем проложить донный кабель между 13 667 островами.

В-пятых, спутниковая связь может быть использована там, где очень тяжело или необоснованно дорого обходится приобретение права на прокладку кабеля.

Шестой областью применения спутников является система, для которой критична скорость развертывания техники. Это, конечно, военная система.

В целом, основным средством телекоммуникаций на Земле, вероятно, будет комбинация оптоволоконна и сотовой радиосвязи, но для некоторых специальных применений будет использоваться спутниковая система. Однако есть одно «но», которое может приостановить развитие всего этого: экономика. Хотя оптоволоконные кабели обладают очень высокой пропускной способностью, беспроводные системы, как наземные, так и спутниковые, будут вести очень жесткую политику ценовой конкуренции. Если будет продолжаться удешевление спутниковых систем (скажем, шаттлы скоро будут способны выводить на орбиту одновременно десятки спутников связи), а низкоорбитальные спутники постепенно будут все больше использоваться в телекоммуникациях, то не исключено, что оптоволоконные сети уйдут с ведущих ролей на большинстве рынков.

## Коммутируемая телефонная сеть общего пользования

Когда между двумя компьютерами, принадлежащими одной компании и расположенными недалеко друг от друга, необходимо установить связь, часто проще

всего оказывается проложить между ними кабель. Подобным образом работают локальные сети. Однако когда расстояния велики, или компьютеров очень много, или кабель надо прокладывать поперек шоссе или еще какой-либо государственной магистрали, цена прямого кабельного соединения становится недоступно высокой. Кроме того, почти во всех странах мира законом запрещено протягивать частные линии связи над или под объектами государственной собственности. Поэтому проектировщики сетей должны рассчитывать на имеющиеся средства телекоммуникации.

Подобные средства связи, в частности, **коммутируемая телефонная сеть общего пользования** (PSTN, Public Switched Telephone Network), были созданы много лет назад с совершенно иной целью — передать человеческий голос в более или менее узнаваемом виде. Их применимость для соединения друг с другом компьютеров весьма незначительна, однако ситуация очень быстро меняется с внедрением оптоволоконной связи и цифровых технологий. В любом случае, телефонная система так тесно переплетена с компьютерными сетями (глобальными), что ее изучению стоит посвятить несколько разделов.

Чтобы понять, насколько значимой является телефонная сеть, проведем грубое, но показательное сравнение свойств типичного межкомпьютерного соединения при помощи кабеля и через телефонную линию. Итак, кабель, соединяющий два компьютера, может передавать данные со скоростью  $10^9$  бит/с, возможно, чуть больше. Сравним с соединением по телефонной линии с помощью модема, где скорость передачи ограничена 56 Кбит/с. Отличие — ни много ни мало — в 20 000 раз. С тем же успехом можно было бы сравнить какую-нибудь утку, лениво прогуливающуюся по лужайке, и ракету, летящую на Луну. Если вместо обычной телефонной линии установить ADSL, скорости все равно будут различаться в 1000–2000 раз.

Беда в том, что разработчики компьютерных систем привыкли, как ни странно, иметь дело с компьютерными системами, поэтому когда они вдруг сталкиваются с иной системой, производительность которой (с их точки зрения) на 3–4 порядка ниже, то они посвящают массу времени и сил попыткам решить, как использовать эту систему более эффективно. В следующих разделах мы опишем телефонную систему и покажем, как она устроена и как работает. Дополнительные сведения о внутренностях телефонной системы см. (Bellamy, 2000).

## Структура телефонной системы

Вскоре после того как Александр Грэхем Белл (Alexander Graham Bell) в 1876 году (всего на несколько часов раньше своего конкурента, Элиши Грея (Elisha Gray)) запатентовал телефон, на его изобретение появился огромный спрос. Вначале все было довольно забавно: этот рыночный сектор занимался торговлей телефонными аппаратами, которые продавались парами. Задача протягивания между ними единственного провода была возложена на покупателя. Вместо второго провода использовалась земля. Если владелец телефона хотел поговорить с  $n$  другими владельцами телефонов, ему приходилось протягивать отдельные провода ко всем  $n$  домам. За первый год существования такой телефонной сети города оказались опутанными настоящей сетью из проводов, тянущихся над домами и деревьями в

полнейшем беспорядке. Стало очевидно, что модель соединения телефонов «каждый с каждым» работать не будет (рис. 2.16, а).

К чести Белла, он заметил это и основал телефонную компанию Bell Telephone Company, открывшую свой первый офис в 1878 году в Нью-Хэйвене, штат Коннектикут. Компания прокладывала провод к каждому дому или офису пользователя. Чтобы позвонить, пользователь должен был покрутить ручку телефона, при этом в офисе телефонной компании звенел звонок, привлекающий внимание оператора, который вручную соединял звонившего с требуемым номером, втыкая разъем в нужное гнездо. Структура телефонной сети с одним коммутатором изображена на рис. 2.16, б.

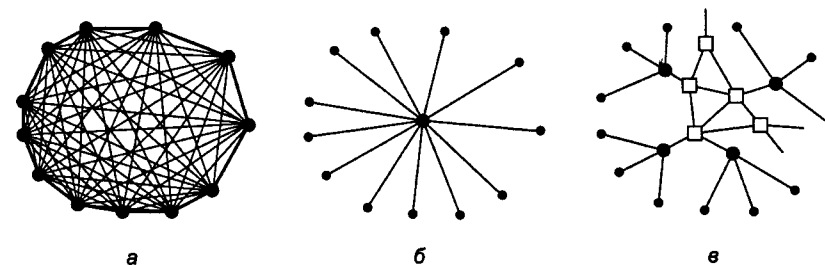


Рис. 2.16. Сеть «каждый с каждым» (а); централизованный коммутатор (б); двухуровневая иерархия (в)

Довольно скоро подобные офисы компании Bell System стали появляться повсюду, кроме того, возник спрос на междугородную связь, поэтому Bell System стала соединять свои офисы. Вскоре они столкнулись опять с той же проблемой: задача соединения каждого офиса с каждым очень быстро стала невыполнимой, поэтому были созданы офисы второго уровня (рис. 2.16, в). Через некоторое время количество офисов второго уровня также стало слишком большим. В конце концов иерархия разрослась до пяти уровней.

К 1890 году были созданы три основные части телефонной системы — коммутаторные телефонные станции, провода, соединяющие пользователей с ними (теперь уже изолированные витые пары, а не проволока с землей вместо второго провода), и линии междугородной связи, соединяющие отдельные телефонные станции. И хотя в каждой из этих областей с тех пор производились улучшения, основа модели Bell System осталась неизменной на протяжении более 100 лет. Краткую техническую историю телефонной системы см. (Hawley, 1991).

Вплоть до 1984 года, когда распалась корпорация AT&T, телефонная система представляла собой многоуровневую иерархическую структуру с высокой степенью избыточности. Приведенное далее описание сильно упрощено; тем не менее, оно передает суть дела. Каждый телефон соединен при помощи двух медных проводов с ближайшей **оконечной телефонной станцией**. Расстояние от телефона до ближайшего коммутатора обычно от 1 до 10 км, в городах меньше, чем в сельской местности.

В одних только Соединенных Штатах насчитывается около 22 000 оконечных телефонных станций. Двухпроводное соединение между телефоном каждого абор-

нента и оконечной телефонной станцией называется **местной линией связи** (или локальным контуром). Если местные линии связи всего мира соединить последовательно в одну линию, то их можно будет протянуть до Луны и обратно 1000 раз.

Одно время 80 % капитала компании AT&T было вложено в медные провода местных линий связи. Таким образом, компания AT&T представляла собой самую большую в мире медную шахту. К счастью, этот факт не был широко известен в сообществе инвесторов. В противном случае какие-нибудь корпорации могли скупить AT&T, выкопать все провода и продать их меднообогатительным комбинатам с целью получения быстрой прибыли, тем самым прекратив всю телефонную связь в США.

Если абонент, подключенный к оконечному коммутатору, позвонит другому абоненту, подключенному к тому же коммутатору, то коммутирующий механизм установит между ними прямое электрическое соединение. Это соединение будет сохраняться в течение всего разговора.

Если же абоненты подключены к разным оконечным станциям, то должна использоваться другая процедура. У каждой оконечной станции имеется несколько линий к одному или нескольким коммутационным центрам, называемым **пригородно-междугородными станциями** (или, если они расположены в одной области, **транзитными станциями**). Соединяющие их линии называются **междугородными**. Если оба абонента подключены к одной и той же междугородной станции (что вполне вероятно, если они находятся недалеко друг от друга), то связь может быть установлена этой междугородной станцией. На рис. 2.16, в показана телефонная сеть, состоящая только из телефонных аппаратов (маленькие точки), оконечных коммутаторов (большие точки) и междугородных станций (квадраты).

Если у абонентов нет общей междугородной станции, то связь между ними будет установлена на более высоком иерархическом уровне. Междугородные станции объединены в сеть, состоящую из первичных, секционных и региональных коммутаторов. Все эти станции связываются друг с другом высокоскоростными **межстанционными линиями**. Число разного рода коммутационных центров, как и их топология (например, могут ли два секционных коммутатора связаться напрямую или они должны устанавливать связь через региональный коммутатор?), различается в разных странах и зависит от плотности расстановки телефонов на определенной территории. На рис. 2.17 изображено, как может быть установлен маршрут связи при среднем расстоянии между абонентами.

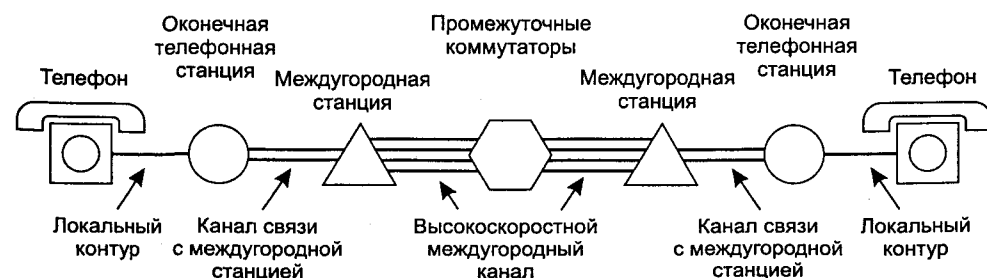


Рис. 2.17. Типичный маршрут связи при средней дистанции между абонентами

В телекоммуникациях применяется широкий спектр сред передачи данных. Местные линии связи строятся из витых пар категории 3, хотя на заре телефонии обычно использовались голые провода, располагавшиеся на расстоянии 25 см друг от друга. Для связи между коммутаторами широко используются коаксиальные кабели, микроволновая связь, все популярнее становятся оптоволоконные кабели.

В прошлом телефонная система была аналоговой, в виде электрического напряжения передавался сам голосовой сигнал. С появлением оптического волокна, цифровой электроники и компьютеров стала возможной цифровая передача сигнала на всех уровнях иерархии, кроме местных линий связи — последнего аналогового звена цепи. Цифровая связь предпочтительней потому, что нет необходимости в точности воспроизводить форму аналогового сигнала после того, как он проходит через множество коммутаторов и усилителей. Достаточно распознать лишь одно из двух состояний линии: 0 или 1. Это свойство делает цифровую передачу более надежной, чем аналоговая. К тому же она дешевле и проще в обслуживании.

В целом, телефонная система состоит из следующих трех компонентов.

1. Местные линии связи (аналоговые витые пары, подводящиеся в дома и офисы).
2. Магистральные каналы (цифровая связь на базе оптоволокна между коммутационными станциями).
3. Коммутационные станции (в них вызовы переадресуются с одних магистралей на другие).

После того как мы коснемся темы политики телефонии, мы вернемся к более подробному рассмотрению каждого из этих трех компонентов. Местные линии связи — это то, что соединяет каждого конкретного абонента со всей остальной системой, поэтому этот пункт чрезвычайно важен. Междугородным магистралям присуща фундаментальная проблема соединения множества вызовов в один и отправки его по единому кабелю. Это называется **уплотнением**, или мультиплексированием канала. Мы изучим три стратегии мультиплексирования. Наконец, есть два принципиально разных способа коммутации, которые мы также рассмотрим далее.

## Политика телефонии

На протяжении десятков лет, вплоть до 1984 года, корпорация Bell System предоставляла услуги в области как локальной, так и междугородной связи на большей части Соединенных Штатов. В 1970-х годах правительство США пришло к мнению, что такая монополия является незаконной, и подала судебный иск на компанию AT&T. Правительство выиграло судебный процесс, и 1 января 1984 году компания AT&T была разделена на AT&T Long Lines, 23 местных телефонных компании ВОС (Bell Operating Company) и еще несколько компаний. 23 компании ВОС были объединены в 7 региональных RBOC для повышения их экономической жизнеспособности. По решению суда (это не было актом Конгресса США) за одну ночь вся структура телекоммуникаций в США была изменена.

Детали этой процедуры были описаны в документе под названием **MFJ** (Modified Final Judgement — измененное окончательное судебное решение. Своего рода оксюморон: если решение могло быть изменено, значит, оно никак не окончательное.) Это событие привело к повышению конкуренции, снижению цен на дальнюю связь как для частных, так и для корпоративных абонентов. Однако одновременно с этим возросли цены на местную связь, поскольку был нарушен экономический баланс: раньше местные тарифы удерживались низкими именно за счет высоких междугородных тарифов. Во многих других странах сейчас рассматривается вопрос о конкуренции между аналогичными линиями.

Чтобы стало понятно, кто чем теперь должен был заниматься, Соединенные Штаты были разделены на 164 области, называемые **LATA** (Local Access and Transport Area — область локального доступа и транспорта). Области LATA приблизительно совпадали с областями, имеющими один и тот же телефонный код. В пределах LATA имелся один локальный оператор связи **LEC** (Local Exchange Carrier — местная телекоммуникационная компания), обладавший монополией на традиционные телефонные услуги в пределах области LATA. Наиболее важными операторами связи LEC являются компании **BOC**, хотя в некоторых областях LATA в роли LEC выступает одна из независимых телефонных компаний, общее число которых превышает 1500.

Связь между областями LATA поддерживалась оператором линии дальней связи **IXC** (InterExchange Carrier). Изначально компания AT&T Long Lines была единственным крупным оператором линии дальней связи, однако сегодня корпорации WorldCom и Sprint составляют ей серьезную конкуренцию. Одной из главных проблем при разделении корпорации AT&T было гарантировать, что все владельцы линий дальней связи обеспечат одинаковое качество связи, тарифы и количество цифр в номерах телефонов. Общий вид структуры изображен на рис. 2.18. На нем изображено три примера областей LATA с несколькими оконечными телефонными станциями в каждой из них. Области LATA 2 и 3 включают в себя также небольшую иерархическую структуру с транзитными станциями (внутренними для LATA междугородными станциями).

Любой владелец линий дальней связи может создать свой коммутатор, называемый **POP** (Point of Presence — точка присутствия), в области LATA для обработки звонков, исходящих из этой области. Подразумевается, что местный оператор связи LEC соединит каждого владельца линий дальней связи с каждой оконечной станцией либо напрямую, как в случае LATA 1 и 3 (рис. 2.18), либо через транзитные коммутаторы, как в случае LATA 2. Кроме того, условия соединения, как технические, так и финансовые, должны быть идентичными для каждого владельца линий дальней связи. В этом случае абонент, скажем, области LATA 1 сможет выбрать себе владельца линий дальней связи для звонков, например, в область LATA 3.

Одним из требований документа MFJ было запрещение владельцам линий дальней связи предоставлять услуги в области локальной связи, а операторам связи — в области междугородной связи. Однако никаких других ограничений наложено не было, и все эти компании могли, например, торговать жареными цыплятами и т. п. В 1984 году такой закон звучал вполне недвусмысленно. Однако развивающиеся технологии сыграли довольно злую шутку с законом, в ре-

зультате чего он оказался устаревшим. Дело в том, что ни кабельное телевидение, ни сотовая телефонная связь не фигурировали в решении суда. По мере того как кабельное телевидение из одностороннего превращалось в двустороннее, а сотовые телефоны становились все популярнее, как локальные операторы связи, так и владельцы линий дальней связи начали сливаться с операторами кабельной и сотовой связи или скупать их.

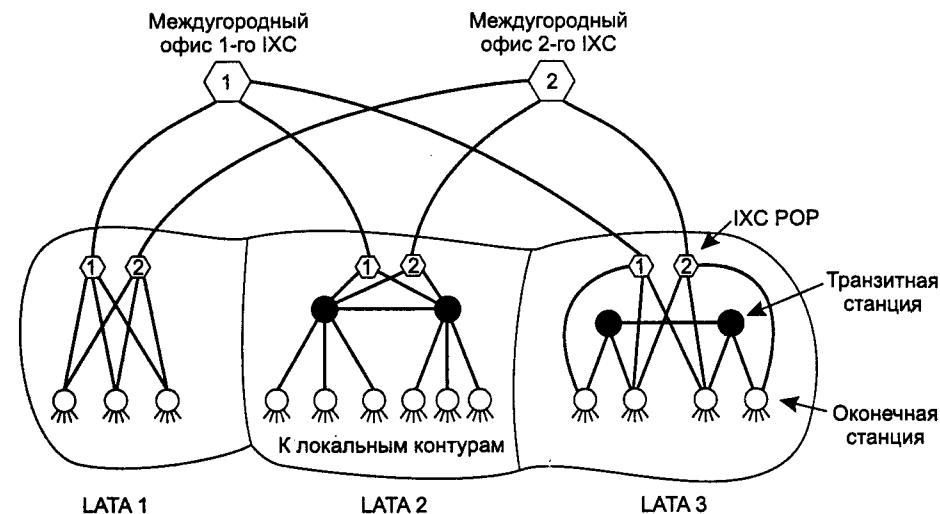


Рис. 2.18. Взаимоотношения между LATA, LEC и IXC. Кругами обозначены коммутаторы LEC. Шестиугольниками принадлежат IXC, номер которых указан внутри

В 1995 году Конгресс США счел невозможным дальнейшие попытки поддерживать различия между компаниями различного типа и издал проект закона, разрешающий компаниям, занимающимся кабельным телевидением, местным телефонным компаниям, операторам дальней связи и сотовым операторам предоставлять любые услуги этих смежных областей связи. Идея заключалась в том, чтобы позволить компаниям предоставлять клиентам единый интегрированный пакет услуг, включающий в себя кабельное телевидение, телефон и информационные сервисы. Таким образом, компании смогли бы соревноваться в качестве и цене услуг. В феврале 1996 года законопроект стал законом, в результате чего многие BOC превратились в IXC, а компании, занимавшиеся, например, кабельным телевидением, также стали предоставлять услуги местной телефонной связи, соперничая с LEC.

Одно интересное предписание можно найти в законе 1996 года: операторы местной связи должны были реализовать переносимость локальных номеров телефона. Это означало, что абонент мог сменить оператора, не меняя своего номера телефона. Именно необходимость смены номера была причиной, по которой многие клиенты оставались верными своей телефонной компании. Новое требование было направлено на повышение качества услуг за счет роста конкуренции между операторами местной связи. В результате телекоммуникационный ландшафт США вновь подвергся значительной реструктуризации. Этому примеру снова последовали многие страны. Часто так и происходит: мировое сообщество

наблюдает за экспериментами, проводящимися в Соединенных Штатах, и если их результаты оказываются положительными, то многие страны перенимают опыт. Если же результаты оставляют желать лучшего, то каждая страна пробует сделать что-то свое.

## Местные линии связи: модемы, ADSL, беспроводная связь

Пришло время вплотную заняться изучением принципов работы телефонной системы. Основные ее части изображены на рис. 2.19. Мы видим здесь местные линии, магистрали, а также междугородные и местные коммутационные станции, на каждой из которых установлено оборудование, осуществляющее маршрутизацию звонков. Оконечные телефонные станции в США и других крупных странах рассчитаны на 10 000 местных линий. И в самом деле, до недавних пор код региона вместе с кодом местной телефонной станции давал доступ к порядковому номеру абонента на этой станции. Например, (212) 601-xxxx дает доступ к телефонной станции 601, находящейся в регионе 212, к которой может быть подключено до 10 000 абонентов с номерами от 0000 до 9999. Однако по мере роста конкуренции в области локальной связи такая система становилась все менее приемлемой, поскольку слишком много компаний изъявляли желание получить собственный код оконечной станции. Чем больше становился код, тем сложнее становились схемы маршрутизации, которые должны были обеспечить нормальную работу системы.

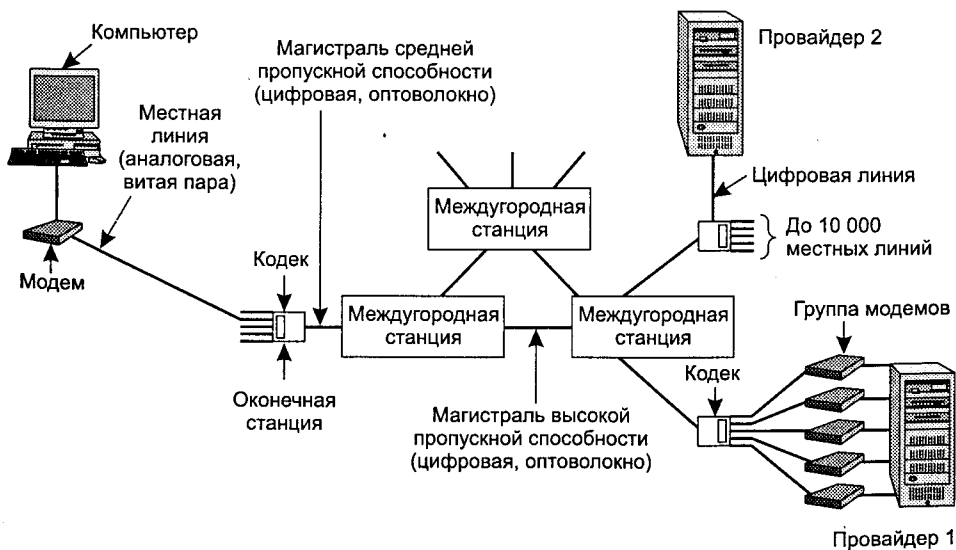


Рис. 2.19. Одновременное использование аналоговой и цифровой связи для соединения компьютеров. Преобразования осуществляются модемами и кодеками

Начнем с той части телефонной системы, с которой большинство людей знакомы очень хорошо. Итак, имеется двухпроводная линия, идущая от оконечной телефонной станции в дома и небольшие организации. Эта часть называется иног-

да **последней милей**, хотя длина местной линии на местности может составлять и несколько миль. На этом отрезке вот уже более 100 лет используется аналоговая связь, и похоже, что в ближайшие  $n$  лет ситуация не изменится (в основном из-за высокой стоимости перехода на цифровые линии). Тем не менее даже в этом последнем оплоте аналоговой связи мало-помалу происходят изменения. В данном разделе мы рассмотрим как традиционный подход к построению местных линий, так и новые тенденции, наблюдающиеся в этой области. Особое внимание уделим обмену данными при помощи домашних компьютеров.

Если компьютер желает отправить цифровые данные по аналоговой телефонной линии, то эти данные должны быть вначале преобразованы в аналоговые для передачи по местной линии. Преобразованием занимается устройство под названием **модем**, который мы вкратце изучим чуть позже. На оконечной станции телефонной компании данные вновь преобразуются в цифровые и отправляются по магистральному каналу.

Если на противоположном конце линии находится компьютер с модемом, то необходимо снова преобразовать сигнал из цифрового в аналоговый, чтобы он смог преодолеть «последнюю милю» и дойти до места назначения. Подобное решение изображено на рис. 2.19: у Провайдера 1 имеется набор модемов, каждый из которых подключен к своей местной линии связи. Этот провайдер может обрабатывать одновременно столько звонков, сколько модемов установлено на его сервере (предполагается, что вычислительных мощностей ему при этом хватает). Такой принцип работал до появления модемов со скоростью 56 Кбит/с. Скоро мы узнаем, что произошло дальше и почему.

Аналоговый сигнал представляет собой меняющееся во времени напряжение, с помощью которого и передается поток данных. Если бы среда передачи была идеальной, приемник получал бы сигнал, в точности повторяющий исходный. Но, к сожалению, таких сред в природе не существует, поэтому приходящий сигнал всегда несколько искажен относительно сигнала, передаваемого в линию отправителем. Если при этом речь идет о цифровых данных, то такие искажения могут привести к серьезным ошибкам.

Линии передачи всегда страдают от трех напастей — затухания, искажения из-за задержек, а также шума. Затухание, или **ослабление сигнала** — это потеря энергии сигналом по мере его распространения по каналу. Затухание выражается в децибелах на километр. Степень ослабления сигнала зависит от его частоты. Чтобы понять степень этой частотной зависимости, представьте себе сигнал в виде суммы гармоник ряда Фурье. Каждая гармоника ослабляется в различной степени, в результате чего приемник получает искаженный спектр сигнала.

Более того, разные гармоники ряда Фурье распространяются в среде передачи данных с разными скоростями. Это ведет к **искажению сигнала**, получаемого приемником.

Еще одной проблемой является **шум**, то есть нежелательная энергия от посторонних источников, примешивающаяся к энергии передаваемого сигнала. **Термальный** (тепловой) шум в электрическом проводе присутствует всегда — он вызван случайным тепловым движением электронов, и от него избавиться невозможно. **Перекрестные помехи** вызваны индукцией, возникающей между двумя близко расположенными проводами. Иногда во время телефонного разговора мож-

но услышать какой-то чужой разговор. Это и есть перекрестная помеха. Наконец, существует **импульсный шум**, вызванный скачками напряжения и другими случайными причинами. В случае цифровых данных импульсный шум может повредить несколько бит передаваемых данных.

## Модемы

Поскольку, как было отмечено ранее, ослабление и скорость распространения сигнала зависят от частоты, то было бы очень нежелательно иметь широкий спектр частот передаваемого сигнала. К сожалению, последовательности прямоугольных импульсов, соответствующие цифровому сигналу, имеют широкий спектр частот, следовательно, подвергаются значительному затуханию и искажению. Эти эффекты делают невозможной передачу в исходном диапазоне (при постоянном токе). Исключение может составлять только передача на малое расстояние при невысокой скорости.

Для решения этой проблемы вместо постоянного тока для передачи данных, особенно по телефонным линиям, применяется переменный ток. Непрерывный сигнал на частоте от 1000 до 2000 Гц называется **синусоидальной несущей частотой**. Амплитуда, частота и фаза несущей могут изменяться (модулироваться) для передачи информации. При **амплитудной модуляции** используются две различные амплитуды сигнала, соответствующие значениям нуля и единицы. При **частотной модуляции**, называемой также **частотной манипуляцией** (термин «манипуляция» широко используется в качестве синонима «модуляции»), для передачи цифрового сигнала используется несколько различных частот. При простейшей **фазовой модуляции** применяется сдвиг фазы несущей частоты на  $180^\circ$  через определенные интервалы времени. Улучшенным вариантом фазовой модуляции является сдвиг фазы на постоянный угол, например, на  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  или  $315^\circ$  для передачи 2 бит информации за один временной интервал. Можно также изменять фазу по окончании интервалов, что позволяет приемнику более четко распознать их границы.

На рис. 2.20 показаны три формы модуляции. Рисунок 2.20, б дает представление о том, как выглядит исходный сигнал при амплитудной модуляции. Амплитуда его либо ненулевая, либо равна нулю. На рис. 2.20, в показано, что тот же исходный сигнал кодируется двумя разными частотами. Наконец, из рис. 2.20, г видно, что два состояния кодируются наличием либо отсутствием фазового сдвига на границе каждого бита.

Устройство, принимающее последовательный поток битов и преобразующее его в выходной сигнал, модулируемый одним или несколькими из приведенных способов, а также выполняющий обратное преобразование, называется **модемом** (сокращение от «модулятор-демодулятор»). Модем устанавливается между (цифровым) компьютером и (аналоговой) телефонной линией.

Добиться увеличения скорости простым увеличением частоты дискретизации невозможно. Теорема Найквиста утверждает, что даже при наличии идеального канала с частотой 3000 Гц (каковым телефонная линия не является) невозможно передавать отсчеты сигнала чаще, чем с частотой 6000 Гц. На практике большинство модемов делают 2400 отсчетов в секунду и стремятся не к повышению этого значения, а к повышению числа бит на отсчет.

Число отсчетов (сэмплов) в секунду измеряется в **бодах**. За каждый бод передается один **символ**. Таким образом, линия, работающая со скоростью  $n$  бод, передает  $n$  символов в секунду. Например, линия со скоростью 2400 бод отправляет 1 символ за 416,667 мкс. Если символ состоит из двух состояний линии (к примеру, 0 В означает логический ноль, 1 В означает логическую единицу), то битовая скорость составляет 2400 бит/с. Если же используются четыре уровня напряжений (например, 0, 1, 2, 3), тогда каждый символ будет состоять уже из двух бит, поэтому та же самая линия на 2400 бод сможет передавать все те же 2400 символов в секунду, но уже с битовой скоростью 4800 бит/с. Аналогично, можно задать четыре степени фазового сдвига вместо двух, тогда и модулированный сигнал будет кодировать один символ двумя битами, а битовая скорость, опять же, будет в два раза выше. Такой метод применяется очень широко и называется **квадратурной фазовой манипуляцией, QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)**.

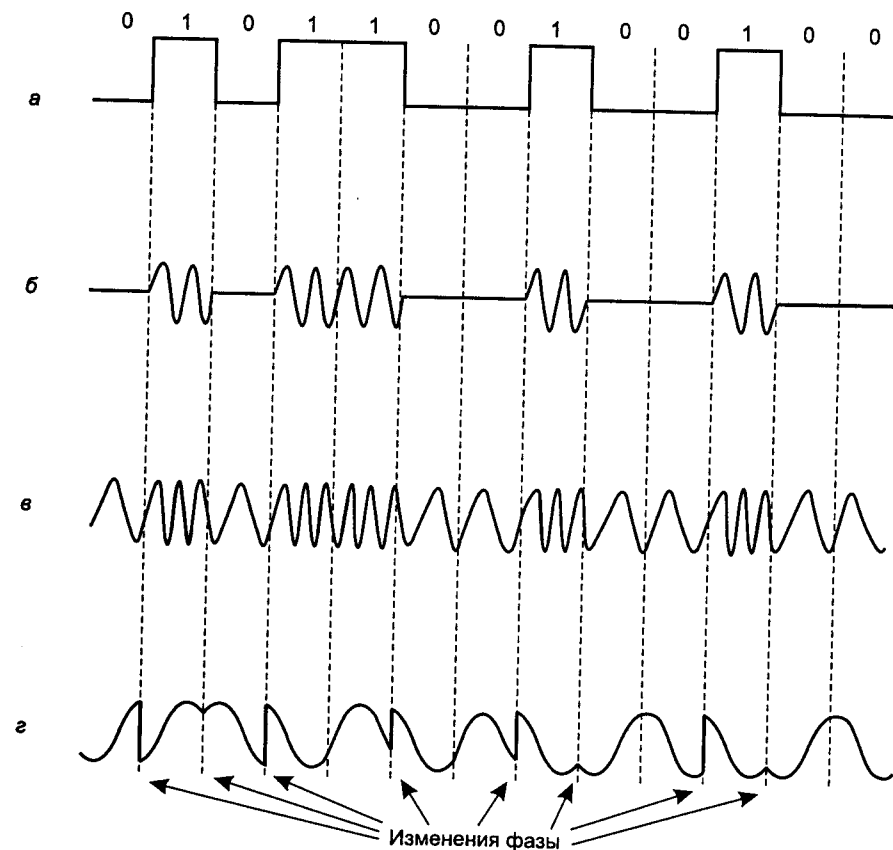


Рис. 2.20. Двоичный сигнал (а); амплитудная модуляция (б); частотная модуляция (в); фазовая модуляция (г)

Понятия полосы пропускания, бода, символа и битовой скорости часто путают, поэтому сейчас необходимо поставить все на свои места и четко определить.

Полосой пропускания среды называется диапазон частот, которые могут передаваться в этой среде с минимальным затуханием. Это физическое свойство материала. Полоса варьируется обычно от 0 до какого-то максимального значения и измеряется в герцах (Гц).

Скорость двоичной передачи, *baud rate* (в бодах) — это число отсчетов, совершаемых за одну секунду. Каждый отсчет передает единицу информации, то есть символ. Таким образом, скорость двоичной передачи равна скорости передачи символов. Метод модуляции (например, QPSK) определяет число бит, из которых состоит один символ.

Битовой скоростью называется объем информации, передаваемый по каналу за секунду. Битовая скорость равна произведению числа символов в секунду и числа бит на символ (символ/с × бит/символ).

Все хорошие модемы используют комбинированные методы модуляции сигналов для передачи максимального количества бит в одном бode. Зачастую, например, комбинируются амплитудная и фазовая модуляции. На рис. 2.21, а изображены точки, расположенные под углами 45, 135, 225 и 315°, с постоянным уровнем амплитуды (это видно по расстоянию до них от начала координат). Фаза этих точек равна углу, который линия, проведенная через точку и начало координат, составляет с положительным направлением горизонтальной оси. На рис. 2.21, а видно, что возможны четыре положения фазового сдвига, значит, можно передавать 2 бита на символ. Это метод QPSK.

На рис. 2.21, б изображен другой комбинированный метод модуляции, использующий 16 комбинаций амплитудных и фазовых сдвигов. С его помощью можно передавать уже 4 бита на символ. Такая схема называется **квадратурной амплитудной модуляцией**, или **QAM-16** (Quadrature Amplitude Modulation). Она может, например, использоваться для передачи 9600 бит/с по линии с пропускной способностью 2400 бод.

На рис. 2.21, в изображен еще один метод, комбинирующий амплитудную и фазовую модуляции. С помощью 64 комбинаций можно в один символ поместить 6 бит. Метод называется **QAM-64**. Существуют схемы QAM и более высоких порядков.

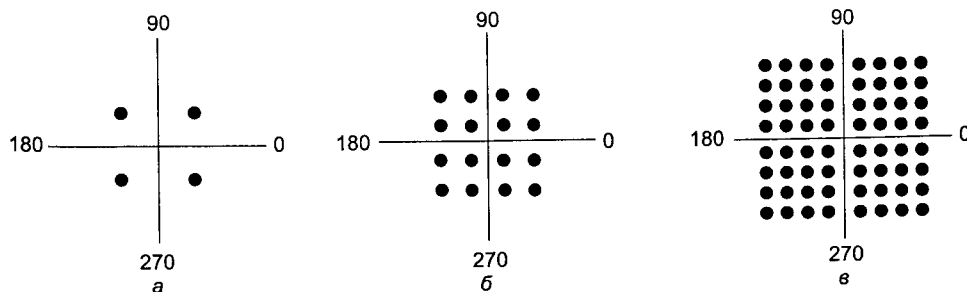


Рис. 2.21. QPSK (а); QAM-16 (б); QAM-64 (в)

Диаграммы, показывающие допустимые комбинации амплитуд и фаз (как на рис. 2.21), называются **амплитудно-фазовыми диаграммами** (диаграммами со-

звездий). У каждого стандарта высокоскоростных модемов есть своя диаграмма. Такой модем может общаться только с теми модемами, которые используют ту же диаграмму (хотя более быстрые модемы обычно могут эмулировать диаграммы всех более медленных модемов).

Чем больше точек находится на амплитудно-фазовой диаграмме, тем больше вероятность того, что даже слабый шум при детектировании амплитуды или фазы приведет к ошибке и порче битов. Для уменьшения этой вероятности были разработаны стандарты, подразумевающие включение в состав каждого отсчета нескольких дополнительных битов коррекции. Такие схемы называются **решетчатым кодированием**, или **ТСМ** (Trellis-Coded Modulation). Так, например, стандарт V.32 имеет 32 точки на диаграмме для передачи 4 бит/символ и 1 контрольный бит на линии 2400 бод, что позволяет достигнуть скорости 9600 бит/с с коррекцией ошибок. Амплитудно-фазовая диаграмма для V.32 показана на рис. 2.22, а. Идея «повернуть» диаграмму на 45° была вызвана некоторыми техническими соображениями; понятно, что информационная емкость «повернутых» и «не повернутых» диаграмм одна и та же.

Следующим шагом после скорости 9600 бит/с стала скорость 14 400 бит/с. Новый стандарт был назван **V.32 bis**. Такая скорость достигается передачей 6 бит данных и 1 контрольного бита на отсчет при частоте дискретизации 2400 бод. Амплитудно-фазовая диаграмма (рис. 2.22, б) состоит из 128 точек при использовании QAM-128. Эта скорость используется факс-модемами для передачи страниц, отсканированных в виде растровых изображений. QAM-256 не используется в обычных модемах для телефонных линий, зато применяется в кабельных сетях, как мы увидим далее.

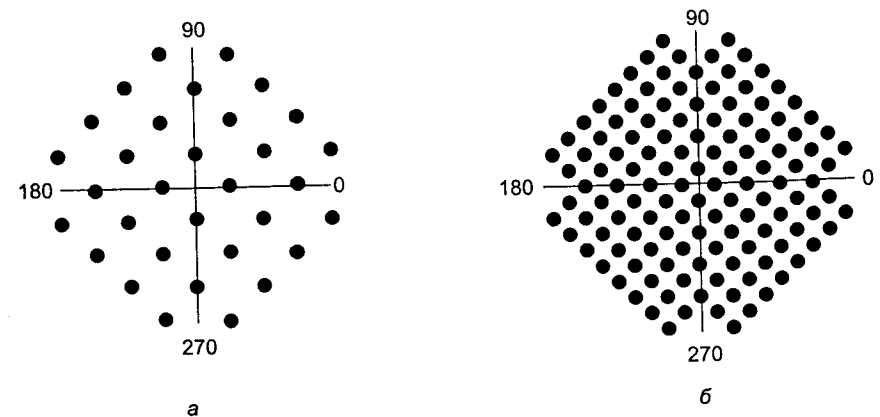


Рис. 2.22. V.32 для 9600 бит/с (а); V.32 для 14 400 бит/с (б)

Следующим телефонным стандартом после стандарта V.32 bis является **V.34** со скоростью 28 800 бит/с при частоте дискретизации 2400 бод и 12 битах данных на символ. Последние модемы этой серии были сделаны в соответствии со стандартом **V.34 bis** и использовали 14 бит/символ при 2400 бод, за счет чего была достигнута скорость 33 600 бит/с.

Для дальнейшего повышения скорости необходимо было прибегать к всяческому уловкам. Так, например, многие модемы используют предварительное сжатие данных, что позволяет превысить порог эффективной скорости передачи данных, составляющий 33 600 бит/с. С другой стороны, почти все модемы прослушивают линию перед началом передачи, и если обнаруживается, что ее качество недостаточно высоко, то они автоматически понижают скорость относительно своего максимума. Таким образом, *эффективная* скорость модема при его работе в реальных условиях может оказаться как ниже, так и выше официально заявленной.

Все современные модемы позволяют передавать данные одновременно в обоих направлениях (используя разные частотные диапазоны для каждого из направлений). Соединения, обладающие такой возможностью, называются **дуплексными**. Скажем, двухпутная железная дорога, по которой поезда могут перемещаться во встречных направлениях, является своеобразной дуплексной линией связи. Соединение с возможностью поочередной передачи данных в каждом из направлений называется **полудуплексным**. Примером полудуплексной линии является однопутная железная дорога. Наконец, соединение, при котором данные можно отправлять только в одном направлении, называется **симплексным**. Примером может служить дорога с односторонним движением. Еще один пример — оптоволокно с лазером на одном конце и фотоприемником на другом.

Ограничение скорости телефонных линий тридцатью пятью килобитами в секунду, обоснованное Шенноном, заставило разработчиков модемов остановиться на скорости 33 600 бит/с. Дальнейшее ускорение невозможно в силу законов термодинамики. Чтобы узнать, могут ли на самом деле модемы работать со скоростью 56 Кбит/с, следите внимательно за дальнейшими рассуждениями.

Чем объясняется теоретический предел в 35 Кбит/с? Это связано, прежде всего, со средней протяженностью местных линий связи и их качеством. Да, число 35 Кбит/с определяется длиной местных линий. На рис. 2.19 вызов, инициированный компьютером, находящимся слева, идет к Провайдеру 1 по двум местным линиям связи и имеет при этом форму аналогового сигнала. Первый раз это случается на стороне отправителя, второй раз — рядом с получателем. И там, и там на сигнал накладываются шумы. Если нам удастся избавиться каким-то образом от этих двух «последних миль», то максимальную скорость можно будет удвоить.

Именно эту идею использует Провайдер 2 (рис. 2.19). К нему от ближайшей оконечной телефонной станции протянута полностью цифровая линия. Сигналу, снимаемому с магистральной линии, не приходится иметь дело с кодеками, модемами, АЦП и ЦАП. Когда хотя бы на одном конце соединения отсутствует «последняя миля» (а большинство провайдеров сейчас уже пользуются только цифровыми каналами), максимальная скорость передачи повышается до 70 Кбит/с. Если же соединение устанавливается между двумя обычными пользователями, каждый из которых передает данные по аналоговой местной линии с помощью модема, максимальная скорость ограничена 33 600 бит/с.

Причина, по которой используются модемы со скоростью 56 Кбит/с, связана с теоремой Найквиста. Телефонная линия имеет полосу пропускания около

4000 Гц (включая защитные полосы). Таким образом, максимальное число независимых отсчетов в секунду — 8000. Число бит на отсчет, используемое в США, равно 8, причем 1 бит является контрольным, что позволяет передавать пользовательские данные с битовой скоростью 56 000 бит/с. В Европе все 8 бит являются информационными, поэтому, в принципе, максимальная скорость может достигать 64 000 бит/с, однако международным соглашением установлено ограничение в 56 000 бит/с.

Этот стандарт называется **V.90**. Он предоставляет пользователю возможность передачи данных в сторону провайдера со скоростью 33,6 Кбит/с, а в обратную сторону — со скоростью 56 Кбит/с. Причиной такого рассогласования скоростей является тот очевидный факт, что трафик от абонента обычно во много раз меньше трафика от провайдера (например, запрос веб-страницы — это всего лишь несколько байт, тогда как сама страница может иметь размеры, измеряемые мегабайтами). Теоретически, можно расширить канал от абонента и сделать его более скоростным, чем 33,6 Кбит/с, но многие линии слишком зашумлены и далеко не всегда выдерживают даже такую скорость. Поэтому было принято решение выделить основную часть полосы под поток данных от провайдера, давая ему тем самым шанс работать со скоростью 56 Кбит/с.

Следующим стандартом после V.90 стал **V.92**. Модемы V.92 могут отправлять данные со скоростью 48 Кбит/с, если на линии достаточно низкий уровень помех. Возможная скорость линии определяется в течение примерно половины обычного 30-секундного интервала, необходимого более старым модемам. Наконец, они имеют одну интересную функцию: при включенном режиме ожидания звонка входящий телефонный звонок разрывает интернет-сеанс.

## Цифровые абонентские линии

Когда скорость связи по телефонным линиям достигла своего, по-видимому, конечного значения 56 Кбит/с, создалось впечатление, что развитие на этом остановится. Между тем каналы кабельного телевидения стали предлагать своим абонентам 10 Мбит/с при работе по общему кабелю, а спутниковые системы — до 50 Мбит/с. Доступ к Интернету стал неотъемлемой частью бизнеса таких операторов. И телефонные компании (прежде всего, уровня ЛЕС) поняли, что необходимо двигаться дальше, создавая более конкурентоспособные системы. Для этого нужно было предоставить цифровые услуги конечным пользователям, используя местные линии. Системы, использующие каналы с расширенной пропускной способностью, иногда называют **широкополосными сетями**, хотя такой термин является скорее коммерческим, а не техническим.

Вскоре появилось множество предложений, носящих общее название **xDSL** (Digital Subscriber Line — цифровая абонентская линия), где вместо буквы *x* могли стоять другие буквы. Мы обсудим их, сделав основной упор на технологию, которая вскоре, похоже, станет самой популярной в этой области, — **ADSL** (Asymmetric DSL — асимметричная DSL). Поскольку окончательные стандарты для ADSL еще не утверждены, то некоторые детали, описываемые далее, со временем могут измениться, однако основной принцип останется, очевидно, неиз-



менным. Чтобы узнать больше про ADSL, читайте (Summers, 1999; Vetter и др., 2000).

Причиной, по которой модемы являются такими медленными устройствами, является то, что телефонные линии, по которым они традиционно работали, были изобретены для передачи человеческой речи, и вся система была направлена на оптимизацию именно в этом аспекте. Данные всегда оставались пасынками телефонной системы. В той точке, где заканчивается местная линия (оконечная телефонная станция), сигнал подвергается фильтрации, при которой вырезаются частоты ниже 300 Гц и выше 3400 Гц. Отсечка не является прямоугольной — оба края имеют уровень 3 дБ, поэтому полоса пропускания считается равной 4000 Гц, хотя на самом деле диапазон между двумя этими краями составляет только 3100 Гц. Таким образом, цифровым данным приходится пробираться по этому узкому каналу.

Хитрость, за счет которой работает xDSL, заключается в том, что ее абоненты подключаются к особому коммутатору, на котором отсутствует описанный ранее фильтр. Таким образом, на передачу данных отводится вся полоса пропускания местной линии. Лимитирующим фактором в этом случае становится сама физическая природа линии, а не искусственно вырезанный кусок диапазона в 3100 Гц.

К сожалению, емкость местных линий зависит от нескольких факторов, среди которых длина, толщина и собственно качество канала. График зависимости потенциально достижимой пропускной способности от длины линии приведен на рис. 2.23. Здесь предполагается, что все остальные факторы являются оптимальными (новые провода, аккуратные кабели и т. д.).

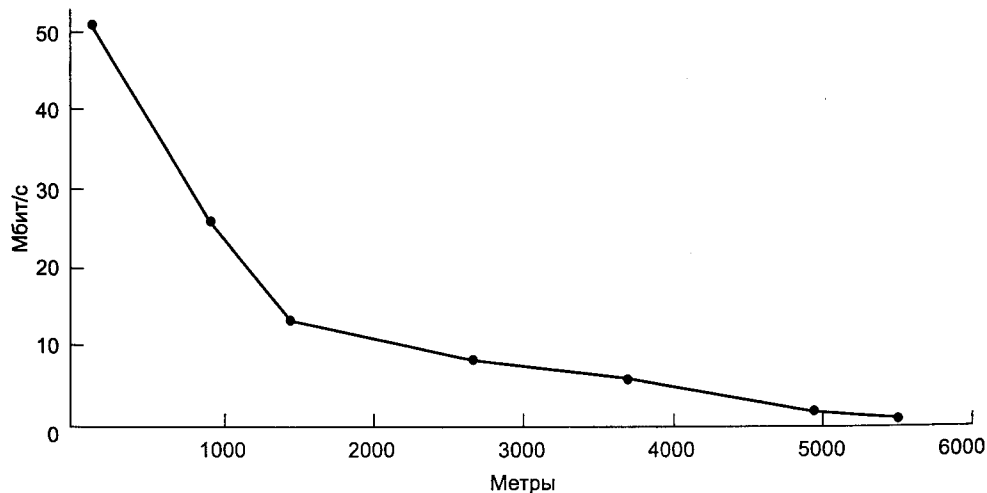


Рис. 2.23. Зависимость пропускной способности от расстояния для DSL по UTP категории 3

Реализация такой зависимости создает определенные проблемы для телефонной компании. Когда заявляется определенная скорость работы, автоматически ограничивается радиус, за пределами которого данное предложение не

может быть реализовано. Это означает, что когда приходит клиент, живущий достаточно далеко от телефонной станции, ему говорят: «Спасибо за проявленный интерес, но вы живете на 100 метров дальше от нас, чем нужно для того, чтобы стать нашим абонентом. Не могли бы вы переехать поближе?» Чем ниже предлагаемая скорость, тем больше радиус охвата и количество клиентов. Но, вместе с тем, чем ниже скорость, тем менее привлекательным выглядит предложение и тем меньше абонентов согласится выкладывать свои деньги. Это такой перекресток, на котором встречаются бизнес и технология. (Можно предложить, конечно, поставить мини-АТС в каждом микрорайоне, но это слишком дорогое решение.)

Службы xDSL разрабатывались с определенной целью. Во-первых, они должны были работать на существующих местных линиях, представляющих собой витые пары категории 3. Во-вторых, они не должны были влиять на работу аппаратуры абонента вроде телефона и факса. В-третьих, скорость работы должна была быть выше 56 Кбит/с. Наконец, в-четвертых, они должны были предоставлять постоянное подключение, и услуги при этом должны были оплачиваться только в виде фиксированной ежемесячной абонентской платы, но никак не поминутно.

Первое предложение ADSL исходило от компании AT&T и работало за счет разделения спектра местной линии, который составляет примерно 1,1 МГц, на три частотных диапазона. Вот они: диапазон обычной телефонной сети, POTS (Plain Old Telephone Service); исходящий диапазон (от абонента); входящий диапазон (от АТС). Технология, в которой для разных целей используются разные частоты, называется частотным уплотнением или частотным мультиплексированием. Далее мы изучим ее очень подробно. Другие операторы использовали несколько иной подход, и он нам кажется наиболее перспективным, поэтому сейчас мы его опишем.

Итак, альтернативный метод под названием **дискретная мультитональная модуляция, DMT (Discrete MultiTone)**, иллюстрируется на рис. 2.24. Суть его состоит в разделении всего спектра местной линии шириной 1,1 МГц на 256 независимых каналов по 4312,5 Гц в каждом. Канал 0 — это POTS. Каналы с 1 по 5 не используются, чтобы голосовой сигнал не имел возможности интерферировать с информационным. Из оставшихся 250 каналов один занят контролем передачи в сторону провайдера, один — в сторону пользователя, а все прочие доступны для передачи пользовательских данных.

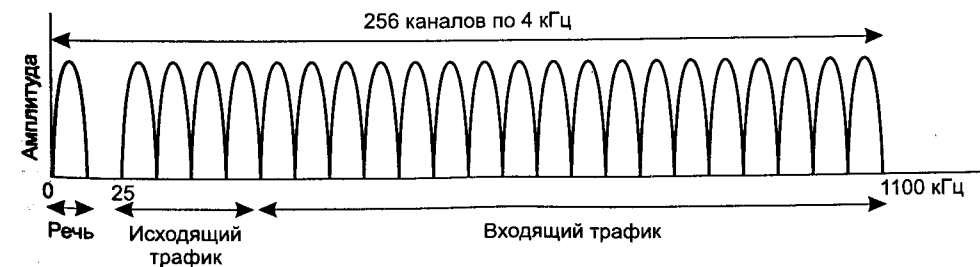


Рис. 2.24. Работа ADSL с использованием дискретной мультитональной модуляции

В принципе, каждый из свободных каналов может быть использован для полудуплексной передачи, однако из-за помех, взаимной интерференции и т. д. практически это не реализуется. Провайдер может самостоятельно определять, сколько каналов использовать для входящего трафика, сколько для исходящего. Технически возможно осуществлять такое разделение в пропорции 50/50, но фактически большинство провайдеров предоставляет 80–90 % пропускной способности для передачи в сторону абонентов, исходя из их реальных потребностей. Обычно под исходящий трафик пользователю отводится 32 канала, по всем остальным информационным каналам он может принимать данные. В целях увеличения пропускной способности можно несколько последних каналов сделать дуплексными, однако это потребует введения в строй дополнительных схем, исключающих образование эха.

Стандарт ADSL (ANSI T1.413 и ITU G.992.1) позволяет принимать входящий трафик со скоростью 8 Мбит/с и отправлять исходящий со скоростью 1 Мбит/с. Тем не менее, лишь немногие провайдеры обеспечивают работу с такими параметрами. Стандартной услугой является 512 Кбит/с для входящего потока и 64 Кбит/с для исходящего. За дополнительную плату можно получить 1 Мбит/с и 256 Кбит/с в соответствующих направлениях.

В каждом канале используется схема модуляции, напоминающая V.34, хотя скорость отсчетов равна 4000 бод, а не 2400 бод, как в обычном телефонном стандарте. Качество линии отслеживается каждым каналом, и скорость передачи постоянно подстраивается под этот параметр, поэтому каналы могут иметь разную скорость. Сами данные передаются с помощью метода модуляции QAM, количество бит на бод достигает при этом 15, а амплитудно-фазовая диаграмма аналогична представленной на рис. 2.21, б. Пропускная способность входящего трафика при отведенных для него 224 каналах и 15 бит на отсчет на линии 4000 бод составляет 13,44 Мбит/с. На практике соотношение сигнал/шум никогда не бывает достаточным для достижения такой скорости, однако 8 Мбит/с на коротких дистанциях и качественных линиях — это реально. Данное обстоятельство стимулирует развитие и распространение стандарта.

Типичная организация ADSL-линии показана на рис. 2.25. На схеме видно, что телефонная компания установила в помещении у абонента специальное **устройство сопряжения с сетью, NID (Network Interface Device)**. Эта маленькая пластмассовая коробочка маркирует окончание зоны владений телефонной компании и начало частной собственности абонента. Недалеко от этого устройства (а иногда вообще в одном блоке с ним) расположен **разветвитель**, который представляет собой аналоговый фильтр, отделяющий полосу POTS (0–4000 Гц) от каналов данных. Сигналы, проходящие по POTS, передаются на имеющийся телефон или факс, а все остальные отправляются на ADSL-модем. Последний является, на самом деле, цифровым сигнальным процессором, настроенным на работу в качестве двухсот пятидесяти QAM-модемов, работающих одновременно на разных частотах. Поскольку большинство модемов ADSL — внешние, то требуется организовать высокоскоростное соединение модема с системным блоком компьютера. Обычно это делается с помощью сетевой карты Ethernet со стороны компьютера. При этом организуется миниатюрная локальная сеть Ether-

net, состоящая из двух узлов: компьютера и модема. Изредка применяется USB-порт вместо Ethernet. В будущем, несомненно, появятся внутренние ADSL-модемы<sup>1</sup>.

На противоположном конце кабеля, на оконечной коммутационной станции, также установлен разветвитель. Здесь голосовая составляющая сигнала отделяется от информационной и пересылается на обычный телефонный коммутатор. Сигнал, передающийся на частотах, превышающих 26 кГц, отправляется на устройство нового типа, которое называется **мультиплексором доступа к DSL, DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer)**, в состав которого в качестве ADSL-модема входит сигнальный процессор того же типа, что и у абонента. По мере восстановления по цифровому сигналу битовой последовательности формируются пакеты, отсылающиеся провайдеру.

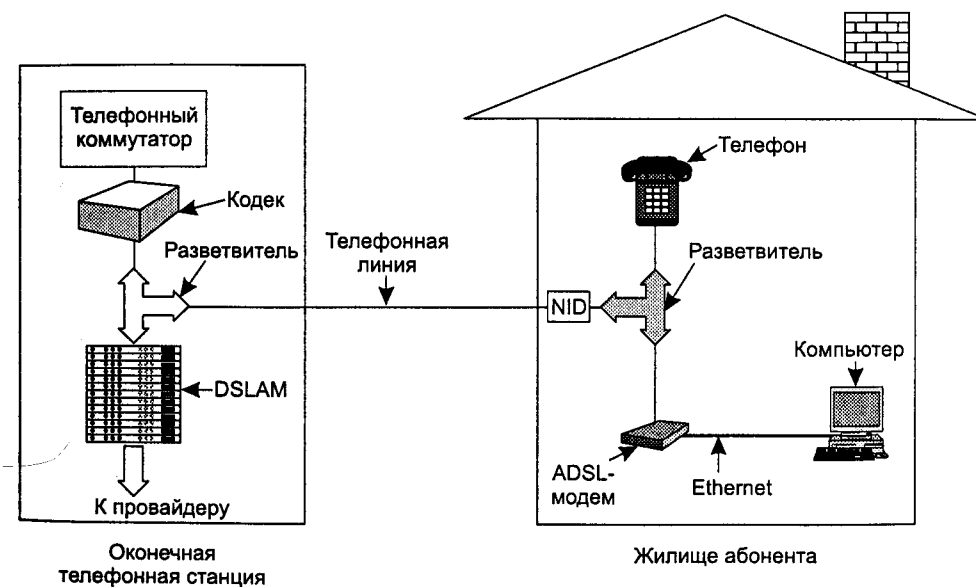


Рис. 2.25. Типичная конфигурация оборудования ADSL

Полное разделение голосовой связи и системы передачи данных позволило телефонным компаниям без особых проблем внедрить ADSL. Требуется всего лишь приобрести DSLAM и разветвитель и подсоединить абонентов ADSL к этому разветвителю. Прочие системы с высокой пропускной способностью (например, ISDN) требуют гораздо больших усилий для их внедрения и согласования с имеющимся коммутационным оборудованием.

Одним из недостатков представленной на рис. 2.25 системы является наличие NID и разветвителя в жилище пользователя. Установить это оборудование мо-

<sup>1</sup> Внутренние ADSL-модемы уже появились на российском рынке (например, семейство устройств CNAD-800, разработка CNet Technology). — *Примеч. перев.*

жет только технический специалист телефонной компании, что выражается, прежде всего, в высокой стоимости выездных услуг. По этой причине был стандартизован другой вариант комплектации — в нем отсутствует разветвитель. Его неофициально называют G.lite, а в соответствии со спецификацией ITU этот стандарт носит название **G.992.2**. Фактически, это та же самая схема, но без разветвителя. Имеющаяся телефонная линия используется как есть. Единственное, что пользователю необходимо сделать, это вставить в разъем каждого телефонного аппарата специальный микрофильтр, который в итоге должен оказаться в схеме между телефоном или ADSL-модемом и телефонной линией. Телефонный микрофильтр вырезает сигналы, частоты которых превышают 3400 Гц. Что же касается фильтра для ADSL-модема, то он, напротив, пропускает только высокие частоты, вырезая диапазон от 0 до 26 кГц. Однако система с разветвителем является более надежной, поэтому максимальная скорость работы G.lite — только 1,5 Мбит/с (против 8 Мбит/с в системах с разветвителем). При любом из вариантов на стороне телефонной станции разветвитель устанавливается, но это не требует выезда технического специалиста для подключения каждого абонента.

ADSL — это просто стандарт физического уровня. Что творится на более высоких уровнях, зависит от конкретной ситуации. Часто используется ATM благодаря способности этой технологии обеспечивать надлежащее качество обслуживания, а также благодаря широкому применению ATM в ядре телефонных сетей.

### Беспроводные местные линии

Начиная с 1996 года, в США (и чуть позднее в других странах) компании получили законную возможность конкурировать с бывшими монополистами — местными телефонными компаниями (LEC). Компании, существующие со стародавних времен, получили даже специальное название — **ILEC** (Incumbent LEC — компания, занимающая должность LEC). Наиболее вероятными кандидатами на их место стали компании междугородной связи (IXC). Любая IXC, желающая заняться предоставлением местной связи, обязана проделать следующие шаги. Во-первых, необходимо приобрести или взять в аренду помещение под свою первую в городе оконечную станцию. Во-вторых, нужно наполнить это помещение оборудованием: коммутаторами, разветвителями и т. д. Все это можно запросто приобрести, поскольку производством подобной аппаратуры занимаются многие фирмы. В-третьих, необходимо протянуть оптическое волокно между своей коммутационной станцией и ближайшей местной телефонной станцией, чтобы абоненты имели доступ к национальной телефонной сети. В-четвертых, нужно привлечь к себе пользователей, предложив им более высокое качество обслуживания при более низких ценах по сравнению с ILEC.

После этого начинается самое сложное. Представьте себе, что пользователи действительно встрепенулись и побежали занимать очередь. Каким образом новорожденная местная телефонная компания, **CLEC** (Competitive LEC — LEC-конкурент), сможет обеспечить подключение абонентских телефонов и компьютеров к своей сияющей новизной коммутационной станции? Покупка права на прокладку кабеля и реализация этого права обошлись бы чрезвычайно дорого.

Многие CLEC нашли альтернативу традиционной витой паре в **беспроводной локальной линии, WLL** (Wireless Local Loop).

В некотором смысле стационарный телефон, использующий беспроводную локальную линию, больше напоминает мобильный телефон, однако есть три принципиальных технических отличия. Во-первых, пользователю такой системы требуется высокоскоростной доступ в Интернет. Причем, скорость должна быть по крайней мере равна скорости ADSL. Во-вторых, скорее всего, абонент не ожидает, что для установки системы ему потребуется технический специалист из фирмы, который поставит на крыше направленную антенну. В-третьих, пользователь не собирается никуда перемещаться вместе со своим телефоном и настольным компьютером, что исключает проблемы, связанные с мобильностью и организацией сотовой связи. Таким образом, появилась новая услуга — стационарная беспроводная связь (то есть телефонная связь и интернет-услуги, совмещенные в одной беспроводной системе).

Хотя первые WLL начали серьезно работать в 1998 году, нам нужно сперва вернуться в далекий 1969 год, чтобы узнать о происхождении этих систем. Именно тогда комиссия FCC разместила 2 образовательных телевизионных канала (по 6 МГц каждый) в диапазоне 2,1 ГГц. В последующие годы добавился еще 31 канал в диапазоне 2,5 ГГц, заняв в целом полосу шириной 198 МГц.

Образовательные каналы никуда не исчезали, но в 1998 году FCC отобрала частоты и разместила на них двухстороннюю радиосвязь. Тотчас же на базе этого диапазона стали развиваться беспроводные локальные линии. На таких частотах длина волны составляет 10–12 см и может распространяться на расстояние до 50 км, неплохо проникая сквозь любую растительность и дождевую завесу. И вот все 198 МГц вскоре оказались заняты беспроводными локальными линиями. Данный сервис получил название **многоканальной многоадресной распределительной службы, MMDS** (Multichannel Multipoint Distribution Service). Систему MMDS, как и обсуждаемую далее родственную ей LMDS, можно рассматривать в качестве региональной вычислительной сети (MAN).

Одним из достоинств данной услуги является то, что базовая технология уже хорошо развита, и оборудование, обеспечивающее ее работу, производится уже давно. Главный недостаток заключается в том, что полоса пропускания весьма ограничена и должна разделяться между большим количеством пользователей, расположенных на весьма немалой территории.

Узкая полоса пропускания MMDS привела к тому, что разработчики заинтересовались миллиметровыми волнами, которые могли бы стать альтернативой стандартному диапазону. В диапазонах 28–31 ГГц (в США) и 40 ГГц (в Европе) никто не работает, поскольку не так просто создать кремниевые интегральные схемы, работающие с подходящей скоростью. Проблема была решена, когда появились схемы, построенные на арсениде галлия. Появилась возможность использовать миллиметровые диапазоны в радиокommunikациях. В ответ на это достижение комиссия FCC предоставила полосу шириной 1,3 ГГц новой службе беспроводной местной связи — **LMDS** (местная многоадресная распределительная служба). Это была беспрецедентная акция FCC, поскольку никогда под одно

применение не выделялась столь широкая полоса. В Европе для LMDS была выделена примерно такая же полоса, но на частотах начиная с 40 ГГц.

Работа LMDS изображена на рис. 2.26. Показана вышка с несколькими антеннами, направленными в разные стороны. Поскольку миллиметровые волны довольно-таки узконаправленные, каждая антенна захватывает свой сектор, не связанный с другими. Зона приема на используемых частотах ограничена 2–5 км. Это означает, что для того, чтобы услугами LMDS мог пользоваться большой город, необходимо установить множество таких башен.

Как и ADSL, LMDS использует асимметричное распределение полосы пропускания, отдавая предпочтение входящему трафику пользователя. В результате каждый сектор, разделяемый между всеми пользователями, может передавать данные со скоростями 36 Гбит/с и 1 Мбит/с (соответственно для каждого из направлений передачи). Если, скажем, каждый пользователь скачивает три 5-килобайтных веб-страницы в минуту, то на него уходит примерно 2000 бит/с. Это означает, что всего в секторе могут одновременно работать 18 000 таких пользователей. Тем не менее, чтобы уменьшить задержки, обычно ограничиваются 9 тысячами абонентов. Имея 4 сектора (см. рис. 2.26), получаем аудиторию, состоящую из 36 000 абонентов. Предполагая, что в час пик на линии находится каждый третий абонент, можно рассчитывать на 100 000 клиентов, пользующихся одной и той же башней и находящихся на расстоянии менее 5 км от нее. Примерно так представляют себе ситуацию многие компании CLEC. Исходя из этих подсчетов, они сделали вывод о том, что при весьма скромных вложениях в систему можно получать от нее высокий доход, конкурируя с телефонными компаниями и традиционными провайдерами. Предлагаемая скорость передачи при этом сравнима с кабельным телевидением, а цены гораздо ниже.

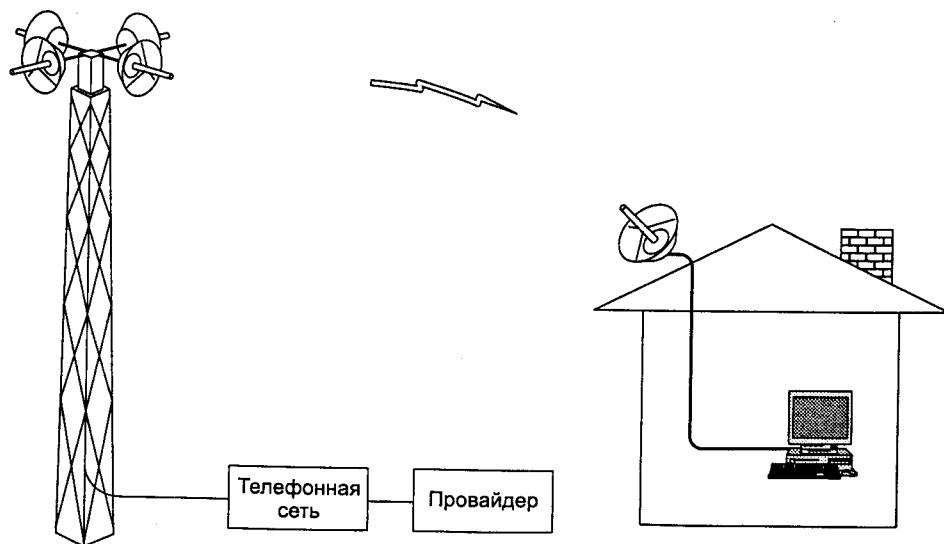


Рис. 2.26. Архитектура системы LMDS

Тем не менее, есть определенные проблемы и в технологии LMDS. Во-первых, миллиметровые волны распространяются исключительно по прямой, поэтому антенны, установленные на башнях, должны находиться в зоне прямой видимости антенн, установленных на крышах домов. Неплохо вбирают в себя сигнал любопытные листья деревьев, поэтому башни должны быть достаточно высокими, чтобы на пути сигнала не оказалось растений. При этом декабрьская «чистая линия» сильно отличается от июльской, когда на деревьях много зелени. Дождь также вбирает в себя сигнал. В некоторой степени можно исключить возникающие из-за этого ошибки путем применения специальных кодов с коррекцией ошибок или повышения мощности передатчиков при плохих погодных условиях. И все же идеальным для LMDS является сухой климат. Скажем, в Санкт-Петербурге эта система будет работать значительно хуже, чем в Баку.

Беспроводные местные линии не войдут в моду до тех пор, пока не будут разработаны официальные стандарты, которые заставят производителей оборудования создавать такую продукцию, которую абонентам не пришлось бы менять при смене компании CLEC. Для создания этого стандарта институт IEEE выделил отдельный комитет 802.16. Результаты его работы были опубликованы в апреле 2002 года. IEEE называет стандарт 802.16 стандартом беспроводных региональных вычислительных сетей (Wireless MAN).

IEEE 802.16 регламентирует применение цифровой телефонии, доступа к сети Интернет, соединение удаленных ЛВС, теле- и радиовещание и др. Более детально мы рассмотрим этот стандарт в главе 4.

## Магистралы и уплотнение

Экономия ресурсов играет важную роль в телефонной системе. Стоимость прокладки и обслуживания магистрали с высокой пропускной способностью и высококачественной линии практически одна и та же (то есть львиная доля этой стоимости уходит на рытье траншей, а не на сам медный или оптоволоконный кабель). По этой причине телефонные компании совместно разработали несколько схем передачи нескольких разговоров по одному физическому кабелю. Схемы мультиплексирования (уплотнения) могут быть разделены на две основные категории: **FDM** (Frequency Division Multiplexing — частотное уплотнение) и **TDM** (Time Division Multiplexing — мультиплексирование с временным уплотнением). При частотном уплотнении частотный спектр делится между логическими каналами, при этом каждый пользователь получает в исключительное владение свой поддиапазон. При мультиплексировании с временным уплотнением пользователи по очереди (циклически) пользуются одним и тем же каналом, и каждому на короткий промежуток времени предоставляется вся пропускная способность канала.

Радиовещание с амплитудной модуляцией (АМ) является иллюстрацией обеих идей мультиплексирования. Весь спектр имеет ширину около 1 МГц, примерно от 500 до 1500 кГц. Он поделен между логическими каналами (радиостанциями). Каждая станция работает лишь в отведенной ей части спектра, при этом разделение между каналами должно быть достаточно большим, чтобы предотвратить взаимные помехи каналов. Такая система является примером частотного мультиплексирования. Кроме того, в некоторых странах отдельные радиостан-

ции имеют два логических субканала, один из которых предназначен для музыки, другой — для рекламы. Они работают на одной и той же частоте, но в разное время, сменяя друг друга. Это — типичный пример системы с разделением времени (то есть временного уплотнения).

Далее мы рассмотрим частотное мультиплексирование. Затем обратимся к вопросу о том, как частотное мультиплексирование может быть реализовано в оптоволоконных каналах (мультиплексирование с использованием разных длин волн). Затем мы обсудим мультиплексирование с разделением времени, закончив данный раздел системой, используемой в оптоволоконной связи (SONET).

### Частотное уплотнение

На рис. 2.27 показано, как три речевых телефонных канала могут объединяться в одну линию с использованием частотного уплотнения. Фильтры ограничивают используемую полосу частот примерно 3100 Гц на каждый речевой канал. При мультиплексировании нескольких каналов каждому из них выделяется полоса частот шириной 4000 Гц, что позволяет как следует разделить их. Для начала сигналы повышаются по частоте, причем для разных каналов величины сдвигов разные. После этого их можно суммировать, поскольку каждый канал теперь сдвинут в свою область спектра. Обратите внимание на то, что соседние каналы немного перекрываются, несмотря на разрыв между ними (последний называется **защитной полосой**). Происходит это из-за того, что частотная характеристика обрезанного фильтром сигнала вовсе не выглядит прямоугольной, а имеет некоторый наклон с обеих сторон. Это означает, что сильный всплеск в одном канале может ощущаться как нетермальный шум соседнем канале.

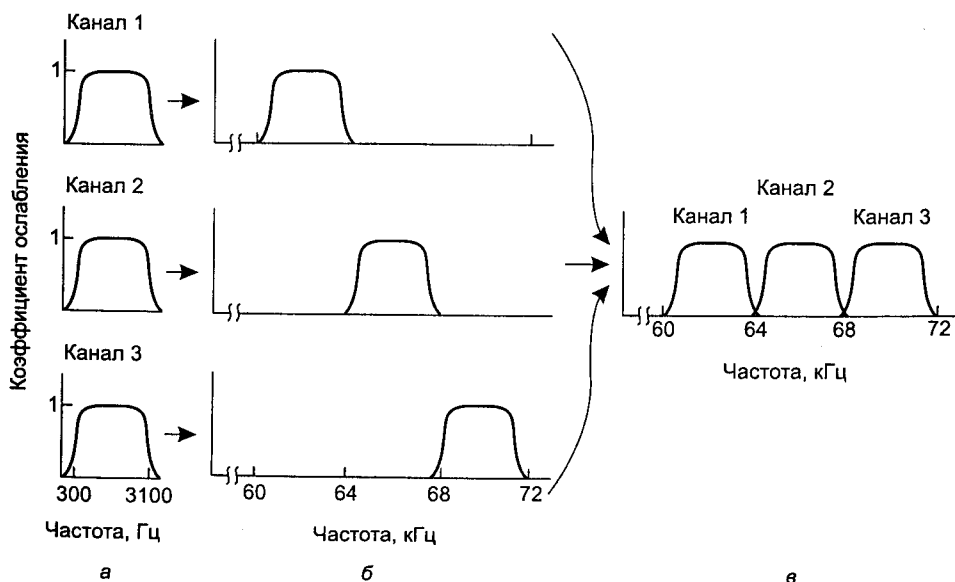


Рис. 2.27. Частотное уплотнение: исходные спектры сигналов (а); спектры, сдвинутые по частоте (б); уплотненный канал (в)

Используемые во всем мире схемы FDM в определенной степени стандартизированы. Широко распространенным стандартом является использование 12 речевых каналов с полосой канала 4000 Гц, уплотняемых в диапазоне от 60 до 108 кГц. Эти 12 каналов образуют **базовую группу**. Диапазон от 12 кГц до 60 кГц иногда используется для другой группы. Многие операторы связи предоставляют выделенные линии с пропускной способностью от 48 до 56 Кбит/с, основанные на группах. Пять групп (60 речевых каналов) могут быть уплотнены, тем самым они образуют **супергруппу**. Следующая единица в этой иерархии, состоящая из пяти (стандарт CCITT) или десяти (стандарт Bell System) супергрупп, называется **главной группой**. Кроме того, существуют и другие стандарты, объединяющие до 230 000 речевых каналов.

### Спектральное уплотнение

В оптоволоконных каналах используется особый вариант частотного уплотнения. Он называется **спектральным уплотнением** (WDM, Wavelength-Division Multiplexing). Способ реализации частотного уплотнения в оптоволоконных линиях показан на рис. 2.28. Здесь четыре кабеля подходят к одному сумматору, и по каждому из них идет сигнал со своей энергией в своем частотном диапазоне. Четыре луча объединяются и дальше распространяются по одному волокну. На противоположном конце они расщепляются разветвителем. На каждом выходном кабеле имеется короткий специальный участок внутреннего слоя, который является фильтром, пропускающим сигнал только одной длины волны.

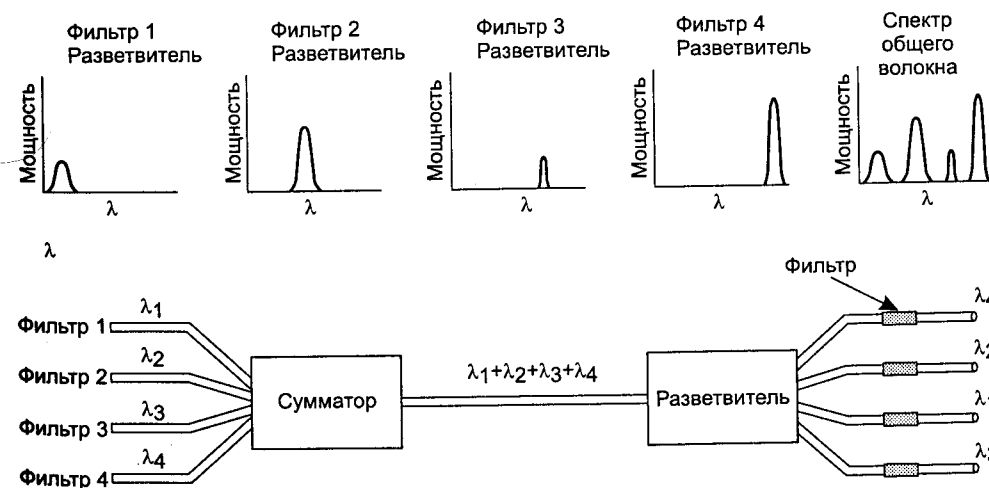


Рис. 2.28. Уплотнение с разделением длин волн

Данный метод не представляет собой ничего нового. Это просто частотное уплотнение на очень высоких частотах. Поскольку каждый сигнал передается в своем частотном диапазоне и эти диапазоны успешно разделяются, подобный вариант мультиплексирования может применяться для передачи на большие расстояния. Единственным отличием от электрического частотного уплотнения яв-

ляется в данном случае то, что система, используемая для уплотнения, то есть призма или дифракционная решетка, является абсолютно пассивным, а следовательно, чрезвычайно надежным элементом.

Технология WDM развивается с такой скоростью, что компьютерным технологиям остается только стыдиться перед ней своих темпов развития. Она была изобретена примерно в 1990 году. Первые коммерческие системы использовали 8 каналов по 2,5 Гбит/с на канал. К 1998 году на рынке появились уже 40-канальные системы с такой же пропускной способностью канала. В 2001 году была выпущена система из 96 каналов по 10 Гбит/с (то есть общая пропускная способность составила 960 Гбит/с). Такой емкости достаточно, чтобы передавать 30 полнометражных фильмов в секунду (в формате MPEG-2). В лабораториях уже работают версии, имеющие 200 каналов. При возрастании числа каналов длины волн различаются на очень малые величины (например, 0,1 нм). В этом случае системы называют **плотными WDM**, или **DWDM** (Dense WDM).

Следует отметить, что спектральное уплотнение является популярным. Один оптический кабель обычно работает на частоте не более нескольких гигагерц из-за невозможности более быстрого преобразования электрических сигналов в оптические и обратно. Однако возможности самого кабеля гораздо выше, поэтому, объединяя сигналы разных длин волн на одном кабеле, можно получить суммарную пропускную способность, линейно зависящую от числа каналов. Полоса пропускания одного волокна составляет 25 000 Гц (см. рис. 2.6), следовательно, даже при 1 бит/Гц можно разместить 2500 каналов по 10 Гбит/с (хотя соотношение бит/Гц можно увеличить).

Еще одной новой разработкой является оптический усилитель. Раньше необходимо было через каждые 100 км разбивать сигнал на каналы, преобразовывать оптические каналы в электрические и усиливать последние традиционным способом, после чего выполнять обратное преобразование и объединение. Теперь же любые оптические усилители могут регенерировать объединенный сигнал целиком через каждые 1000 км, при этом нет необходимости в оптико-электрических преобразованиях.

В примере на рис. 2.28, изображена система с постоянными длинами волн. Данные из входного кабеля 1 попадают на выходной кабель 3, а из кабеля 2 — в кабель 1 и т. д. Однако можно построить и коммутируемые WDM-системы. В таком устройстве выходные фильтры настраиваются с помощью интерферометров Фабри—Перо или Маха—Цандера. Чтобы узнать больше про спектральное уплотнение и его применения, читайте (Elmirghani and Mouftah, 2000; Hunter and Andonovic, 2000; Listani и др., 2001).

## Мультиплексирование с разделением времени

Спектральное уплотнение — это прекрасно, однако в телефонных системах все еще много участков медного провода, поэтому нам необходимо снова вернуться к традиционным носителям. Частотное уплотнение все еще используется при передаче данных по медным проводникам или микроволновым каналам, однако это требует применения аналоговых схем, что не очень подходит для компьютерных технологий. Временное уплотнение, напротив, может быть реализовано исклю-

чительно цифровой электроникой, поэтому этот метод в последнее время находит все большее распространение. К сожалению, его можно применять только для работы с цифровыми данными. Поскольку по местным линиям передаются аналоговые сигналы, то необходимо выполнять аналого-цифровые преобразования на оконечных станциях, на которых все локальные линии соединяются в большие магистрали.

Сейчас мы рассмотрим, как несколько аналоговых речевых каналов оцифровываются и затем объединяются в один выходной канал. Компьютерные данные, посылаемые модемом, также передаются в аналоговом виде по местным телефонным линиям, поэтому нижеследующее описание касается их целиком и полностью. Аналоговые сигналы оцифровываются на оконечной телефонной станции устройством, называемым **кодек** (кодер-декодер), которое вырабатывает серии 8-битных чисел. Частота дискретизации кодека составляет 8000 отсчетов в секунду (125 мкс/отсчет). Это связано с теоремой Найквиста, в которой утверждается, что такой частоты достаточно для извлечения всей информации из телефонного канала с полосой частот в 4 кГц. При более низкой частоте часть информации была бы потеряна, а более высокая скорость отсчетов была бы излишней. Подобная технология называется **кодово-импульсной модуляцией, PCM** (pulse-code modulation). Кодово-импульсная модуляция составляет основу современной телефонной системы. В результате практически все временные интервалы, используемые в телефонной системе, кратны 125 мкс.

Когда технология цифровой передачи данных стала реальностью, CCITT так и не удалось достичь соглашения по поводу международного стандарта на кодово-импульсную модуляцию. И вот теперь в различных странах используется большое количество совершенно не совместимых друг с другом схем.

Метод мультиплексирования с разделением времени, используемый в Северной Америке и Японии, называется «носитель T1». Он изображен на рис. 2.29. (Строго говоря, формат называется DS1, а T1 — это название носителя, но мы не будем здесь проводить столь жесткого разграничения). Носитель T1 состоит из 24 объединенных речевых каналов. Обычно аналоговые каналы оцифровываются поочередно путем подачи на вход кодека результирующего аналогового потока. Это оптимальнее применения 24 кодеков с объединением их выходных цифровых сигналов. Каждый из 24 каналов по очереди превращается кодеком в 8-битную последовательность, вставляемую в выходной поток данных. Семь битов являются информационными, а восьмой используется для контроля. Таким образом, получается поток данных в  $7 \cdot 8000 = 56\,000$  бит/с плюс  $1 \cdot 8000 = 8000$  бит/с поток сигнальной информации для каждого канала.

Кадр состоит из  $24 \cdot 8 = 192$  битов плюс еще один бит-ограничитель кадра, итого 193 бита каждые 125 мкс. В результате это дает огромную суммарную скорость передачи данных в 1,544 Мбит/с. 193-й бит используется для синхронизации кадров. Он представляет собой последовательность такого вида: 01010101... Обычно приемник постоянно проверяет состояние этого бита, чтобы убедиться, не потерял ли он синхронизацию. Если это вдруг происходит, то приемник сканирует принятые данные, отыскивая кадровый бит и с его помощью восстанавливает синхронизацию. Аналоговые пользователи вообще не могут создавать битовые последовательности, поскольку они соответствуют синусоиде с частотой

4000 Гц, которую невозможно отфильтровать. Цифровые пользователи, разумеется, могут это делать, но вероятность создания именно такой последовательности довольно мала. Кроме того, когда система T1 используется только для передачи цифровых данных, то информационными являются только 23 канала. 24-й канал целиком выделяется под синхронизирующую последовательность, что позволяет намного быстрее восстановить синхронизацию.

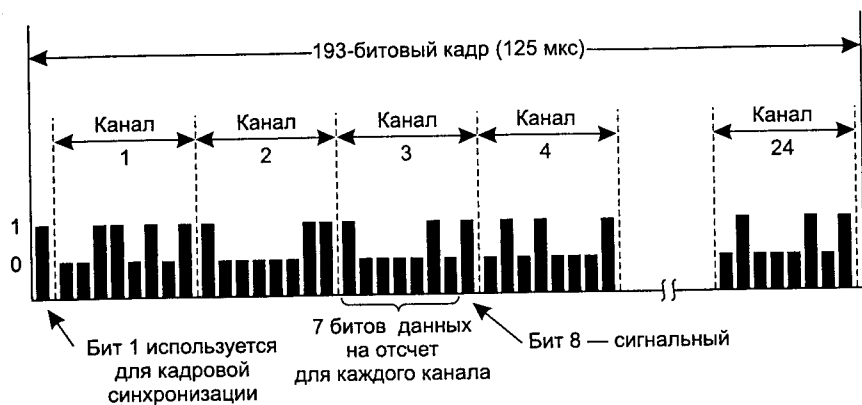


Рис. 2.29. Носитель T1 (1,544 Мбит/с)

Когда CCITT наконец достигло соглашения, было решено, что отводить 8000 бит/с на сигнальную информацию — это слишком много. В результате появился еще один стандарт канала со скоростью 1,544 Мбит/с, в котором аналоговый сигнал представлялся не семью, а восемью битами, то есть 256 дискретными уровнями вместо 128. Таким образом, существуют два несовместимых между собой варианта. В первом из них, CCS (common channel signaling — сигнализация по общему каналу), дополнительный бит, добавляемый не в начало 193-битового кадра, а в его конец, принимает последовательность значений 10101010... в нечетных кадрах, тогда как в четных используется для сигнальной информации, относящейся ко всем каналам.

Во втором варианте, CAS (Channel Associated Signaling — сигнализация, ассоциированная с каналом), у каждого канала имеется свой сигнальный подканал, на который выделяется один бит из 8 в каждом шестом кадре. Таким образом, пять из шести отсчетов являются 8-битовыми, а каждый шестой отсчет содержит 7 бит данных. Комитет CCITT также принял рекомендацию на применение носителя E1 с кодово-импульсной модуляцией со скоростью 2,048 Мбит/с. Этот носитель содержит 32 8-битовых отсчета, упаковываемых в основной кадр — 125 мкс. 30 каналов используются для передачи данных, два являются сигнальными. Каждая группа из четырех кадров содержит 64 сигнальных бита, половина которых используется для сигнализации, ассоциированной с каналом, а другая половина используется для синхронизации кадров или резервируется для различных нужд в разных странах. Стандарт 2,048 Мбит/с используется за пределами Северной Америки и Японии вместо T1.

При оцифровывании речевого сигнала было бы соблазнительно попытаться с помощью статистических методов уменьшить количество бит, необходимых для передачи информации в каждом канале. Подобные приемы применимы не только для речевых, но также и для любых аналоговых сигналов. Все эти методы сжатия основываются на том принципе, что сигнал меняется относительно медленно по сравнению с частотой дискретизации, поэтому большая часть информации в 7- или 8-разрядном числе является избыточной.

Один из методов сжатия, называющийся **дифференциальной кодово-импульсной модуляцией**, заключается в выводе не амплитуды сигнала, а разности текущего и предыдущего значений амплитуды. Поскольку скачки более чем на  $\pm 16$  уровней на шкале из 128 уровней маловероятны, то вместо 7 бит может оказаться достаточно 5. Если же сигнал неожиданно совершит большой скачок, то кодирующей системе понадобится несколько периодов дискретизации, чтобы догнать убежавший сигнал. При передаче речи такая ошибка, впрочем, вообще может быть проигнорирована.

Один из вариантов метода сжатия требует, чтобы значение сигнала в каждом отсчете отличалось от предыдущего на  $+1$  или  $-1$ . При этом можно передавать всего лишь один бит, сообщающий, увеличился ли сигнал по отношению к предыдущему значению или уменьшился. Это называется **дельта-модуляцией** (рис. 2.30). Как и любой подобный метод сжатия, дельта-модуляция предполагает, что сигнал изменяется довольно медленно, то есть значения сигналов в соседних отсчетах различаются ненамного. Если сигнал изменяется быстрее, чем позволяет метод, информация теряется.

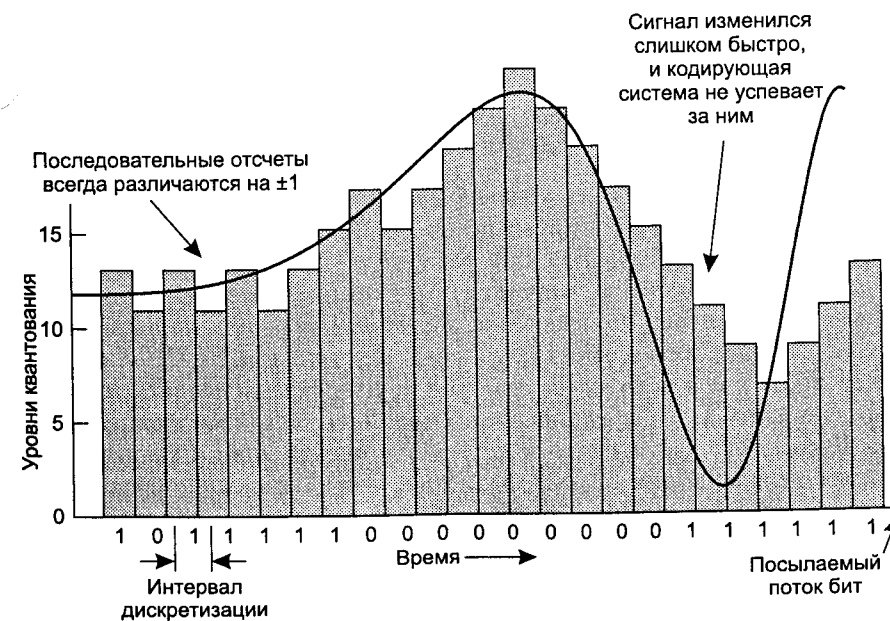


Рис. 2.30. Дельта-модуляция

Более сложным вариантом дифференциальной кодово-импульсной модуляции является предсказание следующего значения сигнала по нескольким предыдущим отсчетам. При этом кодируется только разница между реальным и предсказанным сигналом. Приемник и передатчик должны использовать, конечно же, один и тот же алгоритм предсказания. Серия подобных методов называется **кодированием с предсказанием**. Они полезны тем, что позволяют уменьшить размер чисел, которые нужно кодировать, а следовательно, количество передаваемых бит.

Носители T1 могут объединяться для передачи по каналам более высокого уровня при помощи мультиплексирования с разделением времени. На рис. 2.31 показано, как это может быть сделано. Слева мы видим четыре канала T1, объединяемых в один канал T2. Мультиплексирование в канале T2 и каналах более высоких порядков выполняется побитно, а не побайтно, причем 24 голосовых канала составляют один кадр T1. Четыре потока T1 по 1,544 Мбит/с образуют 6,176 Мбит/с, однако реально в канале T2 используется скорость передачи, равная 6,312 Мбит/с. Дополнительные биты используются для синхронизации кадров и восстановления в случае сбоя носителя. T1 и T3 активно используются рядовыми пользователями, тогда как T2 и T4 можно найти только внутри телефонной системы, поэтому они не столь известны.

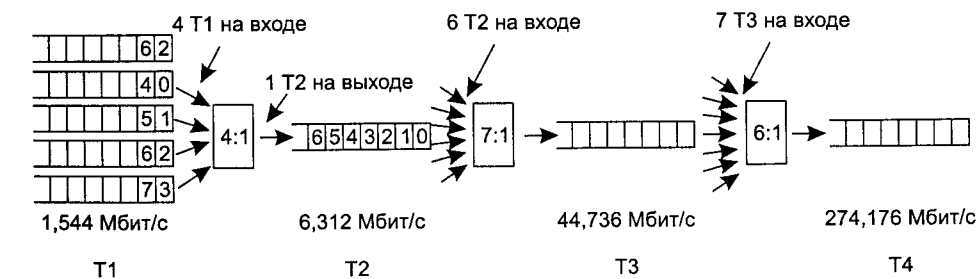


Рис. 2.31. Мультиплексирование потоков T1 на носителях высших порядков

На следующем уровне семь каналов T2 объединяются побитно в канал T3. Затем шесть потоков T3 формируют поток T4. На каждом этапе добавляется небольшое количество избыточной информации для синхронизации кадров.

Между США и остальным миром нет почти никаких договоренностей по поводу основного носителя, а также о том, каким образом они должны мультиплексироваться в каналы более высоких уровней. Используемый в США способ объединения по 4, 7 и 6 каналов не побудил другие страны сделать то же самое, поэтому стандарт CCITT предписывает объединять каналы по четыре на каждом уровне. Кроме того, различается и служебная информация. Стандарты CCITT описывают иерархию для 32, 128, 512, 2048 и 8192 каналов, передаваемых на скоростях 2,048, 8,848, 34,304, 139,264 и 565,148 Мбит/с.

## SONET/SDH

Когда оптоволоконная связь только появилась, у каждой телефонной компании была своя собственная система мультиплексирования с разделением времени.

После раздела в 1984 года корпорации AT&T местным телефонным компаниям пришлось подключаться к разным междугородным линиям с различными оптическими системами TDM. Появилась очевидная потребность в стандартизации. В 1985 году исследовательское подразделение региональных телефонных компаний Bellcore начало разработку стандарта **SONET** (Synchronous Optical Network — синхронная оптическая сеть). Позднее к этой работе подключился комитет CCITT, что привело к созданию в 1989 году стандарта SONET, а также набора параллельных рекомендаций CCITT (G.707, G708 и G709). Рекомендации CCITT, получившие название SDH (Synchronous Digital Hierarchy — синхронная цифровая иерархия), отличаются от стандарта SONET небольшими деталями. Практически все телефонные линии дальней связи в США и во многих других странах сегодня используют SONET на физическом уровне. Дополнительную информацию см. в книгах (Bellamy, 2000; Goralsky, 2000; Shepard, 2001).

При разработке системы SONET ставились четыре главные цели. Во-первых, SONET должен был обеспечивать объединение сетей, построенных на различных носителях. Для достижения этой цели потребовалось определить общий стандарт, описывающий длины волн, синхронизацию, структуру кадра и другие вопросы.

Во-вторых, требовалось средство объединения цифровых систем США, Европы и Японии, построенных на 64-килобитных каналах с кодово-импульсной модуляцией, но использующих эти каналы различными (и не совместимыми друг с другом) способами.

В-третьих, SONET должен был предоставить способ объединения нескольких цифровых каналов. Во время разработки системы SONET наиболее быстрым широко используемым в США носителем был T3 со скоростью 44,736 Мбит/с. Стандарт T4 уже был описан, но мало использовался, а стандарта выше T4 определено не было. Одной из задач SONET было продолжить иерархию до скоростей, измеряющихся в гигабитах в секунду. Также нужен был стандартный способ объединения нескольких медленных каналов в один канал SONET.

В-четвертых, SONET должен был обеспечить поддержку операций, администрирования и обслуживания (OAM, Operation, Administration, Maintenance). Предыдущие системы справлялись с этой задачей не слишком хорошо.

Вначале было решено реализовать SONET на основе традиционной системы мультиплексирования с разделением времени, при этом вся пропускная способность оптоволоконного кабеля выделялась одному каналу, который разбивался на интервалы времени, выделяемые подканалам. SONET как таковая является синхронной системой. Интервалы между посылаемыми битами управляются таймером с точностью  $10^{-9}$ . Биты отсылаются в линию также в строго определенные моменты времени, контролируемые главным таймером. Когда впоследствии была предложена коммутация ячеек в качестве основы ATM, тот факт, что такая система допускала произвольные интервалы между ячейками, сказался на названии асинхронного режима передачи (ATM, Asynchronous Transfer Mode), как бы в противоположность синхронному принципу функционирования сети SONET. В последней отправитель и получатель привязаны к общему таймеру, в ATM такого нет.



Обычный кадр SONET представляет собой блок из 810 байт, выдаваемых каждые 125 мкс. Поскольку SONET является синхронной системой, кадры выдаются независимо от наличия какой-либо полезной информации, которую необходимо переслать. Скорость 8000 кадров в секунду очень точно соответствует частоте дискретизации каналов PCM, используемых в телефонии.

Проще всего описать кадр SONET из 810 байт в виде прямоугольника из 9 рядов по 90 колонок. Тогда очевидно, что  $8 \cdot 810 = 6480$  бит передаются 8000 раз в секунду, что дает скорость передачи 51,84 Мбит/с. Это основной канал SONET, называющийся **STS-1** (Synchronous Transport Signal – синхронный транспортный сигнал). Все магистрали SONET кратны STS-1.

Первые три колонки каждого кадра зарезервированы под системную управляющую информацию, как показано на рис. 2.32. Первые три ряда содержат заголовки раздела, следующие шесть рядов – заголовок линии. Заголовок секции генерируется и проверяется в начале и конце каждого раздела, тогда как заголовок линии генерируется и проверяется в начале и конце каждой линии.

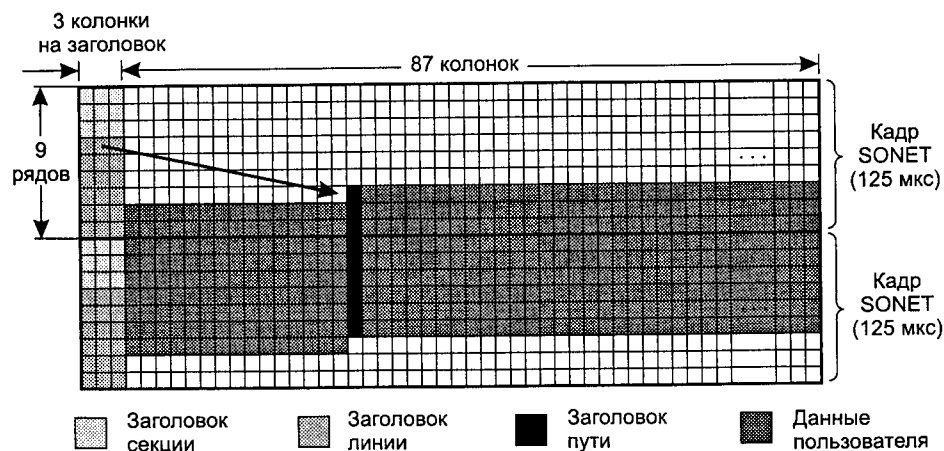


Рис. 2.32. Два соседних кадра системы SONET

Передачик SONET посылает соседние кадры по 810 байт без межкадровых промежутков, даже если данных для передачи нет (в этом случае посылаются фиктивные байты). С точки зрения приемника это выглядит как бесконечный битовый поток. Как же он узнает, где находится граница каждого кадра? Дело в том, что первые два байта кадра содержат фиксированную последовательность, которую приемник и старается найти. Если в большом количестве последовательно принятых кадров обнаруживается одна и та же комбинация нулей и единиц, то логично предположить, что это граница кадра, и приемник считает себя синхронизированным с передатчиком. Теоретически, пользователь может регулярно вставлять служебную последовательность в поток, но на практике это не может сбить с толку приемник, так как данные, отправляемые несколькими пользователями, подвергаются уплотнению. Есть, впрочем, и другие причины.

В оставшихся 87 столбцах содержатся данные пользователя. Они передаются со скоростью  $87 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 8000 = 50,112$  Мбит/с. Однако на самом деле данные пользователя, называемые **синхронным полезным пакетом, SPE** (Synchronous Payload Envelope), не всегда начинаются с первой строки и четвертой колонки. SPE может начинаться где угодно в пределах кадра. А указатель на его первый байт хранится в первой строке заголовка линии. Первой колонкой SPE является заголовок пути (то есть заголовок для сквозного протокола подуровня).

Возможность начинать SPE в любом месте кадра SONET и даже занимать соседние два кадра, как показано на рис. 2.32, придает системе дополнительную гибкость. Например, если данные пользователя прибывают на источник, в то время как пустой кадр SONET уже передается, то они могут быть вставлены в текущий кадр, а не ждать начала следующего кадра.

Иерархическая система мультиплексирования SONET показана в табл. 2.4. Определены скорости для синхронных транспортных сигналов от STS-1 до STS-192. Оптический носитель (OC, Optical Carrier), соответствующий *n*-му синхронному транспортному сигналу (STS-*n*), называется OC-*n* и совпадает с STS-*n* с точностью до бита, с той разницей, что для синхронизации требуется некоторая перестановка битов. Названия SDH отличаются – они начинаются с OC-3, так как системы на основе рекомендаций CCITT не имеют стандартизированной скорости 51,84 Мбит/с. Носитель OC-9 присутствует в таблице, поскольку он довольно близко соответствует стандарту высокоскоростных магистралей передачи данных, принятому в Японии. OC-18 и OC-36 также применяются в Японии. В общую скорость потоков данных включены все управляющие сигналы. В скорость передачи полезной нагрузки SPE не входят заголовки линий и разделов. В скорость передачи данных пользователя включаются только 86 полезных колонок кадра.

Таблица 2.4. Скорости мультиплексирования SONET и SDH

SONET		SDH	Скорость передачи данных, Мбит/с		
Электрические	Оптические	Оптические	Общая	SPE	Пользователя
STS-1	OC-1		51,84	50,112	49,536
STS-3	OC-3	STM-1	155,52	150,336	148,608
STS-9	OC-9	STM-3	466,56	451,008	445,824
STS-12	OC-12	STM-4	622,08	601,344	594,432
STS-18	OC-18	STM-6	933,12	902,016	891,648
STS-24	OC-24	STM-8	1244,16	1202,688	1188,864
STS-36	OC-36	STM-12	1866,24	1804,032	1783,296
STS-48	OC-48	STM-16	2488,32	2405,376	2377,728
STS-192	OC-192	STM-64	9953,28	9621,504	9510,912

Если какой-нибудь из данных носителей не является мультиплексным, а переносит данные от одного источника, то к его названию добавляется латинская буква *c*, означающая *concatenated* (объединенный). Таким образом, OC-3 означает 155,52-мегабитный носитель, состоящий из трех отдельных носителей OC-1, а OC-3с означает передачу потока данных от одного источника со скоростью

155,52 Мбит/с. Три потока ОС-1 в составе потока ОС-3с разделяются одной колонкой. Первая колонка 1 отделяет поток 1, затем колонка 1 — поток 2, колонка 1 — поток 3, затем колонка 2 — поток 1, и так далее до конца кадра шириной 270 колонок и глубиной 9 строк.

## Коммутация

С точки зрения среднего телефонного инженера, телефонная система состоит из двух частей: внешнего оборудования (местных телефонных линий и магистралей, вне коммутаторов) и внутреннего оборудования (коммутаторов), расположенного на телефонной станции. Мы рассмотрели внешнее оборудование. Теперь пора уделить внимание внутреннему.

В телефонных системах используются два различных приема: коммутации каналов и коммутации пакетов. Далее мы кратко познакомимся с каждым из них. Затем мы несколько подробнее обсудим коммутацию каналов, поскольку именно в соответствии с этой схемой функционирует современная телефонная система. Коммутацию пакетов мы изучим более детально в последующих главах.

### Коммутация каналов

Когда вы (или ваш компьютер) снимаете телефонную трубку и набираете номер, коммутирующее оборудование телефонной системы отыскивает физический путь, состоящий из кабелей (медных или оптоволоконных; впрочем, это может быть и радиоканал) и ведущий от вашего телефона к телефону того, с кем вы связываетесь. Такая система, называемая **коммутацией каналов**, схематически изображена на рис. 2.33, а. Каждый из шести прямоугольников представляет собой коммутирующую станцию (оконечную или междугородную). В данном примере каждая станция имеет три входных и три выходных линии. Когда звонок проходит через коммутационную станцию, между входной и выходной линиями устанавливается физическое соединение, как показано пунктирными линиями (такова, по крайней мере, концепция).

На заре телефонии соединение устанавливалось вручную телефонным оператором, который замыкал две линии проводом с двумя штекерами на концах. С изобретением автоматического коммутатора связана довольно забавная история. Автоматический коммутатор изобрел в XIX веке владелец похоронного бюро Алмон Б. Строуджер (Almon B. Strowger) вскоре после изобретения телефона. Когда кто-либо умирал, родственник умершего звонил городскому телефонному оператору и говорил: «Соедините меня, пожалуйста, с похоронным бюро». К несчастью для мистера Строуджера, в его городе было два похоронных бюро, и жена владельца конкурирующей фирмы как раз работала телефонным оператором. Мистер Строуджер быстро понял, что либо он изобретет автоматический телефонный коммутатор, либо ему придется закрывать дело. Он выбрал первое. На протяжении почти 100 лет используемое во всем мире оборудование для коммутации каналов называлось искателем Строуджера. (История не упоминает, не устроилась ли жена его конкурента, уволенная с работы телефонного оператора, в телефонное справочное агентство, сообщая телефонный номер своего похоронного бюро всем желающим.)

Модель, изображенная на рис. 2.33, а, конечно, сильно упрощена, поскольку канал, соединяющий двух абонентов телефонной линии, на самом деле может быть не только медным проводом, но и, например, микроволновой или оптоволоконной магистралью, на которой объединены тысячи телефонных абонентов. Тем не менее, основная идея остается той же самой: когда один абонент звонит другому, устанавливается определенный путь, связывающий их, и этот путь остается неизменным до конца разговора.

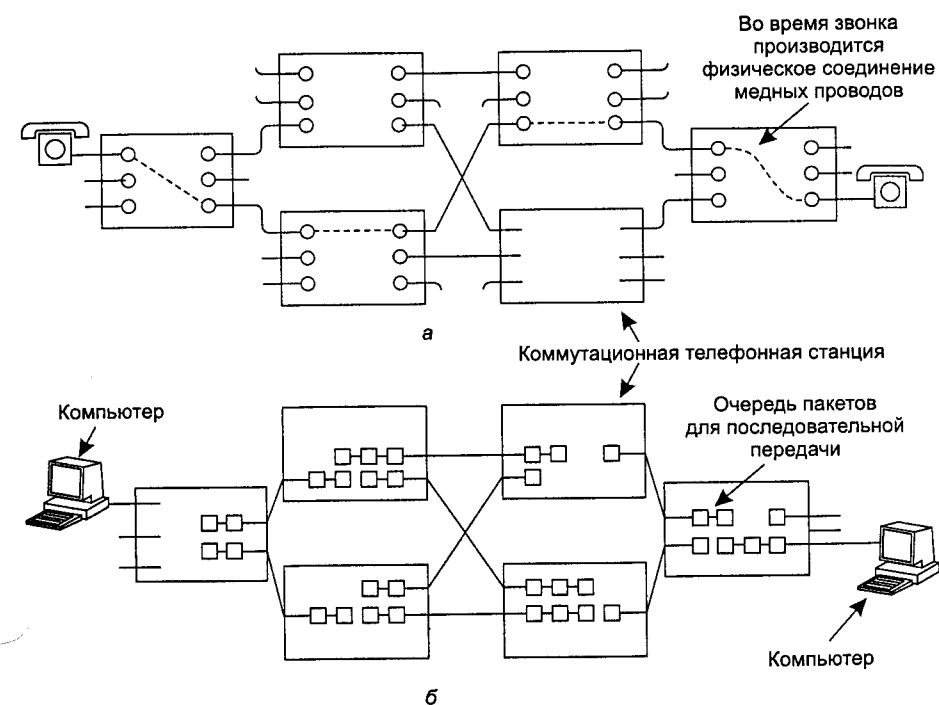


Рис. 2.33. Коммутация каналов (а); коммутация пакетов (б)

Альтернативным способом коммутации является **коммутация пакетов**, которая схематически изображена на рис. 2.33, б. Отдельные пакеты пересылаются как положено, однако заранее никакой путь между абонентами не устанавливается. Каждый пакет должен сам искать свой путь.

Важным свойством коммутации каналов является необходимость установления сквозного пути от одного абонента до другого до того, как будут посланы данные. Именно поэтому время от конца набора номера до начала разговора может занимать около 10 с и более для междугородных или международных звонков. В течение этого интервала времени телефонная система ищет путь, изображенный на рис. 2.33, а. Обратите внимание на то, что еще до начала передачи данных сигнал запроса на разговор должен пройти весь путь до пункта назначения и должен там быть распознан. Для многих компьютерных приложений (например, при проверке кредитной карточки клиента кассовым терминалом) длительное время установления связи является нежелательным.

В результате при установлении физического соединения между абонентами, как только этот путь установлен, единственной задержкой для распространения сигнала будет скорость распространения электромагнитного сигнала, то есть около 5 мс на каждые 1000 км. Еще одним свойством такой системы является то, что после начала разговора линия уже не может вдруг оказаться занятой, хотя она может быть занятой до установки соединения (например, благодаря отсутствию соответствующей возможности у коммутатора или магистрали).

### Коммутация сообщений

Еще одной стратегией является **коммутация сообщений**, показанная на рис. 2.34, б. При использовании такой формы коммутации физический путь между абонентами заранее не устанавливается. Вместо этого, когда отправитель желает отослать данные, они сохраняются на ближайшей коммутационной станции (то есть на первом маршрутизаторе), а затем прыжками от одного маршрутизатора к другому передаются дальше. Каждый блок принимается целиком, анализируется на наличие ошибок, после чего пересылается дальше. В сетях такой прием называется **передачей с промежуточным хранением**, об этом уже рассказывалось в главе 1.

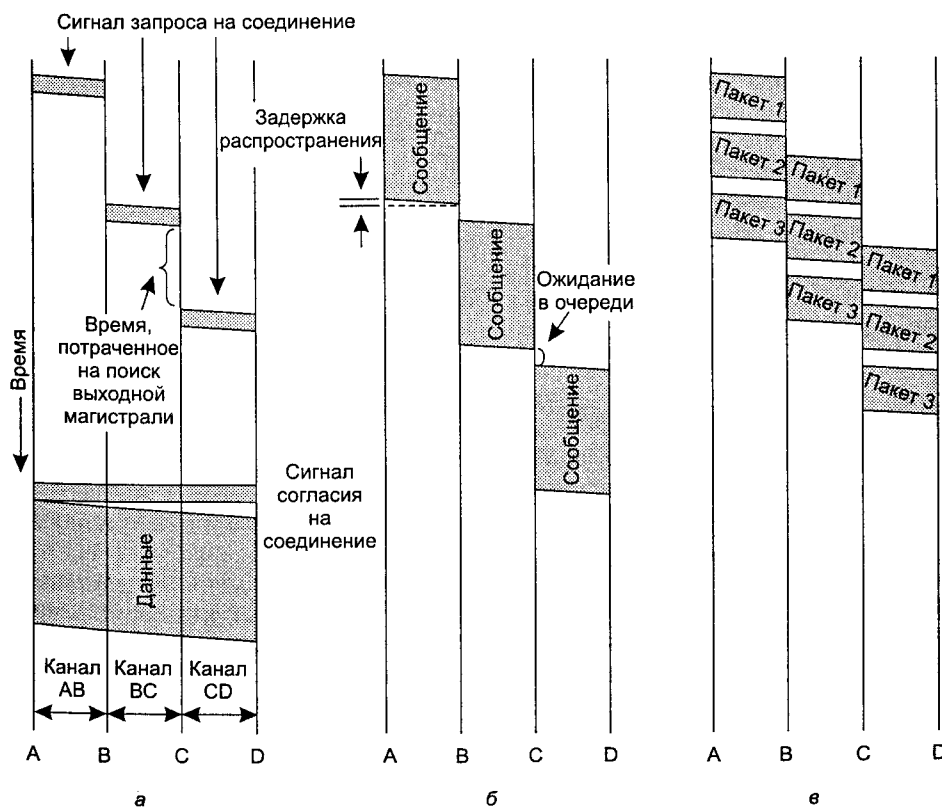


Рис. 2.34. Синхронизация событий при коммутации: каналов (а); сообщений (б); пакетов (в)

Коммутация сообщений использовалась в первой электромагнитной системе связи, а именно в телеграфе. Телеграмма печаталась на бумажной ленте в отключенном от линии режиме на станции-отправителе, а затем прочитывалась с ленты и передавалась по линии связи на следующую станцию, где она снова пробиравалась на бумажной ленте. Оператор отрывал ленту от мотка и читал ее на одном из нескольких специальных устройств чтения лент, которых было столько же, сколько исходящих магистралей. Такой коммутатор назывался **конторой рваных лент** (torn tape office). Бумажные ленты уже далеко в прошлом, коммутация сообщений больше не используется, поэтому мы больше не будем затрагивать эту тему.

### Коммутация пакетов

При коммутации сообщений размер блоков никак не ограничивается. Это означает, что маршрутизаторы (в современных системах) должны быть оснащены дисками для буферизации длинных блоков. Это также означает, что один блок может занять линию, связывающую два маршрутизатора, на несколько минут. В целом, система коммутации сообщений плохо подходит для интерактивного трафика. Данная проблема решилась, когда был изобретен метод **коммутации пакетов**, который мы уже упоминали в главе 1. В сетях с коммутацией пакетов на размер блоков накладывается жесткое ограничение, что позволяет буферизировать блоки не на диске, а в памяти маршрутизатора. Сети с коммутацией пакетов удовлетворяют требованиям интерактивного трафика, поскольку ни один пользователь не может монополизировать линию на длительное время (измеряемое миллисекундами). Еще одно преимущество коммутации пакетов перед коммутацией сообщений продемонстрировано на рис. 2.34, б и в: первый пакет многопакетного сообщения пересылается еще до того, как второй пакет полностью получен, что уменьшает задержку и повышает скорость передачи. По этим причинам компьютерные сети обычно используют систему коммутации пакетов, иногда — коммутацию каналов, но никогда не применяют коммутацию сообщений.

Коммутация каналов отличается от коммутации пакетов по ряду факторов. Во-первых, при коммутации каналов связь между двумя абонентами должна быть установлена до начала передачи данных. Пакетная коммутация такого требования не предъявляет. Первый пакет отсылается, как только он появляется.

Результатом предварительной установки соединения при коммутации каналов является резервирование всей пропускной способности для конкретного сеанса. Все пакеты следуют установленным путем. Кроме всего прочего, это означает, что пакеты не могут прийти в неправильной последовательности. При коммутации пакетов единого пути для них не существует, они могут приходиться независимо друг от друга по пути, определяемому состоянием сети в момент передачи. Соответственно, не исключено, что пакеты придут в неправильном порядке.

Пакетная коммутация более устойчива к сбоям. На самом деле, именно это свойство стало причиной изобретения данного метода. Если, например, выходит из строя один из коммутаторов, то все линии, подключенные к нему, также выходят из строя. Но при коммутации пакетов данные могут быть отправлены в обход «умершего» коммутатора.

Предварительное установление соединения дает возможность предварительно зарезервировать полосу пропускания. В этом случае при получении пакета его можно мгновенно переслать дальше. При коммутации пакетов полоса пропускания не резервируется, поэтому могут возникать очереди из пакетов, ожидающих пересылки.

Если полоса пропускания резервируется заранее, на линии не может возникнуть затор (если только не пытаться послать больше пакетов, чем ожидается). С другой стороны, сама попытка установить предварительное соединение может оказаться неудачной из-за перегрузки канала. То есть ситуация перегрузки в разных методах может возникать в разное время: при коммутации пакетов такое может случиться при передаче данных, а при коммутации каналов — при установлении соединения.

Если определенная линия уже зарезервирована для какого-то соединения, но по ней ничего не передается, то она простаивает. Ею не могут воспользоваться другие абоненты. При коммутации пакетов линия не простаивает, а значит, такой метод является более эффективным с точки зрения всей системы. Понимание того, чем приходится жертвовать в каждом из этих методов, необходимо, чтобы ощутить разницу между пакетной коммутацией и коммутацией каналов. В любом случае ищется какой-то компромисс между гарантией качества обслуживания при больших затратах ресурсов и отсутствием гарантии качества при малых затратах ресурсов.

Коммутация пакетов использует передачу с промежуточным хранением. Пакет сохраняется в памяти маршрутизатора, после чего пересылается дальше. При коммутации каналов биты просто непрерывной чередой следуют по линии связи. Промежуточное сохранение пакетов вносит задержки в процесс передачи.

Еще одним отличием является то, что коммутация каналов использовать любую прозрачна для пользователей. Отправитель и получатель могут использовать любую скорость передачи, любой формат данных или метод формирования кадров. Транспортная часть системы ничего не знает об этих подробностях и даже не интересуется ими. При коммутации пакетов транспортная служба определяет основные параметры. Можно привести довольно грубое сравнение с различием между шоссе и железной дорогой. При движении по шоссе пользователь сам определяет скорость, размер и тип автомобиля. При перемещении по железной дороге подобные вопросы решаются специальной службой. Благодаря такой прозрачности системы передавать голос, данные и факсы в телефонной системе можно одновременно.

Наконец, еще одним различием между двумя способами коммутации является политика оплаты услуг. Системы с коммутацией каналов традиционно взимают плату за расстояние передачи и время на линии. В мобильных телефонах расстояние роли не играет (кроме международных звонков), а время играет не очень значительную роль (ну, например, тариф с 2000 бесплатных минут дороже, чем тариф с 1000 бесплатных минут, причем иногда звонки в ночное время и в выходные являются льготными). В случае коммутации пакетов время на линии вообще не принимается в расчет, однако иногда взимается плата за трафик. С обычных пользователей провайдеры иногда берут просто ежемесячную абонентскую

плату, поскольку это проще для обеих сторон, однако магистральные транспортные службы взимают с местных провайдеров плату за объем трафика. Все различия сведены в табл. 2.5.

**Таблица 2.5.** Сравнительные характеристики коммутации каналов и коммутации пакетов

Параметр	Коммутация каналов	Коммутация пакетов
Установка соединения	Требуется	Не требуется
Выделенный «медный» путь	Да	Нет
Каждый пакет перемещается по одному и тому же пути	Да	Нет
Пакеты приходят в правильном порядке	Да	Нет
Критичность выхода из строя коммутатора	Да	Нет
Доступная пропускная способность	Фиксированная	Динамическая
Возможность занятости линии	Во время установки соединения	Для каждого пакета
Возможность простоя линии	Да	Нет
Передача с промежуточным хранением	Нет	Да
Прозрачность	Да	Нет
Оплата	За время на линии	За трафик

Обе системы коммутации довольно важны, поэтому мы скоро вернемся к ним и подробнее опишем различные используемые технологии.

## Мобильная телефонная система

Традиционная телефонная система (даже если она в один прекрасный день полностью перейдет на многогигабитный оптоволоконный кабель) никогда не сможет удовлетворить потребности огромной группы пользователей — людей, находящихся в пути. Люди хотят получить возможность быть на связи буквально везде: в автомобиле, самолете, бассейне и т. д. Через несколько лет не останется такой точки на Земле, откуда нельзя было бы позвонить по телефону, послать e-mail и выйти в Интернет. По крайней мере, люди ожидают именно это. Следовательно, интерес к беспроводной телефонии будет продолжать расти. В следующих разделах мы рассмотрим подробности, касающиеся этой темы.

Беспроводные телефоны бывают двух типов: домашние радиотелефоны и мобильные телефоны (иногда называемые **сотовыми телефонами**). Радиотелефоны представляют собой устройства, состоящие из базовой станции и одной или нескольких переносных трубок. Они предназначены для использования внутри жилья или в непосредственной близости от него. Их никогда не объединяют

в сети, поэтому в дальнейшем мы их рассматривать не будем. Вместо этого мы более подробно рассмотрим мобильные системы связи, которые используются как для передачи речи, так и для обмена данными.

На данный момент можно выделить уже три разных поколения **мобильных телефонов**, осуществляющих:

- 1) аналоговую голосовую связь;
- 2) цифровую голосовую связь;
- 3) цифровую голосовую связь и обмен данными (Интернет, электронная почта и т. д.).

Хотя большая часть нашего обсуждения будет посвящена техническому устройству этих систем, нельзя не отметить тот интересный факт, что огромное влияние на процесс развития технологий этого типа оказали политические и экономические решения. Первая мобильная система была предложена американской компанией AT&T, которая, с согласия комиссии FCC, установила мобильную связь на всей территории Соединенных Штатов. В результате целая страна обрела единую (аналоговую) систему связи, и мобильный телефон, купленный, например, в Калифорнии, успешно работал в Нью-Йорке. А в Европе все получилось наоборот: когда туда пришла мобильная связь, каждая страна бросилась разрабатывать собственные системы, в результате чего проиграли все.

Однако Европа чему-то научилась на своих ошибках, и с появлением цифровых систем государственные телефонные службы объединились, чтобы создать единый стандарт (GSM), по которому могли бы работать любые европейские мобильные телефоны. К тому времени в США государство вышло из бизнеса, связанного со стандартизацией, поэтому новые цифровые мобильные системы стали заботой коммерческих структур. Это привело к тому, что разные производители стали выпускать разнотипные мобильные телефоны, и в США появились две основные (и одна поменьше) несовместимые цифровые мобильные телефонные системы.

Несмотря на изначальное лидерство США, Европа сейчас обошла Штаты по популярности мобильной связи. Одной из причин является, конечно, единая европейская система. Еще одна причина довольно забавна. Она связана с телефонными номерами. В США не различаются номера мобильных и стационарных телефонов. Поэтому нет никакой возможности узнать, набирая номер, например, (212) 234-5678, попадете вы на городской телефон (дешевый или вообще бесплатный звонок) или на сотовый (дорогой звонок). Чтобы люди не нервничали каждый раз, гадая, куда они звонят, телефонные компании заставили абонентов сотовой связи платить за входящие звонки. Но многих такое решение отпугнуло — люди стали бояться потратить большую сумму денег на один только прием входящих звонков. В Европе у мобильных телефонов номер начинается с особого кода (обычно это число в районе 800–900), поэтому его сразу можно узнать. Значит, можно установить обычное правило, принятое в телефонии: платит звонящий (за исключением международных звонков, где платят оба).

Третий фактор, оказавший большое влияние на популярность мобильных систем, — это широкое распространение телефонов с предоплатой разговоров (до 75 % в некоторых регионах). Их можно купить во многих магазинах, и это не

представляет особой сложности. Они могут быть заряжены, например, на 20 или 50 евро, а при снижении баланса до нуля их можно «перезарядить» с помощью секретного PIN-кода. Теперь такие мобильные телефоны есть у любого подростка, и родители могут быть на связи со своим чадом, не опасаясь при этом, что он самостоятельно наговорит по телефону на кругленькую сумму. Если мобильный телефон используется лишь эпизодически, то это обходится практически бесплатно, поскольку почти всегда можно найти тариф, на котором отсутствует абонентская плата или плата за входящие звонки.

## Мобильные телефоны первого поколения: аналоговая передача речи

Однако хватит о политике и бизнесе. Поговорим о технологиях. Начнем наше рассмотрение с самых первых из них. Мобильные радиотелефоны эпизодически применялись в морском судоходстве и военной связи в первые десятилетия XX века. В 1946 году в Сент-Луи была установлена первая система автомобильных телефонов. Она имела один большой передатчик, расположенный на крыше высокого здания, и единственный канал приема и передачи данных. Чтобы начать разговор, нужно было нажать на кнопку, которая включала передатчик и отключала приемник. Такие системы, известные как **тангентные**, существовали в некоторых городах еще в конце 50-х. СВ-радио, системы, используемые в такси и полицейских машинах, часто используют эту же технологию.

В 1960-х годах появилась **усовершенствованная система мобильной телефонной связи, IMTS (Improved Mobile Telephone System)**. Она также использовала мощный (200-ваттный) передатчик, установленный на вершине горы, но уже имела два частотных канала: один для отправки, другой — для приема данных. Поэтому микрофонная кнопка уже была не нужна. Благодаря разделению входящих и исходящих каналов пользователи мобильных телефонов не могли слышать чужие разговоры (в отличие от тангентных систем, используемых в такси).

IMTS поддерживала 23 канала в диапазоне от 150 до 450 МГц. Из-за небольшого числа каналов пользователям часто подолгу приходилось ждать освобождения линии. К тому же из-за сильной мощности передатчика смежные системы должны были располагаться на расстоянии нескольких сотен километров друг от друга во избежание интерференции сигналов. В общем, из-за низкой емкости эта система была признана непрактичной.

## Усовершенствованная мобильная телефонная связь (AMPS)

Все изменилось с появлением системы **усовершенствованной мобильной телефонной связи, AMPS (Advanced Mobile Phone System)**, изобретенной компанией Bell Labs и впервые установленной в США в 1982 году. Она также использовалась в Англии, где называлась TACS, и в Японии — под именем MCS-L1. Несмотря на то что сейчас эта система уже ушла в прошлое, мы все же ее рассмотрим, поскольку многие ее фундаментальные свойства были напрямую унаследованы ее цифровым последователем, D-AMPS (для совместимости со старым оборудованием).

В любой мобильной телефонной системе географический регион охвата делится на **соты** (отсюда иногда применяемое название — «сотовые телефоны»). В AMPS размер сот составляет обычно от 10 до 20 км; в цифровых системах соты еще мельче. Каждая сота работает на своих частотах, не пересекающихся с соседними. Лежащая в основе телефонной системы AMPS идея разбиения территории на относительно небольшие ячейки и использования одних и тех же частот в различных (но не соседних) ячейках дает этой системе значительно большие возможности по сравнению с более ранними системами. В то время как в системе IMTS на территории диаметром 100 км для каждого звонка требовалась своя частота, система AMTS в той же области могла состоять из ста десятикилометровых сот и поддерживать от 5 до 10 звонков на одной и той же частоте в сильно удаленных друг от друга ячейках. Кроме того, небольшие размеры сот означают меньшую мощность, требующуюся для передатчиков, а значит, и меньшую стоимость устройств. Телефонные трубки имеют выходную мощность около 0,6 Вт, передатчики в автомобилях — около 3 Вт, что является максимальной мощностью, которую разрешает Федеральная комиссия связи США (Federal Communication Commission, FCC).

Идея повторного использования частоты проиллюстрирована на рис. 2.35, а. Соты имеют форму, близкую к окружности, однако на модели их легче представить в виде шестиугольников. В левой части рисунка все соты одного размера. Они объединены в группы по семь сот. Каждая буква соответствует определенному набору частот. Обратите внимание на то, что между ячейками с одинаковыми наборами частот располагается буфер примерно в две ячейки шириной, в котором данные частоты не используются — это обеспечивает хорошее разделение сигналов одинаковых частот и низкий уровень помех.

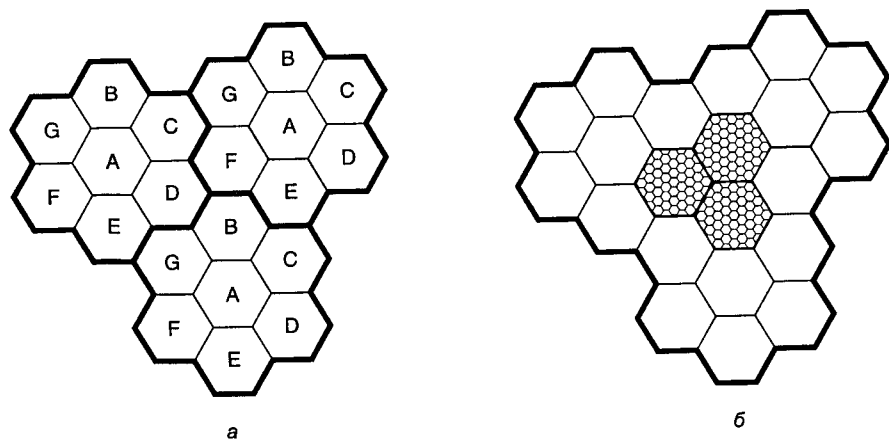


Рис. 2.35. Повторное использование частоты (а); разбиение на микросоты (б)

Главная задача заключается в том, чтобы найти подходящие возвышенности для размещения антенн базовых станций. Для решения этой проблемы многие операторы связи заключили договоры с Римской католической церковью, поскольку последней принадлежит значительное количество высоких строений в различных странах. Удобно и то, что все они находятся под единым управлением.

Если в каком-нибудь регионе количество пользователей вырастает настолько, что система переполняется, то мощность передатчиков уменьшается, а переполненные соты разбиваются на соты меньшего размера (**микросоты**), как показано на рис. 2.35, б. Вопрос о размере ячеек обсуждается в (Нас, 1995).

В центре каждой ячейки располагается базовая станция (БС), с которой связываются все телефоны, находящиеся в ее зоне действия. Базовая станция состоит из компьютера и приемника/передатчика, соединенного с антенной. В небольших системах все базовые станции соединены с одним устройством, называемым **MTSO** (Mobile Telephone Switching Office — коммутатор мобильных телефонов) или **MSC** (Mobile Switching Center — мобильный коммутационный центр). Большой системе может потребоваться несколько коммутаторов, которые соединяются с коммутатором второго уровня, и т. д. Коммутаторы мобильных телефонов являются аналогами оконечных телефонных станций и в самом деле соединяются хотя бы с одним оконечным коммутатором обычной телефонной системы. Коммутаторы мобильных телефонов связываются с базовыми станциями, друг с другом и с коммутируемой телефонной сетью общего пользования (PSTN, Public Switched Telephone Network), построенной на основе коммутации пакетов.

В каждый момент времени мобильный телефон логически находится в зоне действия одной ячейки и управляется базовой станцией этой ячейки. Когда телефон физически покидает ячейку, его базовая станция замечает ослабление сигнала и опрашивает все окружающие станции, насколько хорошо они слышат сигнал этого телефона. Затем базовая станция передает управление данным телефоном ячейке, получающей от нее наиболее сильный сигнал, таким образом определяя ячейку, в которую переместился мобильный телефон. После этого телефон информируется о переходе в ведение новой БС, и если в этот момент ведется разговор, телефону будет предложено переключиться на новый канал (поскольку в соседних сотах одинаковые частотные каналы не используются). Подобный процесс называется **передачей** (handoff) и занимает около 300 мс. Назначение канала осуществляет коммутатор мобильных телефонов MTSO, являющийся центральным нервом системы. Базовые станции представляют собой всего лишь радиоретрансляторы.

Передача может осуществляться двумя способами. При **мягкой передаче** телефон переходит в ведение новой базовой станции еще до ухода со старой. При этом не происходит даже кратковременного пропадания связи. Недостатком такого метода является то, что в момент перехода с одной БС на другую телефон должен работать одновременно на двух частотах. Телефоны первого и второго поколения этого делать не умеют.

При **жесткой передаче** старая базовая станция обрывает связь с телефоном еще до того, как новая взяла его под свою опеку. Если последняя не может в течение какого-то времени наладить связь с телефоном (например, по причине отсутствия свободных частот), то разговор может оборваться. Пользователь, конечно, заметит это, но ничего не поделаешь — так иногда случается при использовании данной технологии.

## Каналы

Система AMPS использует 832 дуплексных канала, каждый из которых состоит из пары симплексных каналов. 832 симплексных канала передачи располагаются

в диапазоне от 824 до 849 МГц, и еще 832 симплексных канала приема — от 869 до 894 МГц. Ширина каждого канала составляет 30 кГц. Таким образом, для разделения каналов в системе AMPS используется частотное уплотнение.

В диапазоне 800 МГц длина радиоволн составляет около 40 см. Такие радиоволны распространяются строго по прямой линии. Они поглощаются деревьями и отражаются от поверхности земли и зданий. Может случиться так, что сигнал с мобильного телефона достигнет базовой станции по прямому пути, но, кроме того, с небольшим запозданием попадет на ту же станцию, отразившись от земли или здания. Такой эффект может привести к появлению эха или искажению сигнала (многолучевое затухание). Иногда можно услышать отдаленный разговор, отразившийся несколько раз.

Все 832 канала можно разделить на четыре категории:

1. Управляющие каналы (от базы к мобильному телефону) для управления системой.
2. Пейджинговые каналы (от базы к мобильному телефону) для передачи сообщений мобильным пользователям.
3. Каналы доступа (двунаправленные) для установления соединения и назначения каналов.
4. Каналы данных (двунаправленные) для передачи голоса, факса или данных.

Для управления резервируется 21 канал. Они прошиваются в программируемом запоминающем устройстве (ППЗУ) каждого телефона. Поскольку одни и те же частоты не могут использоваться в соседних сотах, то число голосовых каналов, доступных в пределах одной ячейки, значительно меньше 832 — обычно около 45.

## Управление вызовом

Каждый мобильный телефон в системе AMPS снабжается 32-разрядным порядковым номером и 10-значным телефонным номером, которые записываются в ППЗУ телефона. Телефонный номер состоит из 3-значного кода области, занимающего 10 бит, и 7-значного номера абонента, занимающего 24 бита. При включении телефон сканирует запрограммированный список из 21 управляющего канала, в котором он ищет наиболее сильный сигнал.

Затем телефон передает в эфир свой 32-разрядный порядковый номер и 34-разрядный телефонный номер. Как и вся управляющая информация в системе AMPS, этот пакет посылается в цифровой форме несколько раз с применением помехоустойчивого кодирования, хотя сами голосовые каналы являются аналоговыми.

Когда базовая станция слышит этот сигнал, она передает сообщение коммутатору MTSO, который фиксирует появление нового пользователя, а также информирует «домашний» коммутатор абонента о его новом местоположении. Обычно мобильный телефон регистрируется примерно каждые 15 минут.

Чтобы позвонить с мобильного телефона, его владелец включает телефон, вводит номер и нажимает клавишу SEND. При этом телефон посылает набранный телефонный номер вместе со своими идентификаторами по каналу доступа. Если при этом происходит коллизия, то телефон повторяет попытку позже. Когда базовая станция получает запрос, она информирует об этом коммутатор. Если звоня-

щий является клиентом оператора связи, которому принадлежит данный коммутатор (или одного из ее партнеров), тогда коммутатор ищет для него свободный канал. Если такой канал находится, то номер этого канала посылается обратно по управляющему каналу. Затем мобильный телефон автоматически переключается на выбранный голосовой канал и ждет, пока тот, кому звонят, ответит.

Входящие звонки обрабатываются иначе. Находящиеся в режиме ожидания телефоны постоянно прослушивают пейджинговый канал, ожидая адресованных им сообщений. Когда поступает звонок на мобильный телефон (с обычного или другого мобильного телефона), то пакет посылается на «домашний» коммутатор вызываемого, которому должно быть известно текущее местонахождение абонента. Этот пакет пересылается на базовую станцию в его текущей ячейке, которая посылает по пейджинговому каналу сообщение типа: «Элемент 14, вы здесь?». При этом телефон, которому звонят, по управляющему каналу отвечает: «Да». Тогда базовая станция ему сообщает: «Элемент 14, вам звонок по каналу 3». После этого сотовый телефон переключается на канал 3 и начинает издавать звуковые сигналы (или проигрывать мелодию, которую владельцу подарили на день рождения).

## Второе поколение мобильных телефонов: цифровая передача голоса

Первое поколение сотовых телефонных систем было аналоговым. Второе поколение является цифровым. Как не было никаких четких стандартов в первом поколении мобильных телефонов, так не появились они и ко второму поколению. Сейчас используются четыре системы второго поколения: D-AMPS, GSM, CDMA и PDC. Далее мы обсудим первые три из них. PDC нашла применение только в Японии и является, на самом деле, модификацией D-AMPS, направленной на сохранение совместимости с японским аналоговым оборудованием первого поколения. Название PCS (Personal Communications Services — персональная служба связи) иногда используется в литературе по маркетингу и означает систему второго поколения (цифровую, разумеется). Изначально так назывался телефон, работающий в диапазоне 1900 МГц, впрочем, сейчас различия почти стерлись.

### D-AMPS — цифровая усовершенствованная мобильная связь

Вторым поколением AMPS является полностью цифровая система D-AMPS. Она описывается международным стандартом IS-54 и его последователем — IS-136. Система D-AMPS была разработана таким образом, чтобы она могла успешно существовать с AMPS и мобильные телефоны первого и второго поколения могли работать одновременно в одной и той же соте.

В частности, D-AMPS использует те же 30-герцевые каналы, что и AMPS. Они располагаются в том же диапазоне, то есть может получиться так, что какой-то канал будет аналоговым, а соседние с ним каналы — цифровыми. В зависимости от конкретного набора телефонов в данной ячейке ее коммутатор определяет, какие каналы цифровые, какие аналоговые, и может динамически менять их тип в зависимости от того, какие телефоны попадают или выходят из зоны действия

базовой станции ячейки. Когда D-AMPS была представлена как новая служба, для нее был выделен дополнительный диапазон, с расчетом на увеличение нагрузки. Исходящие каналы расположили на частотах 1850–1910 МГц, а соответствующие входящие каналы — на частотах 1930–1990 МГц. Как и в AMPS, каналы парные. В этой полосе длина волн составляет 16 см, поэтому стандартная антенна размером в четверть длины волны будет размером всего лишь 4 см, что дает возможность создать более компактные телефоны. Тем не менее многие телефоны D-AMPS могут использовать оба диапазона (как 850, так и 1900 МГц), что позволяет использовать увеличенный набор доступных каналов.

В мобильном телефоне системы D-AMPS голосовой сигнал захватывается микрофоном, оцифровывается и сжимается при помощи более сложной модели, чем дельта-модуляция и схема предсказания, которые мы изучали ранее. Метод компрессии в данном случае принимает в расчет особенности человеческого голоса, сжимая речь со стандартных 56 Кбит/с (PCM-кодирование) до 8 Кбит/с и даже меньше. Сжатие производится специальной схемой, называемой **вокодером** (Bellamy, 2000), прямо в телефоне, а не на базовой или коммутационной станции. Это уменьшает размеры информации, которую необходимо передать в эфир. При использовании стационарной телефонии нет никакого смысла в сжатии данных в самом телефонном аппарате, поскольку уменьшение трафика в локальной линии никак не влияет на общую емкость системы.

Когда же речь идет о мобильной связи, то в оцифровке и сжатии данных в самой трубке есть значительная выгода: достаточно сказать, что три абонента D-AMPS могут одновременно использовать одну и ту же пару частотных каналов за счет мультиплексирования с разделением времени. Каждая пара частот поддерживает скорость 25 кадров/с (40 мс на кадр). Кадры состоят из шести временных интервалов по 6,67 мс, как показано на рис. 2.36 для самой низкочастотной канальной пары.

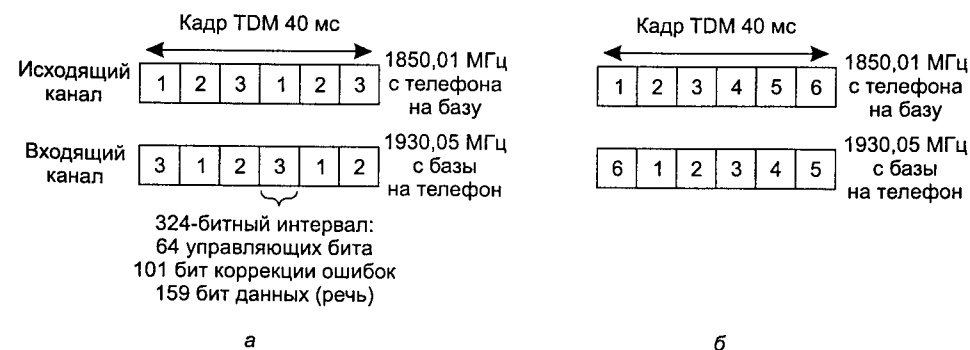


Рис. 2.36. Канал D-AMPS с тремя абонентами (а); канал D-AMPS с шестью абонентами (б)

Каждый кадр обслуживает трех пользователей, которые поочередно занимают исходящий и входящий каналы. Во время первого кадрового интервала (рис. 2.36, а), например, пользователь 1 может передавать данные на базовую станцию, а в это время пользователь 3 может принимать данные. Кадровый интервал состоит из 324 бит, из них 64 используются для организации защитного интервала,

синхронизации и функций управления. Таким образом, пользователю предоставляется 260 бит. Из них 101 используется для исправления ошибок при передаче по зашумленному эфиру, поэтому в чистом виде для полезных данных остается лишь 159 бит. При скорости 50 интервалов в секунду пропускная способность, доступная для передачи сжатой речевой информации, составляет около 8 Кбит/с, то есть 1/7 стандартной пропускной способности PCM.

Использование улучшенных алгоритмов сжатия может позволить уложить речь в 4 Кбит/с, в этом случае один кадр может использоваться одновременно шестью абонентами, как показано на рис. 2.36, б. С точки зрения операторов мобильной связи, возможность сжатия данных в 3–6 раз относительно AMPS — это большая победа. Этим объясняется популярность «персональных служб связи». Конечно, качество звука при 4 Кбит/с не сравнить с 56 Кбит/с, однако некоторые операторы, тем не менее, рекламируют высококачественный звук, который можно якобы сравнить со звуком Hi-Fi аппаратуры. Но должно быть очевидно, что канал 8 Кбит/с никогда не даст даже качества древнего модема на 9600 бит/с.

Структура управления D-AMPS довольно сложна. Не вдаваясь в подробности, можно сказать, что группы из 16 кадров формируют суперкадр, и некоторая часть служебной информации появляется ограниченное количество раз в суперкадре. Используются шесть основных управляющих каналов: конфигурация системы, управление в реальном и модельном (не реальном) времени, пейджинговые функции, ответы на запросы доступа и короткие сообщения. Но концептуально работа D-AMPS не отличается от работы AMPS. Когда телефон включен, он находится в контакте с базовой станцией, сообщая о себе и прослушивая управляющий канал на предмет входящих звонков. Обнаружив новый телефон, коммутатор информирует домашнюю базу абонента о его местонахождении, благодаря чему звонки могут быть корректно маршрутизированы.

Системы AMPS и D-AMPS различаются методом передачи сигнала телефона с одной базовой станцией на другую. В AMPS этим занимается коммутатор, не привлекая никакие мобильные устройства. Как видно из рис. 2.36, в D-AMPS треть времени мобильный телефон занимается не передачей и не приемом информации. Он использует пустые кадровые интервалы для измерения качества линии. Когда он обнаруживает, что сигнал пропадает, то жалуется на это коммутатору, который разрывает соединение с текущей базовой станцией. В это время телефон может попытаться найти станцию с более сильным сигналом. Как и в AMPS, на передачу уходит около 300 мс. Метод, используемый в D-AMPS, называется **передачей с помощью телефона, MAHO** (Mobile Assisted HandOff).

## GSM — глобальная система мобильной связи

Система D-AMPS широко распространена в США и (в несколько измененной форме) в Японии. Практически весь остальной мир использует систему под названием **GSM** (Global System For Mobile Communications — глобальная система мобильной связи). Впрочем, GSM начинает проникать и в США. В первом приближении, система GSM подобна D-AMPS. И та, и другая — сотовые системы. И там, и там применяется частотное уплотнение. Каждый телефон передает данные на одной частоте, а получает — на другой (последняя выше первой: 80 МГц



в D-AMPS и 55 МГц в GSM). В обеих системах пара частотных каналов разбивается с помощью временного уплотнения на кадровые интервалы, используемые несколькими абонентами. Однако каналы GSM значительно шире каналов AMPS (200 кГц против 30 кГц) и обслуживают относительно мало дополнительных пользователей (8 против 3), в результате чего в GSM скорость передачи данных одним пользователем оказывается гораздо выше, чем в D-AMPS.

Далее мы рассмотрим лишь основные свойства GSM. А печатный вариант стандарта GSM занимает свыше 5000 (sic!) страниц. Основная часть текста относится к описанию инженерных аспектов системы, в частности, устройства приемников, обрабатывающих многолучевое распространение сигналов, синхронизации приемников и передатчиков. Ни о том, ни о другом мы не сможем рассказать в этой книге.

Итак, каждая полоса частот имеет ширину 200 кГц. Система GSM имеет 124 пары симплексных каналов, как показано на рис. 2.37. Ширина пропускания каждого симплексного канала составляет 200 кГц. Канал поддерживает 8 отдельных соединений при помощи временного уплотнения. Каждой активной в данный момент базовой станции назначен один кадровый интервал на пару каналов. Теоретически, каждая сота может иметь до 992 каналов, однако многие из них сознательно делают недоступными во избежание конфликтов с соседними сотами. На рис. 2.36 восемь заштрихованных кадровых интервалов принадлежат одному и тому же соединению, по четыре в каждом направлении. Прием и передача происходят в разных интервалах, поскольку аппаратура GSM не может работать одновременно в двух режимах, и на перестройку требуется некоторое время. Если мобильной станции присвоен диапазон 980,4/935,4 МГц и кадровый интервал 2 хочет осуществить передачу на базовую станцию, он воспользуется нижним набором заштрихованных интервалов (а также последующими), размещающая в каждом из них порцию данных. Так будет продолжаться до тех пор, пока не будут посланы все данные.

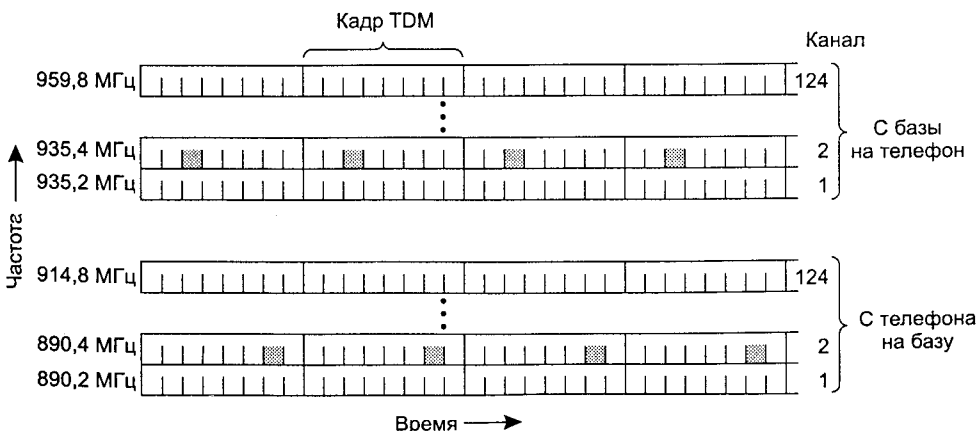


Рис. 2.37. GSM имеет 124 частотных канала, в каждом из них 8-интервальная система с разделением времени

Интервалы TDM, изображенные на рис. 2.37, являются частью сложной иерархической системы кадров. Каждый интервал имеет специфическую структуру, как и их группы. Упрощенная иерархия изображена на рис. 2.38. Мы видим здесь, что интервал TDM состоит из 148-битного кадра данных, который занимает канал на 577 мкс (включая защитный интервал длиной 30 мкс). Кадры данных начинаются и заканчиваются тремя нулями, это делается для их разграничения. В них также входят 57-битные информационные (*Information*) поля, в каждом из которых присутствует контрольный бит проверки содержимого (голос/данные). Между информационными полями имеется 26-битное поле синхронизации (*Sync*), которое используется приемником для синхронизации с границей кадра передатчика.

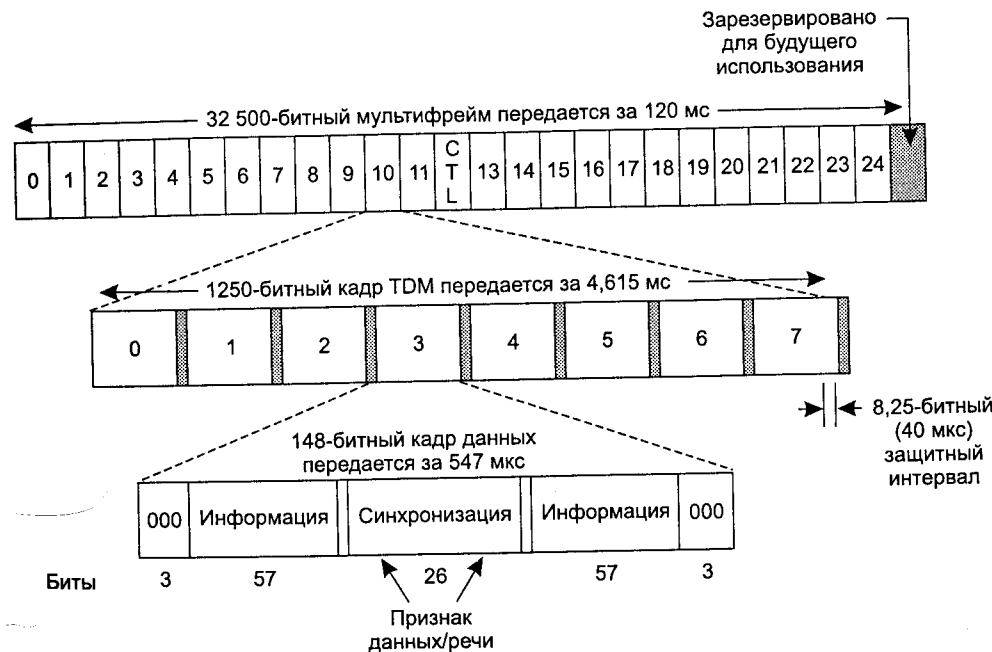


Рис. 2.38. Часть иерархической структуры кадров GSM

Кадр данных передается за 547 мкс, но передатчику разрешается посылать данные только через каждые 4,615 мс, поскольку он делит канал с семью другими станциями. Общая скорость каждого канала составляет 270 883 бит/с. Она делится между 8 пользователями. Итого получается 33,854 Кбит/с, что более чем в два раза превышает 16,2 Кбит/с D-AMPS (324 бита 50 раз в секунду). Тем не менее, как и в AMPS, на накладные расходы тратится большая часть пропускной способности, и в итоге на одного пользователя приходится 24,7 Кбит/с (перед началом исправления ошибок). После исправления ошибок остается 13 Кбит/с, с помощью которых нужно передать голос. Это уже почти в два раза лучше, чем D-AMPS (за счет использования соответственно увеличенной пропускной способности).

Как видно на рис. 2.38, 8 кадров данных образуют один кадр TDM, а 26 кадров TDM образуют 120-миллисекундный мультикадр. В мультифрейме двенадцатый интервал используется для служебных целей, а двадцать пятый зарезервирован для будущего использования, поэтому для пользовательского трафика остается только 24 интервала.

Тем не менее, в дополнение к 26-интервальному мультифрейму, показанному на рис. 2.38, используется еще и 51-интервальный мультифрейм (не показан на рисунке). Некоторые интервалы нужны для управляющих каналов. **Широковещательный управляющий канал** представляет собой непрерывный поток, исходящий от базовой станции, в котором содержатся ее идентификационная информация и статус канала. Все мобильные устройства производят мониторинг мощности сигнала, по которому они определяют моменты перехода в ведение новой БС.

**Выделенный управляющий канал** используется для поиска мобильного телефона, обновления информации о нем, регистрации и установки соединения. В частности, каждая БС содержит базу данных телефонов, находящихся в текущий момент под ее юрисдикцией. Информация, необходимая для обновления этой базы, передается по выделенному управляющему каналу.

Наконец, есть еще **общий управляющий канал**, разделяемый на три логических подканала. Первый из них — **пейджинговый канал**, с помощью которого базовая станция сообщает о входящих звонках. Каждый мобильный телефон постоянно прослушивает его в ожидании звонка, на который он должен ответить. Второй — **канал случайного доступа**, позволяющий пользователям запросить интервал в выделенном управляющем канале. Если два запроса сталкиваются (коллизия), они искажаются, и им приходится впоследствии осуществлять повторные попытки. Используя выделенный управляющий канал, мобильный телефон может инициировать исходящий звонок. Присвоенный интервал объявляется при помощи третьего подканала — **канала предоставления доступа**.

## CDMA — множественный доступ с кодовым разделением каналов

D-AMPS и GSM — это довольно традиционные системы. Они используют частотное и временное уплотнение для разделения спектра на каналы и разделения каналов на интервалы. Однако есть еще одна система из этой серии под названием **CDMA** (Code Division Multiple Access — множественный доступ с кодовым разделением каналов), которая работает совершенно по-другому. Когда CDMA была впервые предложена, реакция представителей соответствующей промышленности напоминала реакцию королевы Изабеллы, когда к ней пришел Колумб и сказал, что он достиг Индии, поплыв в направлении, противоположном нужному. Так или иначе, благодаря упорству единственной компании, Qualcomm, CDMA теперь признается не только полноценной системой мобильной связи, но и лучшей из существующих систем третьего поколения. Она также используется в США при работе с оборудованием второго поколения, конкурируя с D-AMPS. Например, персональная служба связи Sprint использует CDMA, а AT&T Wireless — D-AMPS. CDMA описывается международным стандартом IS-95, и иногда на эту

систему ссылаются именно таким образом. Также используется название торговой марки — **cdmaOne**.

Да, CDMA полностью отличается от AMPS, D-AMPS и GSM. Вместо разделения доступного частотного диапазона на сотни узких каналов в CDMA каждая станция может при передаче все время пользоваться полным спектром частот. Одновременный множественный доступ обеспечивается за счет применения теории кодирования. CDMA также отдыхает от мысли о том, что одновременно пришедшие кадры должны портиться. Вместо этого предполагается, что сигналы добавляются линейно.

Прежде чем разбирать алгоритм работы, рассмотрим следующую аналогию. Представьте себе зал ожидания в аэропорту. Множество пар оживленно беседуют. Временное уплотнение можно сравнить с ситуацией, когда все люди находятся в центре зала и говорят по очереди. Частотное уплотнение мы сравним с ситуацией, при которой люди находятся в разных углах и ведут свои разговоры, которые не слышны другим. Это происходит одновременно, но независимо. Для CDMA лучше всего подходит сравнение с ситуацией, когда все в центре зала, однако каждая пара говорящих использует свой язык общения. Франкоговорящие промывают косточки всем остальным, воспринимая чужие разговоры как шум. Таким образом, ключевой идеей CDMA является выделение полезного сигнала при игнорировании всего остального. Далее следует слегка упрощенное описание технологии CDMA.

В CDMA каждый битовый интервал разбивается на  $m$  коротких периодов, называемых **элементарными сигналами**, или чипами (chip). Обычно в битовом интервале помещаются 64 или 128 элементарных сигналов. В нашем примере мы будем допускать, что битовый интервал содержит только 8 элементарных сигналов на бит, и это надо воспринимать лишь как упрощение.

Каждой станции соответствует уникальный  $m$ -битный код, называющийся **элементарной последовательностью**. Чтобы передать 1 бит, станция посылает свою элементарную последовательность. Чтобы передать бит со значением 0, нужно отправить вместо элементарной последовательности ее дополнение (все единицы последовательности меняются на нули, а все нули — на единицы). Никакие другие комбинации передавать не разрешается. Таким образом, если  $m = 8$  и станции присвоена 8-битная элементарная последовательность 00011011, то бит со значением «1» передается кодом 00011011 (что соответствует элементарной последовательности), а бит со значением «0» передается кодом 11100100 (дополнение элементарной последовательности).

Оправдать возросшее в  $m$  раз количество информации, которое необходимо передавать (чтобы скорость составила  $b$  бит/с, нужно отправлять  $mb$  элементарных сигналов в секунду), можно только за счет увеличения в  $m$  раз пропускной способности. Таким образом, CDMA является одной из форм связи с расширенным спектром (предполагается, что никаких изменений в методах модуляции и кодирования не производилось). Если имеется полоса шириной 1 МГц, на которой работают 100 станций, то при частотном уплотнении каждая из них получила бы свои 10 кГц и работала бы со скоростью 10 Кбит/с (предположим, используется 1 бит/Гц). При CDMA все станции используют всю ширину диапазона

(1 МГц), так что скорость передачи элементарных сигналов составляет 1 Мчип/с. При кодировании одного бита элементарными последовательностями, число которых менее 100, эффективная пропускная способность CDMA выше, чем FDM, причем проблема размещения каналов решена.

Из педагогических соображений удобнее использовать биполярную запись и двоичный 0 обозначать -1, а двоичную 1 обозначать +1. В скобках будем показывать элементарные последовательности. Так, единичный бит для станции A будет выглядеть как (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1). На рис. 2.39, а мы покажем элементарные последовательности четырех станций. На рис. 2.39, б изображены они же, но в биполярной нотации.

A: 0 0 0 1 1 0 1 1	A: (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)
B: 0 0 1 0 1 1 1 0	B: (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)
C: 0 1 0 1 1 1 0 0	C: (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)
D: 0 1 0 0 0 0 1 0	D: (-1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 -1)
а	б

Шесть примеров:

-- 1 -	C	S <sub>1</sub> = (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)
- 1 1 -	B + C	S <sub>2</sub> = (-2 0 0 0 +2 +2 0 -2)
1 0 --	A + B	S <sub>3</sub> = ( 0 0 -2 +2 0 -2 0 +2)
1 0 1 -	A + B + C	S <sub>4</sub> = (-1 +1 -3 +3 +1 -1 -1 +1)
1 1 1 1	A + B + C + D	S <sub>5</sub> = (-4 0 -2 0 +2 0 +2 -2)
1 1 0 1	A + B + C + D	S <sub>6</sub> = (-2 -2 0 -2 0 -2 +4 0)
	в	

S <sub>1</sub> C = (1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1) / 8 = 1
S <sub>2</sub> C = (2 +0 +0 +0 +2 +2 +0 +2) / 8 = 1
S <sub>3</sub> C = (0 +0 +2 +2 +0 -2 +0 -2) / 8 = 0
S <sub>4</sub> C = (1 +1 +3 +3 +1 -1 +1 -1) / 8 = 1
S <sub>5</sub> C = (4 +0 +2 +0 +2 +0 -2 +2) / 8 = 1
S <sub>6</sub> C = (2 -2 +0 -2 +0 -2 -4 +0) / 8 = -1
г

Рис. 2.39. Двоичные элементарные последовательности для четырех станций (а); биполярные элементарные двоичные последовательности (б); шесть примеров передачи (в); восстановление сигнала станции C (г)

Каждая станция имеет собственную уникальную элементарную последовательность. Обозначим символом  $S$  вектор длины  $m$  для станции  $S$ , а символом  $\bar{S}$  — дополнение  $S$ . Все элементарные последовательности попарно **ортогональны**. Мы имеем в виду, что нормированное скалярное произведение двух различных элементарных последовательностей с помощью метода, известного как **коды Уолша**. Используя математическую запись, можно выразить сказанное ранее таким образом:

$$S \cdot T \equiv \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0 \quad (2.4)$$

Попросту говоря, сколько одинаковых пар, столько и разных. Это свойство ортогональности мы строго докажем чуть позже. Обратите внимание: если  $S \cdot T = 0$ , то и  $S \cdot \bar{T}$  также равно 0. Нормированное скалярное произведение любой элементарной последовательности на саму себя равно 1:

$$S \cdot S = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i S_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\pm 1)^2 = 1.$$

Это действительно так, поскольку каждое из  $m$  слагаемых суммы равно 1, поэтому вся сумма равна  $m$ . Обратите также внимание на то, что  $S \cdot \bar{S} = -1$ .

В течение каждого битового интервала станция может либо передавать 1, посылая свою элементарную последовательность, либо передавать 0, посылая дополнение к последовательности, либо может молчать и ничего не передавать. Предположим, что все станции синхронизировались во времени, то есть все последовательности начали передаваться в один и тот же момент.

Когда две или более станции пытаются осуществить одновременную передачу, их биполярные сигналы линейно складываются. Например, если при передаче одного элементарного сигнала три станции послали +1, а одна послала -1, то в результате получится +2. Можно рассматривать это как сложение напряжений: три станции имеют на выходе +1 В, а одна имеет на выходе -1 В. В результате сложения получаем +2 В.

На рис. 2.39, в изображено шесть примеров передачи, в которой одновременно принимают участие одна или несколько станций. В первом примере C передает единичный бит, поэтому мы просто получаем элементарную последовательность этой станции. Во втором примере и B, и C передают единичные биты, в результате чего мы получаем сумму их биполярных последовательностей, а именно:

$$(-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1) + (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1) = (-2 0 0 0 +2 +2 0 -2).$$

В третьем примере станция A посылает 1, а станция B посылает 0. Прочие молчат. В четвертом примере A и C посылают 1, тогда как B посылает 0. В пятом примере все четыре станции посылают 1. Наконец, в последнем случае A, B и D посылают единичный бит, а C посылает нулевой. Обратите внимание на то, что каждой из шести последовательностей (от S<sub>1</sub> до S<sub>6</sub>), представленных на рис. 2.39, в, соответствует один битовый интервал.

Чтобы восстановить исходный битовый поток каждой из станций, приемник должен заранее знать элементарные последовательности всех передатчиков, с которыми он работает. Восстановление осуществляется путем вычисления нормированного скалярного произведения принятой последовательности (то есть линейной суммы сигналов всех станций) и элементарной последовательности той станции, чей исходный сигнал восстанавливается. Если принята элементарная последовательность S и приемник пытается понять, что передала станция с элементарной последовательностью C, то производится вычисление нормированного скалярного произведения S · C.

Чтобы понять, как это все работает, давайте представим себе эти две станции, A и C. Пусть обе передают единичный бит, в то время как станция B передает ну-

левой бит. Приемник получает сумму сигналов, которая равна  $S = A + \bar{B} + C$  и вычисляет произведение:

$$S \cdot C = (A + \bar{B} + C) \cdot C = A \cdot C + \bar{B} \cdot C + C \cdot C = 0 + 0 + 1 = 1.$$

Первые два слагаемые равны нулю, потому что все пары элементарных последовательностей тщательно подбирались такими, чтобы они были ортогональными, см. выражение (2.4). Теперь должно быть понятно, почему это условие должно быть наложено на элементарные последовательности.

Можно представить себе эту задачу и по-другому. Допустим, приемник получил вместо суммы сигналов отдельные сигналы. В этом случае приемник будет вычислять скалярные произведения каждого из них по отдельности, а результаты складывать. Благодаря свойству ортогональности, все скалярные произведения, кроме  $C \cdot C$ , равны 0. Сложение с последующим вычислением скалярного произведения равносильно суммированию скалярных произведений.

Обратимся снова к шести примерам, показанным на рис. 2.39, в. Конкретный результат декодирования этих последовательностей представлен на рис. 2.39, г. Допустим, приемник заинтересован в извлечении потока битов, посланного станцией  $C$ , из всех шести последовательностей  $S_1 - S_6$ . Для этого он вычисляет каждый бит путем суммирования парных произведений принятой последовательности ( $S$ ) и вектора  $C$  (см. рис. 2.39, б), затем деления результата на 8 (так как  $m = 8$  в данном случае). Как видите, каждый раз находится верный бит. Это так же просто, как говорить по-французски!

В идеальной системе CDMA без шума емкость (то есть допустимое количество станций) может быть сколь угодно большим, как и емкость идеального бесшумного канала Найквиста может увеличиваться за счет повышения количества бит на отсчет. На практике, конечно же, физические ограничения очень сильно уменьшают емкость системы. Во-первых, мы предполагали, что все последовательности синхронизированы по времени. На самом же деле точную синхронизацию обеспечить невозможно. Единственное что можно сделать, — это организовать форсирование приемником отправки со стороны передатчика достаточно длинной элементарной последовательности, по которой приемник мог бы осуществить синхронизацию. Все остальные (несинхронизированные) посылки при этом рассматриваются как случайный шум. Если их не очень много, базовый алгоритм декодирования работает неплохо. С наложением элементарных последовательностей на шумовой фон связана довольно обширная теория (см. Pickholtz и др., 1982). Как нетрудно догадаться, чем длиннее элементарная последовательность, тем выше вероятность ее корректного детектирования на фоне шума. Для повышения надежности битовая последовательность может использовать код с коррекцией ошибок. Элементарные последовательности никогда не используют коррекцию ошибок.

Еще одним очевидным допущением, которым мы пользовались в наших рассуждениях, является предположение о том, что мощности всех станций такие же, как воспринимаемые приемником. Система CDMA обычно используется в беспроводной связи, где всегда присутствует базовая стационарная станция и множество мобильных станций, расположенных на разных расстояниях от нее. Уровни мощности, воспринимаемые приемником, конечно, зависят от того, на-

сколько далеко находятся передатчики. Хорошим эвристическим правилом является правило компенсации мощностей: чем слабее сигнал, принимаемый мобильным телефоном от базовой станции, тем мощнее должен быть его исходящий сигнал. Другими словами, мобильная станция, получающая слабый сигнал от базовой станции, будет посылать более мощный сигнал, чем станция, получающая мощный сигнал с БС. Мощности могут также контролироваться базовыми станциями, выдающими команды мобильным станциям увеличить или уменьшить свою мощность.

Еще мы предполагали, что приемник знает, кто отправляет ему данные. В принципе, имея достаточно мощные вычислительные возможности, базовая станция может слушать одновременно всех отправителей и исполнять алгоритм декодирования параллельно для всех передатчиков. Но об этом проще говорить, чем реализовывать. В CDMA есть еще много сложных вещей, которые мы опустили в нашем кратком рассказе. Тем не менее, это хорошо продуманная схема, которая все шире применяется в беспроводной связи. Стандартной полосой CDMA является 1,25 МГц (против 30 кГц в D-AMPS и 200 кГц в GSM), и в этой полосе система может обслуживать гораздо больше пользователей, чем любая другая система. При этом каждому пользователю предоставляется пропускная способность, которая, по крайней мере, не хуже, чем в GSM, а зачастую даже лучше.

Инженеры, которые хотят получить более полное представление о CDMA, могут обратиться к книге (Lee and Miller, 1998). Альтернативная схема, в которой распределение осуществляется не по частотам, а по времени, описано в (Crespo и др., 1995). Еще одну схему можно найти в (Sari и др., 2000). Для чтения всех этих книг необходимо обладать знаниями теории связи.

## Мобильные телефоны третьего поколения: цифровая речь и данные

Каким будет будущее мобильной телефонии? Давайте попробуем разобраться. Развитием этой отрасли движет большое количество факторов. Во-первых, объем передаваемых данных уже превышает объем передаваемой речи в стационарных сетях, и первый показатель растет экспоненциально, тогда как последний растет довольно вяло. Многие эксперты предрекают такое же будущее и мобильным сетям: трафик данных превысит голосовой трафик. Во-вторых, компьютерная индустрия и индустрия телефонии и развлечений уже стали полностью цифровыми и быстро объединяются. Многие восхищаются компактностью и малым весом портативного устройства, которое выступает в качестве телефона, проигрывателя компакт-дисков, DVD-проигрывателя, терминала для электронной почты, обладает веб-интерфейсом, возможностями текстового редактора, включает в себя электронные игры и многое другое. С его помощью можно без всяких проводов в любой точке мира получить высокоскоростной доступ в Интернет. Все это называется третьим поколением мобильной телефонии. Дополнительную информацию см. (Huber и др., 2000; Sarikaya, 2000).

Еще в 1992 году международный союз телекоммуникаций, ITU, сделал попытку конкретизировать и реализовать эти мечты и выпустил проект под назва-

нием **ИМТ-2000**, где ИМТ означало «международная мобильная связь» (International Mobile Telecommunications). Что касается числа 2000, то оно нужно было для трех вещей: во-первых, оно указывало на год, в котором задумывалось ввести в строй этот проект; во-вторых, именно на такой частоте (в мегагерцах) должна была работать система; в-третьих, предполагалось установить такую ширину полосы (в килогерцах).

Ни один из трех пунктов осуществлен не был. В 2000 году система реализована не была. ИТУ рекомендовал правительствам всех стран зарезервировать частоту 2000 МГц (2 ГГц) для международного роуминга. Рекомендации последовал только Китай. Наконец, в какой-то момент осознали, что невозможно выделить каждому пользователю пропускную способность в 2 Мбит/с, особенно учитывая *особую* мобильность многих из них (просто нереально с достаточно высокой скоростью осуществлять передачу с одной базовой станции на другую). Более реалистично выглядит выделение 2 Мбит/с стационарным абонентам, которые сидят дома (в этом случае такая система будет серьезным конкурентом ADSL), 384 Кбит/с для людей, которые не спеша прогуливаются по парку, и 144 Кбит/с — для связи с абонентами, движущимися в автомобилях. Тем не менее, вокруг **3G**, как называют третье поколение мобильной связи, кипит бурная деятельность. Третье поколение еще не оправдало в полной мере тех надежд, которые с ним связывали, однако вскоре несомненно оправдает.

Вот основные сервисы, для предоставления которых задумывалась сеть ИМТ-2000:

1. Высококачественная передача речи.
2. Обмен сообщениями (замена e-mail, факса, SMS, чата и т. д.).
3. Мультимедиа (проигрывание музыки, видео, фильмов, телевидения и т. д.).
4. Доступ в Интернет (включая просмотр страниц с аудио- и видеoinформацией).

В качестве дополнительных услуг могут быть видеоконференции, телепрезентации, групповые электронные игры, мобильная коммерция (использование мобильного телефона для оплаты покупок). Более того, все эти сервисы должны быть доступны по всему миру (с автоматическим соединением через спутник в тех местах, где стационарная сеть отсутствует) на основе постоянного подключения и с гарантированным качеством обслуживания.

ИТУ задумывал ИМТ-2000 как единую технологию, чтобы производители могли выпустить универсальное устройство, которое можно было бы продавать по всему миру (как компьютеры и проигрыватели компакт-дисков и не в пример мобильным телефонам и телевизорам). Одна стандартная технология сильно упрощает жизнь операторам связи и привлекает клиентов. Война форматов (так получилось с Betamax и VHS в мире видеозаписи), которая вначале воспринималась как вид конкуренции, оказалась неблагоприятной для бизнеса.

Было выдвинуто несколько технических предложений, впоследствии некоторые отсеялись и остались две основные технологии. Первая из них называется широкополосным CDMA (W-CDMA, Wideband CDMA) и была предложена фирмой Ericsson. Система использует расширение спектра с применением кода прямой последовательности, такой метод мы уже описывали ранее. Полоса пропускания

составляет 5 МГц и предназначена для межсетевых обмена с сетями стандарта GSM, хотя система не имеет обратной совместимости с GSM. Зато она обладает свойством, которое позволяет пользователю при выходе из соты W-CDMA и входе в ячейку GSM не прерывать звонок. Эта система была продвинута Европейским Союзом, который назвал ее **UMTS** (Universal Mobile Telecommunications System — универсальная система мобильной связи).

Вторым претендентом стала система **CDMA2000**, предложенная Qualcomm. В ней также используется принцип расширения спектра с применением кода прямой последовательности, да и вообще ее можно рассматривать как расширение IS-95 (между прочим, имеется обратная совместимость с этим стандартом). Полоса пропускания имеет ширину 5 МГц, однако CDMA2000 не предназначена для межсетевого взаимодействия с GSM, и передача соединения при переходе в ячейку GSM (или D-AMPS) не осуществляется. Среди других технических отличий от W-CDMA стоит отметить иную скорость следования элементарных посылок, иные кадровый интервал, используемый спектр и способ синхронизации.

Если бы инженеров из Ericsson и Qualcomm посадили за стол переговоров и поставили бы задачу выработать единую систему, они, наверное, справились бы с этим. В конце концов, базовый принцип обеих систем — это CDMA на канале с полосой 5 МГц. Вроде бы никто не собирается драться на дуэли из-за скорости элементарных посылок. Беда в том, что настоящей проблемой, как всегда, является отнюдь не инженерное решение, а политика. Европе требовалась система, умеющая работать с GSM; Соединенным Штатам нужна была система, совместимая с одной из уже существующих там систем (IS-95). Каждая сторона подерживала свою компанию (Ericsson находится в Швеции, Qualcomm — в Калифорнии). В конце концов, обе компании оказались вовлечены во множественные тяжбы, связанные с патентами на технологию CDMA.

В марте 1999 года судебные разбирательства закончились тем, что Ericsson согласилась приобрести инфраструктуру Qualcomm. Компании также согласились на единый стандарт 3G, однако с множеством несовместимых функций, которые, впрочем, в большой степени связаны с документацией, а не с техническими различиями. Несмотря на все разногласия, в скором времени появятся службы и устройства 3G.

О системах 3G написано много, причем отзывы в основном восторженные. Большинство пишет о третьем поколении мобильной связи в том духе, что это самое большое достижение со времен изобретения хлебoreзки. Вот библиографические ссылки: (Collins and Smith, 2001; De Vriendt и др., 2002; Harte и др., 2002; Lu, 2002; Sarikaya, 2000). Тем не менее, есть авторы, которые полагают, что отрасль мобильной телефонии идет в неверном направлении (Garber, 2002; Goodman, 2000).

Пока бояре борются в попытках прийти к соглашению по системам 3G, некоторые операторы связи уже делают первые робкие шаги в направлении 3G, предлагая, что называется, **2,5G**, хотя более точно было бы назвать это 2,1G. Одна такая система называется **EDGE** (Enhanced Data rates for GSM Evolution — повышенные скорости передачи для развития GSM) и представляет собой обычный GSM с увеличенным числом бит на бод. Проблема состоит в том, что чем больше би-

тов используется, тем больше вероятность ошибок. Поэтому в EDGE применяются девять различных схем модуляции и коррекции ошибок. Отличаются они друг от друга процентом пропускной способности, выделяемым на исправление ошибок, возникающих вследствие повышенной скорости.

Еще одной системой «второго с половиной поколения» является **GPRS** (General Packet Radio Service — общие услуги пакетной радиосвязи) — пакетная сеть на базе D-AMPS или GSM. Она позволяет обмениваться IP-пакетами по голосовым каналам сотовой связи. При работе GPRS некоторые временные интервалы на некоторых частотах резервируются под пакетный трафик. Число и расположение этих интервалов могут динамически изменяться базовой станцией в зависимости от соотношения голосового и информационного трафика в ячейке.

Доступные временные интервалы делятся на несколько логических каналов, используемых для разных целей. Базовая станция определяет, в каких интервалах располагаются эти каналы. Один канал предназначен для передачи пакетов с базовой на мобильную станцию, причем каждый пакет имеет поле индикации места своего назначения. Чтобы послать IP-пакет, мобильная станция запрашивает один или несколько временных интервалов, посылая на БС соответствующий запрос. Если запрос приходит неповрежденным, обратно отсылается информация о частоте и интервале, в котором можно передавать IP-пакет. Как только на базовую станцию прибывает пакет, она по обычному кабельному соединению пересылает его в Интернет. Поскольку система GPRS работает лишь как надстройка над существующей голосовой системой, ее можно рассматривать в лучшем случае как временную затычку, которая не понадобится, когда будет введена в строй 3G.

Даже несмотря на то, что 3G до сих пор не реализован в полном объеме, многие исследователи рассматривают его появление как уже свершившийся факт и поэтому не очень интересуются проблемами его изучения. Эти люди уже работают над созданием систем четвертого поколения (Berezdivin и др., 2002; Guo and Chaskar, 2002; Huang and Zhuang, 2002; Kellerer и др., 2002; Misra и др., 2002). 4G будет характеризоваться высокой пропускной способностью, повсеместной применимостью, полной интеграцией с кабельными сетями, особенно IP, адаптивным управлением ресурсами и частотным спектром, программным радио и высоким качеством обслуживания в области мультимедиа.

С другой стороны, повсеместно устанавливается такое большое количество точек доступа к беспроводным ЛВС стандарта 802.11, что многие рассматривают 3G не как свершившийся факт, а как мертворожденное поколение систем. По мнению многих, людям не составит труда оставаться на связи, просто перемещаясь от одной такой точки доступа к другой. Сказать, что данная отрасль находится в стадии бурных изменений — значит не сказать ничего. Посмотрим, что будет лет через пять. Скорее всего, изменится очень многое.

## Кабельное телевидение

Мы уже изучили более или менее подробно стационарные и беспроводные телефонные системы. Они, безусловно, будут играть важную роль в сетевых технологиях будущего. Тем не менее, все популярнее становится альтернативная стацио-

нарная сетевая система, а именно кабельное телевидение. Многие уже получают доступ в Интернет и телефонные услуги по кабельным сетям, и их операторы стремятся расширить потребительский рынок. В следующих разделах мы будем обсуждать кабельное телевидение как сетевую структуру и как альтернативу телефонной системе, которую мы только что изучили. Дополнительную информацию по этой теме можно получить в изданиях (Laubach и др., 2001; Louis, 2002; Ovadia, 2002; Smith, 2002).

## Абонентское телевидение

Кабельное телевидение впервые появилось в конце 1940-х годов и было способом улучшить прием сигнала в отдаленных поселках и горной местности. Система изначально состояла из большой антенны, расположенной на вершине холма и улавливающей телевизионный сигнал, усилителя, называемогося **распределительным устройством**, и коаксиального кабеля, по которому сигнал доставлялся непосредственно к абонентам, как показано на рис. 2.40.

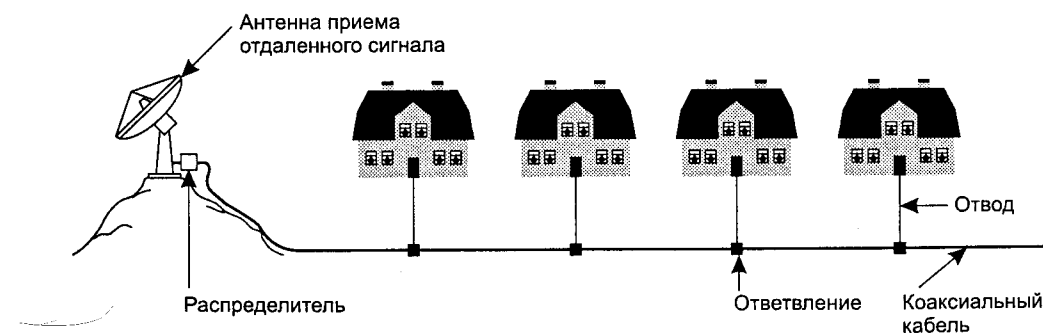


Рис. 2.40. Первая система кабельного телевидения

Вначале такая система называлась **абонентским телевидением**, или телевидением с коллективной антенной. Ее могло содержать даже какое-нибудь маленькое частное семейное предприятие. Любой предприниматель, немножко знакомый с электроникой, мог установить у себя в населенном пункте оборудование, и ему оставалось только найти клиентов, готовых оплачивать услуги. По мере роста числа абонентов необходимо было добавлять кабели и усилители. Передача была исключительно односторонней: от распределителя к пользователям. К 1970 году появились тысячи независимых систем.

В 1974 году корпорация Time основала новый канал под названием «Домашняя билетная касса», который представлял собой кабельное кино. Затем появились другие подобные тематические каналы: спортивный, кулинарный, новостной и т. д. Это привело к двум изменениям в данной отрасли. Во-первых, крупные корпорации стали скупать существующие кабельные системы и прокладывать свои кабели для привлечения новых клиентов. Во-вторых, со временем появилась необходимость в объединении систем, зачастую расположенных в различ-

ных городах, с целью основания новых кабельных каналов. Различные кабельные компании стали объединять свои сети, организуя единые региональные и национальные сети. Примерно то же самое происходило восемьдесятю годами ранее с телефонными сетями. Изолированные друг от друга телефонные станции стали объединяться, что позволило организовывать междугородные звонки.

## Кабельный Интернет

В течение долгих лет кабельная система расширялась, и обычные кабели между городами стали заменяться оптоволоконными с высокой пропускной способностью. Примерно то же самое стало происходить в телефонной сети. Система, использующая оптическое волокно на длинных магистралях и коаксиальный кабель для подвода сигнала к домам, получила название **HFC** (Hybrid Fiber Coax — комбинированная оптокоаксиальная кабельная система). Электрооптические преобразователи, реализующие интерфейс между оптической и электрической частями сети, называются **оптоузлами**. Поскольку пропускная способность оптических кабелей гораздо выше, чем коаксиальных, один оптоузел может обслуживать несколько низкоскоростных линий. Часть современной системы HFC показана на рис. 2.41, а.

В последнее время многие операторы кабельных сетей решили, что пора начать проникновение в бизнес предоставления доступа в Интернет. Некоторые, впрочем, захотели заняться также кабельной телефонией. Технические различия кабельного телевидения и телефонии определили инженерные задачи, которые предстояло решить. Прежде всего необходимо было заменить все односторонние усилители двухсторонними.

Между тем есть еще одно существенное различие между HFC (рис. 2.41, а) и телефонной системой (рис. 2.41, б), которое устранить гораздо сложнее. Кабель может быть один на несколько домов, а телефонный провод местной линии в каждую квартиру подводится свой. Когда речь идет о широкоэмитальном телевидении, особой разницы нет. Все телепрограммы распространяются по кабелю, и не важно, 10 или 10 000 абонентов будут подключены к нему. Но когда один и тот же кабель используется для доступа в Интернет, то один клиент, скачивающий очень большой файл, потенциально может тем самым отнимать существенную часть пропускной способности у всех остальных. Чем больше пользователей, тем жестче конкуренция между ними в этом смысле. В телефонной системе такого нет: передача большого файла по каналу ADSL никак не влияет пропускную способность соседнего канала. С другой стороны, пропускная способность коаксиального кабеля много выше, чем витой пары.

Как же была решена эта проблема? Довольно просто: длинные кабели были разделены на короткие участки, напрямую подключаемые к оптоузлу. Доступная полоса пропускания на участке от распределителя до каждого оптоузла очень велика, и, поскольку в одном сегменте кабеля обычно не бывает большого числа абонентов, трафик вполне управляем. Обычный кабельный сегмент охватывает 500–2000 домов, однако всё больше людей подключается к кабельному Интернету, поэтому иногда требуется более мелкое разбиение, что приводит к появлению дополнительных оптоузлов.

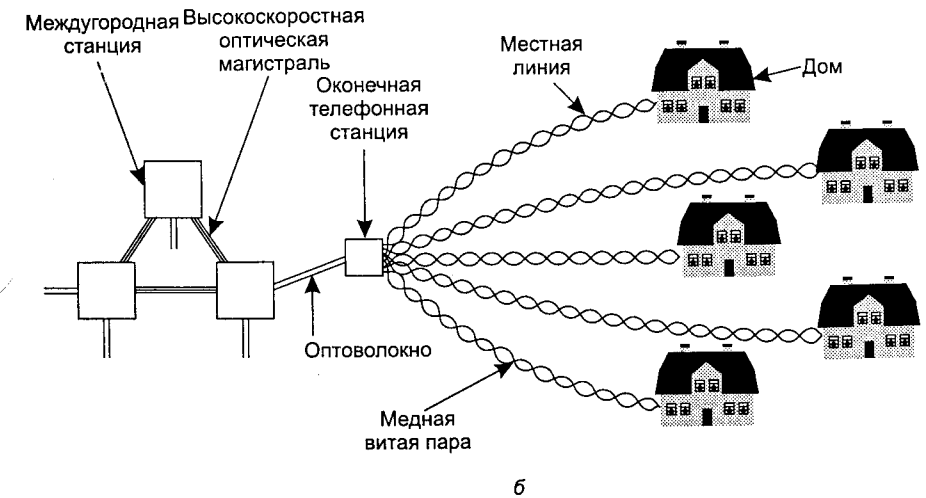
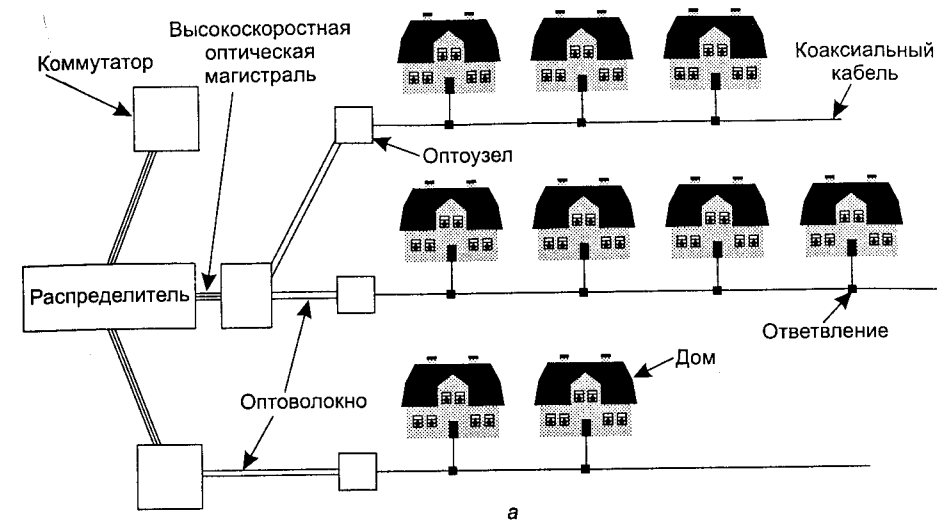


Рис. 2.41. Кабельное телевидение (а); стационарная телефонная система (б)

## Распределение спектра

Если выкинуть все телевизионные каналы и использовать кабельную инфраструктуру исключительно для доступа в Интернет, это приведет к появлению большого числа недовольных пользователей, поэтому никто так не делает. Более того, в большинстве городов существуют определенные ограничения, не позволяющие так сделать, даже если какая-нибудь компания и захочет. Значит, нужно было найти какой-то способ совместного существования телевизионного сигнала и цифровых данных на одном кабеле.

Кабельное телевидение в Северной Америке традиционно занимает частоты с 54 до 550 МГц (за исключением диапазона с 88 до 108 МГц, отданного FM-радио). Ширина полосы каждого канала составляет 6 МГц, включая защитные полосы. В Европе нижний предел обычно ограничен 65 МГц, а каналы имеют ширину полосы 6–8 МГц, что позволяет увеличить разрешение, требуемое системам PAL и SECAM, однако это не очень принципиально. Нижняя часть спектра не используется. Современные кабели хорошо работают на частотах свыше 550 МГц, часто до 750 МГц и выше. Было принято решение выделить под исходящие каналы частоты 5–42 МГц (чуть выше в Европе), а высокие частоты использовать для входящих каналов. Распределение спектра в кабельных системах показано на рис. 2.42.

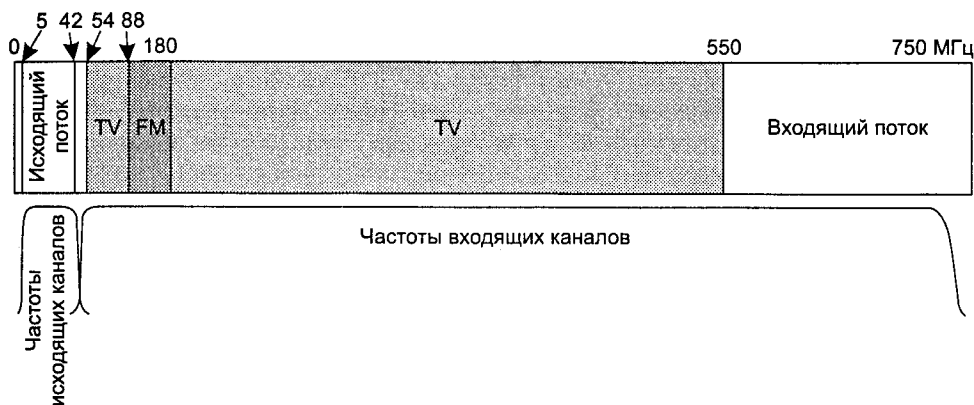


Рис. 2.42. Распределение частот в типичной системе кабельного телевидения, используемой для доступа в Интернет

Обратите внимание: поскольку телевизионный сигнал целиком идет только в одном направлении (входящем), можно использовать исходящие усилители, работающие только в диапазоне 5–42 МГц, а входящие — в диапазоне 54 МГц и выше, как показано на рисунке. Итак, входящий и исходящий спектры имеют сильный дисбаланс благодаря тому, что основная доля трафика приходится на телевидение и входящие интернет-каналы. И операторы кабельного телевидения, и компании, занимающиеся кабельным Интернетом, остались довольны таким распределением. Как мы уже говорили, телефонные компании часто предлагают асимметричный DSL-сервис, хотя у них нет особых технических оснований, чтобы так делать.

Длинные коаксиальные кабели не лучше местных телефонных линий, когда речь идет о передаче цифровых данных. Поэтому здесь также нужна аналоговая модуляция. Обычно применяется схема, при которой берутся каждые 6 или 8 МГц входящего канала и модулируются с помощью QAM-64 или (если кабель отменного качества) QAM-256. При канале шириной 6 МГц и методе QAM-64 мы получаем скорость около 36 Мбит/с. Если вычесть накладные расходы, чистая скорость передачи данных составит 27 Мбит/с. При использовании QAM-256 чистая скорость повышается до 39 Мбит/с. Европейские значения на треть выше.

Для исходящих потоков даже QAM-64 не очень подходит. Слишком много на соответствующих частотах помех от микроволновых устройств, СВ-радиостанций и других источников. Исходя из этого применяют более медленную, но надежную схему — QPSK. Этот метод (см. рис. 2.21) использует всего лишь два бита на бод вместо 6 или 8, которые используются методами QAM на входящем потоке. Таким образом, асимметрия между пропускной способностью входящих и исходящих каналов даже выше, чем можно предположить исходя из рис. 2.42.

Кроме обновления усилителей, оператору нужно обновить и распределительное устройство на входе системы. Вместо латентного усилителя нужно поставить интеллектуальное цифровое вычислительное устройство с высокоскоростным оптоволоконным интерфейсом к провайдеру. Иногда обновляется даже имя этого устройства: вместо распределителя его называют **CMTS** (Cable Modem Termination System — окончательное устройство кабельного модема). Далее мы воздержимся от столь значительного обновления и будем по-прежнему называть распределитель распределителем.

## Кабельные модемы

Для доступа в Интернет нужен кабельный модем — устройство, имеющее два интерфейса: один к компьютеру, второй — к кабельной сети. В первые годы существования кабельного Интернета у оператора связи были свои модемы, которые устанавливались у абонента специалистом службы технической поддержки. Однако затем стало понятно, что открытый стандарт может позволить создать рынок конкурентоспособных кабельных модемов, снизить цены на них и тем самым привлечь клиентов. Более того, возможность купить кабельный модем в обычном магазине и установить его самостоятельно (как пользователи всегда устанавливали телефонные модемы стандарта V.9x) позволит избежать ужасных расходов на оплату выезда специалиста.

В результате многие операторы кабельных сетей объединились с фирмой CableLabs с целью выработки стандарта на кабельные модемы и тестирования продукции на совместимость. Модемы появившегося стандарта **DOCSIS** (Data Over Cable Service Interface Specification — спецификация передачи данных по кабельному интерфейсу) сейчас только начинают заменять собственные модемы операторов. Европейская версия стандарта называется **EuroDOCSIS**. Однако не всем операторам нравится идея свободной продажи стандартных кабельных модемов — слишком уж хорошие деньги они получают за сдачу в аренду модемов своим захваченным в плен клиентам. Открытый стандарт, породивший десятки фирм — производителей кабельных модемов, продающих их в магазинах, ведет к концу подобной практики.

Интерфейс между модемом и компьютером довольно традиционен. Обычно это Ethernet со скоростью 10 Мбит/с (иногда USB). Кабельные модемы скоро будут напоминать обычные внутренние модемы и размерами, и способом установки.

Второй интерфейс более сложный. Немалая часть стандарта посвящена радиотехническим решениям, но обсуждение этого вопроса выходит за рамки данной



книги. Единственное, что необходимо отметить, это то, что, как и ADSL-модемы, кабельные модемы находятся на постоянном подключении. Они устанавливаются сразу же после подачи питания и постоянно поддерживают его, поскольку операторы кабельных сетей не взимают плату за время на линии.

Чтобы лучше понять, как происходит работа кабельного модема, рассмотрим, что происходит при его включении. Модем начинает прослушивать входящий канал в поисках специального пакета, время от времени посылаемого распределителем. В нем сообщаются системные параметры для модемов, только что включившихся в работу. После обнаружения данного пакета новый модем объявляет о своем появлении по одному из исходящих каналов. Распределитель отвечает, присваивая модему входящий и исходящий каналы. Впрочем, исходное распределение каналов может быть динамически изменено распределителем, если он решит, что необходимо сбалансировать нагрузку.

Затем модем определяет, на каком расстоянии от распределителя он находится. Для этого посылается специальный пакет и высчитывается время, через которое приходит ответ. Этот процесс называется **измерением дальности**. Модему необходимо знать эти данные, чтобы настроить работу исходящих каналов и правильно синхронизироваться. Время работы делится на **мини-интервалы**. Каждый исходящий пакет должен уместиться в один или несколько соседних мини-интервалов. Распределитель анонсирует каждое начало цикла мини-интервалов, однако этот «стартовый выстрел» модемы слышат не одновременно, поскольку они находятся на разных расстояниях. Зная свое удаление от распределителя, модем может вычислить, когда на самом деле был послан принятый им сигнал начала мини-интервала. Длина мини-интервала зависит от сети. Обычно объем полезной информации в нем равен 8 байт.

Во время инициализации распределитель также присваивает модему мини-интервал для запроса пропускной способности исходящего канала. Как правило, одному и тому же мини-интервалу запроса соответствует несколько модемов, что приводит к конкуренции между ними. Когда компьютер хочет отослать пакет данных, он передает его модему, который запрашивает необходимое количество мини-интервалов для него. Если запрос принят, то распределитель посылает подтверждение по входящему каналу. В подтверждении модему сообщается, какие мини-интервалы зарезервированы для него. После этого пакет отправляется, начиная с первого «своего» мини-интервала. Используя специальное поле заголовка, можно сообщить о необходимости передать дополнительные пакеты.

Если же один и тот же мини-интервал хотят получить несколько станций одновременно, то никакого подтверждения не высылается, а эти станции могут повторить попытку только через случайный промежуток времени. Если при повторной попытке снова возникла коллизия, то случайный промежуток удваивается. (Для читателей, уже немного знакомых с сетевыми технологиями: это интервальный метод ALOHA с экспоненциальной двоичной отсрочкой передачи. Ethernet не может использоваться в качестве кабельного интерфейса, поскольку станции не могут прослушивать линию. Мы вернемся к этим вопросам в главе 4.)

Входящие каналы управляются не так, как исходящие. Во-первых, отправитель в этом случае только один — распределитель, поэтому не возникает никакой борьбы за линию и нет необходимости в мини-интервалах, которые, на самом деле, являются разновидностью статистического временного уплотнения. Во-вторых, трафик входящего канала обычно гораздо выше, чем исходящего, поэтому используются пакеты фиксированного размера — 204 байта. Часть пакета — код коррекции ошибок Рида—Соломона плюс еще некоторая служебная информация. Собственно данные занимают в пакете 184 байта. Эти числа были выбраны из соображений совместимости с цифровым телевидением, использующим MPEG-2, так что телевизионный и входящий информационный каналы имеют один и тот же формат. Логическая структура соединения показана на рис. 2.43.

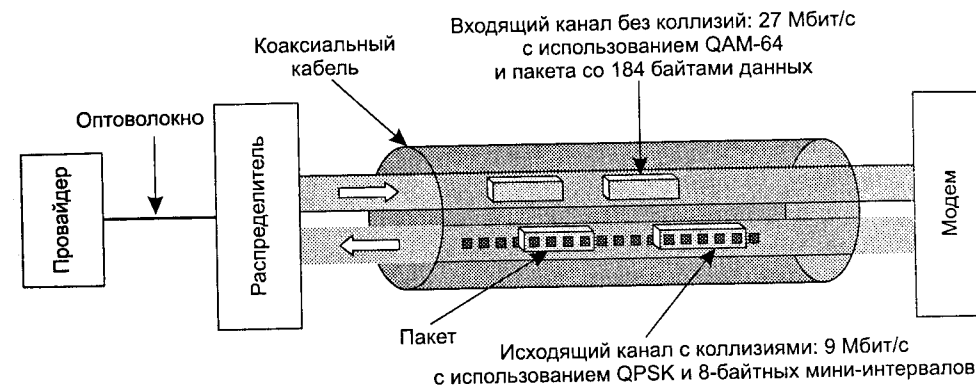


Рис. 2.43. Типичная схема входящего и исходящего каналов, принятая в США

Вернемся к инициализации модема. Когда он закончил измерение дальности и получил исходящий канал, входящий канал и мини-интервалы, он может начать передавать пакеты. Первый пакет, который он посылает, адресован провайдеру и содержит запрос на получение IP-адреса, который присваивается динамически с использованием протокола DHCP (мы изучим его в главе 5). Также у распределителя запрашивается точное время суток.

Следующий шаг связан с защитой данных. Поскольку кабель — это совместно используемый ресурс, каждый желающий может прочитывать трафик, проходящий мимо него. Чтобы предотвратить нежелательный доступ к информации соседа (буквально), все данные передаются в зашифрованной форме в обоих направлениях. Часть процедуры инициализации включает в себя обмен ключами шифра. На первый взгляд кажется невозможной задача незаметной передачи ключа при свете дня и огромном скоплении народа. На самом деле, задача вполне осуществима, но чтобы понять, как это делается, придется подождать до главы 8 (вкратце: используется алгоритм Дифи—Хеллмана).

Наконец, модему нужно идентифицировать себя по защищенному каналу. После этого инициализация считается завершенной. Пользователь может соединиться с провайдером и начинать работу.

Конечно, о кабельных модемах можно было бы говорить еще долго. Вот некоторые ссылки (Adams and Dulchinos, 2001; Donaldson and Jones, 2001; Dutta-Roy, 2001).

## ADSL или кабель?

Что лучше, ADSL или кабельная сеть? С тем же успехом можно спорить о том, какая операционная система лучше. Или какой язык. Или какая религия. Ответ зависит от того, кого вы спрашиваете. Давайте сравним ADSL и кабельные сети по нескольким параметрам. И та, и другая система в качестве магистрального носителя использует оптическое волокно, однако на его концах используются разные типы носителей. В кабельных сетях это коаксиал, в ADSL — витая пара. Теоретически, пропускная способность коаксиального провода в сотни раз выше, чем у витой пары. Тем не менее, полная пропускная способность все равно недоступна пользователям кабельных систем, потому что большая часть полосы пропускания занята совершенно бесполезными вещами — телевизионными программами. На практике довольно трудно говорить о реальной эффективной емкости каналов. Провайдеры ADSL заявляют некоторую пропускную способность (например, 1 Мбит/с по входящему каналу, 256 Кбит/с по исходящему) и обычно достигают примерно 80 % от нее. Провайдеры кабельных сетей не делают никаких заявлений относительно скорости, поскольку все зависит от того, сколько пользователей находится в данном сегменте кабеля. Иногда скорость будет выше, чем в ADSL, иногда — ниже. Раздражает в данном случае, на самом деле, непредсказуемость. Если сейчас все «летает», это не означает, что через минуту будет так же, потому что не исключено, что именно сейчас самый большой свинтус в районе, занимающий своим трафиком всю пропускную способность сегмента, включает свой компьютер.

По мере привлечения в ADSL все большего числа пользователей качество обслуживания практически не снижается, поскольку каждый абонент имеет выделенное соединение. В кабельной системе каждый новый пользователь сегмента снижает качество обслуживания в целом. Единственный выход из данной ситуации — разбивать загруженные участки на более мелкие и подсоединять их напрямую к оптическому кабелю. Это стоит довольно дорого, поэтому операторы всячески стараются избежать таких ситуаций.

Мы, между прочим, уже изучили одну систему с совместно используемым каналом — мобильную телефонную систему. Там тоже имеются группы пользователей, находящихся в одной ячейке, каждый из которых занимает какую-то часть пропускной способности. Обычно существует жесткое разделение используемых ресурсов, для этого применяется частотное или временное уплотнение, потому что речевой трафик обычно довольно ровный. Однако применять жесткое разделение ресурсов при передаче данных оказывается крайне неэффективным, потому что зачастую канал вообще простаивает, тогда зарезервированные ресурсы тратятся просто так. Несмотря на все это, в этом смысле кабельная система гораздо ближе к мобильной телефонии, чем к стационарным системам.

Доступность — это параметр, по которому ADSL и кабельные сети отличаются друг от друга. У каждого есть телефон, но не каждый живет достаточно близко к оконечной ADSL-станции, чтобы установить соответствующую систему. С другой стороны, не у всех есть кабель в доме или в районе, но если уж он есть, то удаленность от оптоузла или распределительного устройства большой роли не играет. Стоит также отметить, что, поскольку кабельные системы начались с кабельного телевидения, корпоративных клиентов у них очень мало.

Будучи двухточечной системой, ADSL является более защищенной, чем кабельная сеть. Любой абонент последней может запросто считывать все пакеты, проходящие мимо него. По этой причине любой приличный оператор кабельной сети предлагает шифрование трафика обоих направлений. И все же, даже если пакет перехвачен в зашифрованном виде, это менее безопасно, чем полное отсутствие возможности перехвата.

Телефонная система, вообще говоря, надежнее кабеля. Например, существует система резервного питания, которая позволяет телефонной сети работать даже при временных отключениях электричества. Если же отключится питание какого-либо усилителя кабельной сети, все пользователи, находящиеся в его ведении, сразу потеряют соединение.

Наконец, существует большой выбор провайдеров ADSL. Иногда это даже форсируется специальными законодательными актами. Этого не скажешь про операторов кабельных сетей. Далеко не всегда есть какой-либо выбор.

Вывод такой: ADSL и кабельные сети имеют много общего и отличаются друг от друга не так уж сильно. Они предлагают сравнимое качество обслуживания и, по мере роста конкуренции между ними, по-видимому, будут предлагать сравнимые цены.

## Резюме

Физический уровень является базовым для сетей любого типа. Природа носителей информации накладывает два фундаментальных ограничения на все каналы, и это определяет их допустимую пропускную способность. Первое ограничение носит имя Найквиста и имеет отношение к идеальным бесшумным каналам. Второе ограничение, ограничение Шеннона, говорит о каналах с шумом.

Среда передачи данных может быть управляемой или неуправляемой. Основными управляемыми носителями являются витая пара, коаксиальный кабель и оптоволоконный кабель. Среди неуправляемых носителей следует выделить радио, микроволны, инфракрасные и лазерные волны, распространяющиеся по воздуху. Быстро развивающейся областью является спутниковая связь, особенно системы LEO (низкоорбитальные спутники).

Ключевым элементом большинства глобальных сетей является телефонная система. Ее главные компоненты — это местные линии, магистрали и коммутаторы. Местные линии — это аналоговые каналы на основе витой пары, которым для передачи цифровых данных требуются модемы. ADSL имеет скорость до 50 Мбит/с, достигая ее путем разделения местной линии на множество виртуальных кана-

лов и отдельной модуляции каждого из них. Беспроводные локальные линии — это еще одно новое и интересное направление, особенно примечательна система LMDS.

Магистралы всегда являются цифровыми, в них применяются различные способы уплотнения, включая частотное (FDM), временное (TDM) и спектральное (WDM). Важны технологии как коммутации каналов, так и коммутации пакетов.

Для мобильных применений обычная стационарная телефонная сеть не подходит. Мобильные телефоны сейчас очень широко распространены в качестве средства передачи речи, однако вскоре не меньшее распространение эти устройства получат в качестве полноценного средства передачи данных. Первое поколение мобильных телефонных систем было аналоговым, доминировала система AMPS. Второе поколение было цифровым, и здесь главенствующие роли играли стандарты D-AMPS, GSM и CDMA. Третье поколение будет цифровым и будет базироваться на широкополосном CDMA.

Альтернативной сетевой системой является кабельное телевидение, которое сильно видоизменилось с тех времен, когда оно было телевизионной системой с общей антенной, и до сегодняшнего дня, когда это гибридная оптоволоконная сеть. В принципе, данная система обладает высокой пропускной способностью, но реальное качество обслуживания сильно зависит от числа и деятельности активных пользователей.

## Вопросы

1. Сосчитайте коэффициенты Фурье для функции  $f(t) = t$  ( $0 \leq t \leq 1$ ).
2. По бесшумному каналу с полосой пропускания 4 кГц каждую 1 мс передаются отсчеты сигнала. Какова будет максимальная скорость передачи данных?
3. Ширина телевизионных каналов составляет 6 МГц. Сколько бит в секунду может быть передано по такому каналу при использовании четырехуровневых цифровых сигналов? Предполагается, что шума в канале нет.
4. Какова максимально допустимая скорость передачи данных при передаче двоичного сигнала по каналу с полосой пропускания 3 кГц и отношением сигнал/шум 20 дБ?
5. Какое отношение сигнал/шум требуется для использования линии с полосой пропускания 50 кГц в качестве носителя T1?
6. В чем отличие пассивной звезды от активного повторителя в оптоволоконной сети?
7. Какова пропускная способность полосы спектра 0,1 мкм для длины волны 1 мкм?
8. Требуется переслать последовательность компьютерных экранных изображений по оптоволоконному кабелю. Размеры экрана 480×640 пикселей, каждый пиксел по 24 бита. Требуется передавать 60 экранов в секунду. Какая необхо-

дима для этого пропускная способность, а также какая часть спектра (в микрометрах) будет использована при условии, что передача осуществляется на длине волны 1,30 мкм?

9. Верна ли теорема Найквиста для оптоволоконного кабеля, или только для медного провода?
10. На рис. 2.5 самый левый диапазон длин волн уже, чем остальные. Почему?
11. Радиоприемники обычно лучше всего работают при размере антенны, равном длине волны радиосигнала. Диаметр антенны варьируется в пределах от 1 см до 5 м. Какому диапазону частот это соответствует?
12. Ослабление сигнала вследствие интерференции достигает максимального уровня, когда 2 луча прибывают со сдвигом фазы в  $180^\circ$ . Какова должна быть разница в пути прохождения сигнала, чтобы ослабление сигнала в микроволновой линии связи было максимальным (длина канала 50 км, частота 1 ГГц)?
13. Лазерный луч диаметром 1 мм нацелен на детектор диаметром 1 мм, установленный на крыше здания на расстоянии 100 м. На какой угол должен отклониться лазерный луч, чтобы он промахнулся мимо детектора?
14. 66 низкоорбитальных спутников проекта Iridium образуют шесть ожерелий вокруг Земли. Период их обращения составляет 90 минут. Каков средний интервал, необходимый наземному передатчику для осуществления передачи (hand off)?
15. Пусть имеется спутник, вращающийся на высоте геостационарных спутников, но имеющий отклонение орбитальной плоскости от экваториальной плоскости, равное углу  $\phi$ . Кажется ли этот спутник неподвижным пользователю, находящемуся на поверхности Земли на  $\phi$ -м градусе северной широты? Если нет, опишите движение спутника.
16. Сколько кодов окончных телефонных станций существовало до 1984 года, когда доступ к каждой из станций осуществлялся через трехзначный код региона и первые три цифры местного номера? Коды регионов начинались с одной из цифр из диапазона 2–9, вторая цифра всегда была 1 или 0, а третья цифра могла быть любой. Первые две цифры местного номера были из диапазона 2–9; третья цифра могла быть любой.
17. Используя только информацию, данную в тексте, подсчитайте максимальное число телефонов, которое может обслуживать существующая в США телефонная система без изменения системы номеров и добавления оборудования. Может ли быть реально достигнуто это число? При подсчетах считать факс или модем эквивалентным телефону, предполагая, что на одной абонентской линии установлен только один телефон.
18. Простая телефонная система состоит из двух окончных коммутаторов и одного междугородного коммутатора, с которым окончные коммутаторы соединены дуплексным кабелем с полосой пропускания 1 МГц. За восьмичасовой рабочий день с одного телефона производится в среднем 4 звонка. Средняя продолжительность одного разговора составляет 6 минут. 10 % звонков явля-

- ются междугородными (то есть проходят через междугородный коммутатор). Каково максимальное количество телефонов, которое может поддерживать окончательный коммутатор? (Предполагается 4 кГц на канал.)
19. У местной телефонной компании 10 млн абонентов. Все телефоны подключены к центральному коммутатору медными витыми парами. Средняя длина витых пар составляет 10 км. Сколько стоит медь местных телефонных линий? Предполагается, что провода круглые в сечении, диаметром 1 мм. Плотность меди равна  $9,0 \text{ г/см}^3$ , а цена меди — 3 доллара за килограмм.
  20. Какой системой является нефтепровод — симплексной, полудуплексной, дуплексной или вообще не вписывается в эту классификацию?
  21. Стоимость мощных микропроцессоров упала настолько, что теперь возможна их установка в каждый модем. Как это отразилось на обработке ошибок в телефонной линии?
  22. Амплитудно-фазовая диаграмма модема того же типа, что изображен на рис. 2.17, состоит из точек с координатами: (1, 1), (1, -1), (-1, 1) и (-1, -1). Сколько бит в секунду сможет передавать такой модем на скорости 1200 бод?
  23. Амплитудно-фазовая диаграмма модема того же типа, что изображена на рис. 2.21, состоит из точек с координатами: (0, 1) и (0, 2). Какого типа модуляция используется данным модемом: амплитудная или фазовая?
  24. Амплитудно-фазовая диаграмма состоит из точек, расположенных на окружности с центром в начале координат. Какой тип модуляции применяется в данном случае?
  25. Сколько частот использует полнодуплексный модем с модуляцией QAM-64?
  26. Система ADSL, использующая DMT (цифровую мультиканальную тональную модуляцию), резервирует  $3/4$  доступных каналов данных под входящее соединение. На каждом канале используется модуляция типа QAM-64. Какова емкость входящего соединения?
  27. В примере с четырьмя секторами, изображенном на рис. 2.26, каждому сектору соответствует свой канал с пропускной способностью 36 Мбит/с. Теория очередей говорит о том, что если канал загружен на 50 %, то время формирования очереди будет равно времени передачи информации. Сколько времени потребуется при этих условиях на то, чтобы скачать веб-страничку размером 5 Кбайт? Сколько времени потребуется на скачивание страницы размером более 1 Мбайт по линии ADSL? С помощью модема на 56 Кбит/с?
  28. Десять сигналов, каждому из которых требуется полоса 4000 Гц, мультиплексируются в один канал с использованием частотного уплотнения (FDM). Какова должна быть минимальная полоса уплотненного канала? Ширину защитных интервалов считать равной 400 Гц.
  29. Почему период дискретизации кодово-импульсной модуляции был выбран равным 125 мкс?
  30. Каков процент накладных расходов в носителе T1, то есть какой процент от пропускной способности 1,544 Мбит/с недоступен для конечного потребителя?
  31. Сравните максимальную пропускную способность бесшумных каналов с полосой пропускания 4 кГц, использующих:
    - 1) аналоговое кодирование с двумя битами на отсчет;
    - 2) систему T1 с кодово-импульсной модуляцией.
  32. При потере синхронизации система T1 пытается восстановить синхронизацию при помощи первого бита каждого кадра. Сколько кадров должно быть исследовано для восстановления синхронизации с вероятностью ошибки 0,001?
  33. В чем отличие, если оно есть, между демодуляторной частью модема и кодирующей частью кодека? (Оба преобразуют аналоговый сигнал в цифровой.)
  34. Сигнал передается в цифровом виде с периодом дискретизации 125 мкс по бесшумному каналу с полосой пропускания 4 кГц. Сколько бит в секунду в действительности передается каждым из следующих методов кодирования:
    - 1) стандарт CCITT 2,048 Мбит/с;
    - 2) дифференциальная импульсно-кодовая модуляция с 4-битовыми относительными значениями сигнала;
    - 3) дельта-модуляция?
  35. Чистый синусоидальный сигнал амплитуды  $A$  кодируется при помощи дельта-модуляции с частотой  $x$  отсчетов в секунду. Выходное значение  $+1$  соответствует изменению амплитуды на  $+A/8$ , выходное значение  $-1$  соответствует  $-A/8$ . Какова максимальная частота сигнала, который может быть передан таким образом без накапливающейся ошибки?
  36. В сети SONET точность системных часов составляет  $10^{-9}$ . Сколько времени понадобится, чтобы дрейф часов составил 1 бит? Что следует из этих расчетов?
  37. В табл. 2.4 скорость пользователя для канала OC-3 составляет 148,608 Мбит/с. Покажите, как это число может быть получено из параметров канала OC-3 системы SONET.
  38. Для работы со скоростями передачи данных ниже STS-1 SONET имеет систему виртуального согласования (VT). Это часть полезной нагрузки, которая вставляется в кадр STS-1 и комбинируется с другими частями полезной нагрузки, заполняя весь кадр данных. Например, VT1.5 использует три колонки, VT2 использует 4 колонки, VT3 — 6 колонок, VT6 — 12 колонок кадра STS-1. Какие типы VT могут помочь согласовать скорость со следующими системами:
    - 1) служба DS-1 (1,544 Мбит/с);
    - 2) европейская служба CEPT-1 (2,048 Мбит/с);
    - 3) служба DS-2 (6,312 Мбит/с)?
  39. В чем заключается основное отличие коммутации сообщений от коммутации пакетов?
  40. Какова доступная для пользователя полоса пропускания в канале OC-12с?

41. Три сети с коммутацией пакетов состоят из  $n$  узлов каждая. Топология первой сети представляет собой звезду с центральным коммутатором, вторая является двунаправленным кольцом, а в третьей все узлы соединены друг с другом. Какими будут наименьшее, среднее и наибольшее расстояния между узлами каждой сети в прыжках?
42. Сравните задержку при передаче сообщения длиной в  $x$  бит по пути из  $k$  прыжков в сети с коммутацией каналов и в (слабо загруженной) сети с коммутацией пакетов. Время установки канала составляет  $s$  секунд, задержка распространения сигнала равна  $d$  секунд на прыжок, размер пакета равен  $p$  бит, а скорость передачи данных составляет  $b$  бит/с. При каких условиях сеть с коммутацией пакетов будет обладать меньшим временем задержки?
43. Предположим, что  $x$  бит данных пользователя передается по пути в  $k$  прыжков в сети с коммутацией пакетов в виде серии пакетов, каждый из которых состоит из  $p$  бит данных и  $h$  бит заголовка, причем  $x \gg p + h$ . Скорость передачи линий составляет  $b$  бит/с, а задержкой распространения сигнала можно пренебречь. Каким должно быть значение  $p$ , чтобы значение суммарной задержки было минимальным?
44. В обычной сотовой телефонной системе с шестигранными ячейками запрещено использовать одинаковые частотные диапазоны в соседних ячейках. Если доступно 840 частот, сколько из них может быть использовано в одной ячейке?
45. Реальная форма набора ячеек редко бывает такой правильной, как показано на рис. 2.35. Даже отдельные ячейки почти всегда имеют неправильную форму. Выскажите свои предположения относительно причин этого явления.
46. Сколько микроячеек системы PCS диаметром 100 м потребуется, чтобы покрыть ими Сан-Франциско (120 км<sup>2</sup>)?
47. Когда пользователь сотовой телефонной системы пересекает границу между сотами, в некоторых случаях разговор прерывается несмотря на то, что все приемники и передатчики функционируют нормально. Почему?
48. D-AMPS обладает значительно более плохим качеством звука, чем GSM. Это связано с требованием обратной совместимости с AMPS (GSM не имеет подобных ограничений)? Если нет, то какова настоящая причина?
49. Подсчитайте максимальное число пользователей, которые одновременно могут работать в одной ячейке D-AMPS. Прделайте те же вычисления для GSM. Объясните разницу.
50. Пусть A, B и C одновременно передают нулевые биты, используя систему CDMA и элементарные последовательности, показанные на рис. 2.39, б. Как будет выглядеть результирующая элементарная последовательность?
51. При обсуждении ортогональности элементарных последовательностей CDMA утверждалось, что если  $S \cdot T = 0$ , то и  $S \cdot \bar{T} = 0$ . Докажите это.
52. Рассмотрим еще один подход к вопросу свойства ортогональности элементарных последовательностей CDMA. Каждый бит в паре последовательностей может совпадать или не совпадать с другим. Выразите свойство ортогональности в терминах совпадений и несовпадений парных битов.
53. Приемник CDMA получает элементарную последовательность:  $(-1 + 1 - 3 + 1 - 1 - 3 + 1 + 1)$ . Предполагая, что исходные последовательности такие, как показано на рис. 2.39, б, какие станции посылали сигналы и какие именно?
54. Топология телефонной системы в части, включающей оконечный коммутатор, соединенный с телефонами абонентов, представляет собой звезду. Кабельное телевидение, напротив, состоит из единого длинного кабеля, объединяющего все дома в одной местности. Предположим, что в кабельном телевидении будущего вместо медного кабеля будет применяться оптоволоконный с пропускной способностью 10 Гбит/с. Сможет ли подобная линия воспроизвести работу телефонной линии и обеспечить каждому абоненту отдельную линию до оконечного коммутатора? Если да, то сколько телефонов может быть подключено к одному кабелю?
55. Система кабельного телевидения состоит из 100 коммерческих каналов, в которых программы время от времени прерываются рекламой. На что это больше похоже — на временное или частотное уплотнение?
56. Оператор кабельной сети предоставляет доступ в Интернет в районе, состоящем из 5000 домов. Компания использует коаксиальный кабель и распределяет спектр таким образом, что пропускная способность входящего потока для каждого кабеля составляет 100 Мбит/с. Чтобы привлечь клиентов, компания объявила, что каждому дому будет предоставлено 2 Мбит/с для входящего трафика в любое время. Опишите, что нужно компании, чтобы сдержать слово.
57. Используя распределение спектра, показанное на рис. 2.42, а также данную в тексте информацию, подсчитайте, сколько мегабит в секунду отводится в кабельной системе на входящий и исходящий каналы.
58. С какой скоростью пользователь кабельной сети может принимать данные, если все остальные пользователи пассивны?
59. Мультиплексирование потоков данных STS-1 играет важную роль в технологии SONET. Мультиплексор 3:1 уплотняет три входных потока STS-1 в один выходной поток STS-3. Уплотнение производится побайтно, то есть первые три выходных байта соответствуют первым байтам входных потоков 1, 2 и 3 соответственно. Следующие три байта — вторым байтам потоков 1, 2 и 3, и т. д. Напишите программу, симулирующую работу мультиплексора 3:1. В программе должно быть пять процессов. Главный создает четыре других процесса (для трех входных потоков и мультиплексора). Каждый процесс входного потока считывает в кадр STS-1 данные из файла в виде последовательности из 810 байт. Затем кадры побайтно отсылаются процессу мультиплексора. Мультиплексор принимает потоки и выводит результирующий кадр STS-3 (снова побайтно), записывая его на стандартное устройство вывода. Для взаимодействия между процессами используйте метод «труб».