

КЛАССИКА COMPUTER SCIENCE

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ

ПЯТОЕ ИЗДАНИЕ



Э. ТАНЕНБАУМ
Д. УЭЗЕРОЛЛ

PEARSON
Prentice
Hall

ПИТЕР®

ББК 32.973.202+32.988.02

УДК 004.738.5

T18

Таненбаум Э., Уэзеролл Д.
T18 Компьютерные сети. 5-е изд. — СПб.: Питер, 2019. — 960 с.: ил. — (Серия «Классика computer science»).

ISBN 978-5-4461-1248-7

Перед вами — очередное, пятое издание самой авторитетной книги по современным сетевым технологиям, написанной признанным экспертом в этой области Эндрю Таненбаумом в соавторстве с профессором Вашингтонского университета Дэвидом Уэзероллом. Первая версия этого классического труда появилась на свет в далеком 1980 году, и с тех пор каждое издание книги неизменно становилось бестселлером и использовалось в качестве базового учебника в ведущих технических вузах.

В книге последовательно изложены основные концепции, определяющие современное состояние и тенденции развития компьютерных сетей. Авторы подробнейшим образом объясняют устройство и принципы работы аппаратного и программного обеспечения, рассматривают все аспекты и уровни организации сетей — от физического до уровня прикладных программ. Изложение теоретических принципов дополняется яркими, показательными примерами функционирования Интернета и компьютерных сетей различного типа. Пятое издание полностью переработано с учетом изменений, происшедших в сфере сетевых технологий за последние годы и, в частности, освещает такие аспекты, как беспроводные сети стандарта 802.12 и 802.16, сети 3G, технология RFID, инфраструктура доставки контента CDN, пиринговые сети, потоковое вещание, интернет-телефония и многое другое.

16+ (В соответствии с Федеральным законом от 29 декабря 2010 г. № 436-ФЗ.)

ББК 32.973.202+32.988.02

УДК 004.738.5

Права на издание получены по соглашению с Prentice Hall, Inc. Upper Sadle River, New Jersey 07458. Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

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.

ISBN 978-0132126953 англ.
ISBN 978-5-4461-1248-7

© Prentice Hall, Inc., 2011
© Перевод на русский язык ООО Издательство «Питер», 2019
© Издание на русском языке, оформление ООО Издательство «Питер», 2019
© Серия «Классика computer science», 2019

Оглавление

Предисловие	14
Глава 1. Введение	16
1.1. Применение компьютерных сетей	17
1.1.1. Сети в организациях	18
1.1.2. Использование сетей частными лицами	21
1.1.3. Использование беспроводных сетей	26
1.1.4. Социальный аспект	29
1.2. Сетевое оборудование	32
1.2.1. Персональные сети	34
1.2.2. Локальные сети	35
1.2.3. Муниципальные сети	38
1.2.4. Глобальные сети	40
1.2.5. Объединения сетей	43
1.3. Сетевое программное обеспечение	44
1.3.1. Иерархия протоколов	45
1.3.2. Разработка уровней	49
1.3.3. Службы на основе соединений и службы без установления соединений	51
1.3.4. Примитивы служб	53
1.3.5. Службы и протоколы	56
1.4. Эталонные модели	57
1.4.1. Эталонная модель OSI	57
1.4.2. Эталонная модель TCP/IP	61
1.4.3. Модель, используемая в книге	64
1.4.4. Сравнение эталонных моделей OSI и TCP	65
1.4.5. Критика модели и протоколов OSI	66
1.4.6. Критика эталонной модели TCP/IP	69
1.5. Примеры сетей	70
1.5.1. Интернет	70
1.5.2. Мобильная телефонная сеть третьего поколения	81
1.5.3. Беспроводные ЛВС: 802.11	86
1.5.4. RFID и сенсорные сети	90
1.6. Стандартизация сетей	92
1.6.1. Кто есть кто в мире телекоммуникаций	93
1.6.2. Кто есть кто в мире международных стандартов	95
1.6.3. Кто есть кто в мире стандартов Интернета	97
1.7. Единицы измерения	99
1.8. Краткое содержание следующих глав	100
Резюме	101
Вопросы	103

Глава 2. Физический уровень	106
2.1. Теоретические основы передачи данных	106
2.1.1. Ряды Фурье	107
2.1.2. Сигналы с ограниченным спектром	107
2.1.3. Максимальная скорость передачи данных через канал	110
2.2. Проводниковые среды передачи информации	112
2.2.1. Магнитные носители	112
2.2.2. Витая пара	113
2.2.3. Коаксиальный кабель	114
2.2.4. Линии электропитания	115
2.2.5. Волоконная оптика	116
2.3. Беспроводная связь	122
2.3.1. Электромагнитный спектр	123
2.3.2. Радиосвязь	127
2.3.3. Связь в микроволновом диапазоне	128
2.3.4. Передача в инфракрасном диапазоне	132
2.3.5. Связь в видимом диапазоне	133
2.4. Спутники связи	135
2.4.1. Геостационарные спутники	136
2.4.2. Средневысотные спутники	140
2.4.3. Низкоорбитальные спутники	140
2.4.4. Спутники против оптоволокну	143
2.5. Цифровая модуляция и мультиплексирование	145
2.5.1. Низкочастотная передача	145
2.5.2. Передача в полосе пропускания	150
2.5.3. Частотное уплотнение	153
2.5.4. Мультиплексирование с разделением времени	155
2.5.5. CDM — кодовое разделение каналов	156
2.6. Коммутируемая телефонная сеть общего пользования	159
2.6.1. Структура телефонной системы	160
2.6.2. Политика телефонии	163
2.6.3. Местные линии связи: модемы, ADSL, беспроводная связь	165
2.6.4. Магистралы и мультиплексирование	173
2.6.5. Коммутация	182
2.7. Мобильная телефонная система	186
2.7.1. Мобильные телефоны первого поколения: аналоговая передача речи	188
2.7.2. Второе поколение мобильных телефонов: цифровая передача голоса (G2)	192
2.7.3. Мобильные телефоны третьего поколения: цифровая речь и данные	197
2.8. Кабельное телевидение	202
2.8.1. Абонентское телевидение	202
2.8.2. Кабельный Интернет	203
2.8.3. Распределение частот	205
2.8.4. Кабельные модемы	206
2.8.5. ADSL или кабель?	208
Резюме	210
Вопросы	211

Глава 3. Канальный уровень	216
3.1. Ключевые аспекты организации канального уровня	216
3.1.1. Сервисы, предоставляемые сетевому уровню	217
3.1.2. Формирование кадра	219
3.1.3. Обработка ошибок	223
3.1.4. Управление потоком	224
3.2. Обнаружение и исправление ошибок	225
3.2.1. Коды с исправлением ошибок	227
3.2.2. Коды с обнаружением ошибок	233
3.3. Элементарные протоколы передачи данных на канальном уровне	239
3.3.1. Симплексный протокол «Утопия»	244
3.3.2. Симплексный протокол с ожиданием для канала без ошибок	245
3.3.3. Симплексный протокол с ожиданием для зашумленных каналов	247
3.4. Протоколы скользящего окна	251
3.4.1. Протокол однобитового скользящего окна	253
3.4.2. Протокол с возвратом на n	256
3.4.3. Протокол с выборочным повтором	263
3.5. Примеры протоколов передачи данных	269
3.5.1. Передача пакетов по протоколу SONET	269
3.5.2. ADSL	273
3.6. Резюме	276
Вопросы	277
 Глава 4. Подуровень управления доступом к среде	 281
4.1. Проблема распределения канала	282
4.1.1. Статическое распределение канала	282
4.1.2. Допущения, связанные с динамическим распределением каналов	284
4.2. Протоколы коллективного доступа	286
4.2.1. Система ALOHA	286
4.2.2. Протоколы множественного доступа с контролем несущей	291
4.2.3. Протоколы без столкновений	294
4.2.4. Протоколы с ограниченной конкуренцией	298
4.2.5. Протоколы беспроводных локальных сетей	302
4.3. Сеть Ethernet	305
4.3.1. Физический уровень классической сети Ethernet	306
4.3.2. Протокол подуровня управления доступом к среде в классическом Ethernet	307
4.3.3. Производительность сети Ethernet	311
4.3.4. Коммутируемые сети Ethernet	313
4.3.5. Fast Ethernet	316
4.3.6. Gigabit Ethernet	319
4.3.7. 10-гигабитный Ethernet	322
4.3.8. Ретроспектива Ethernet	324
4.4. Беспроводные локальные сети	325
4.4.1. Стандарт 802.11: архитектура и стек протоколов	326
4.4.2. Стандарт 802.11: физический уровень	327
4.4.3. Стандарт 802.11: протокол подуровня управления доступом к среде	329
4.4.4. Стандарт 802.11: структура кадра	336
4.4.5. Сервисы	338

4.5. Широкополосные беспроводные сети	340
4.5.1. Сравнение стандарта 802.16 с 802.11 и 3G	341
4.5.2. Стандарт 802.16: архитектура и стек протоколов	342
4.5.3. Стандарт 802.16: физический уровень	343
4.5.4. Стандарт 802.16: протокол подуровня MAC	345
4.5.5. Стандарт 802.16: структура кадра	347
4.6. Bluetooth	348
4.6.1. Архитектура Bluetooth	349
4.6.2. Приложения Bluetooth	350
4.6.3. Bluetooth: набор протоколов	351
4.6.4. Bluetooth: уровень радиосвязи	352
4.6.5. Bluetooth: уровень немодулированной передачи	353
4.6.6. Bluetooth: структура кадра	354
4.7. RFID	356
4.7.1. Архитектура EPC Gen 2	357
4.7.2. Физический уровень EPC Gen 2	357
4.7.3. Уровень идентификации метки EPC Gen 2	359
4.7.4. Форматы сообщения идентификации метки	360
4.8. Коммутация на канальном уровне	361
4.8.1. Применение мостов	361
4.8.2. Обучаемые мосты	363
4.8.3. Мосты связующего дерева	366
4.8.4. Повторители, концентраторы, мосты, коммутаторы, маршрутизаторы и шлюзы	368
4.8.5. Виртуальные локальные сети	371
4.9. Резюме	378
Вопросы	380

Глава 5. Сетевой уровень **384**

5.1. Вопросы проектирования сетевого уровня	384
5.1.1. Метод коммутации пакетов с ожиданием	384
5.1.2. Сервисы, предоставляемые транспортному уровню	385
5.1.3. Реализация сервиса без установления соединения	387
5.1.4. Реализация сервиса с установлением соединения	389
5.1.5. Сравнение сетей виртуальных каналов и дейтаграммных сетей	390
5.2. Алгоритмы маршрутизации	392
5.2.1. Принцип оптимальности маршрута	394
5.2.2. Алгоритм нахождения кратчайшего пути	395
5.2.3. Заливка	398
5.2.4. Маршрутизация по вектору расстояний	399
5.2.5. Маршрутизация с учетом состояния линий	403
5.2.6. Иерархическая маршрутизация	409
5.2.7. Широковещательная маршрутизация	411
5.2.8. Многоадресная рассылка	413
5.2.9. Произвольная маршрутизация	416
5.2.10. Алгоритмы маршрутизации для мобильных хостов	417
5.2.11. Маршрутизация в произвольных сетях	420
5.3. Алгоритмы борьбы с перегрузкой	424
5.3.1. Подходы к борьбе с перегрузкой	426
5.3.2. Маршрутизация с учетом состояния трафика	427

5.3.3. Управление доступом	428
5.3.4. Регулирование трафика	430
5.3.5. Сброс нагрузки	434
5.4. Качество обслуживания	436
5.4.1. Требования приложений	437
5.4.2. Формирование трафика	439
5.4.3. Диспетчеризация пакетов	443
5.4.4. Управление доступом	447
5.4.5. Интегральное обслуживание	451
5.4.6. Дифференцированное обслуживание	454
5.5. Объединение сетей	457
5.5.1. Различия сетей	458
5.5.2. Способы объединения сетей	459
5.5.3. Туннелирование	462
5.5.4. Маршрутизация в объединенных сетях	464
5.5.5. Фрагментация пакетов	465
5.6. Сетевой уровень в Интернете	469
5.6.1. Протокол IP версии 4	471
5.6.2. IP-адреса	475
5.6.3. Протокол IP версии 6	488
5.6.4. Управляющие протоколы Интернета	498
5.6.5. Коммутация меток и MPLS	504
5.6.6. Протокол внутреннего шлюза OSPF	507
5.6.7. Протокол внешнего шлюза BGP	512
5.6.8. Многоадресная рассылка в Интернете	518
5.6.9. Мобильный IP	519
5.7. Резюме	521
Вопросы	522
Глава 6. Транспортный уровень	527
6.1. Транспортный сервис	527
6.1.1. Услуги, предоставляемые верхним уровням	527
6.1.2. Базовые операции транспортного сервиса	529
6.1.3. Сокеты Беркли	533
6.1.4. Пример программирования сокета: файл-сервер для Интернета	535
6.2. Элементы транспортных протоколов	540
6.2.1. Адресация	541
6.2.2. Установка соединения	544
6.2.3. Разрыв соединения	550
6.2.4. Контроль ошибок и управление потоком данных	554
6.2.5. Мультиплексирование	559
6.2.6. Восстановление после сбоев	560
6.3. Контроль перегрузки	563
6.3.1. Выделение требуемой пропускной способности	563
6.3.2. Регулирование скорости отправки	568
6.3.3. Проблемы беспроводного соединения	572
6.4. Транспортные протоколы Интернета: UDP	574
6.4.1. Основы UDP	575
6.4.2. Вызов удаленной процедуры	577
6.4.3. Транспортные протоколы реального масштаба времени	580

6.5. Транспортные протоколы Интернета: TCP	586
6.5.1. Основы TCP	586
6.5.2. Модель сервиса TCP	587
6.5.3. Протокол TCP	590
6.5.4. Заголовок TCP-сегмента	591
6.5.5. Установка TCP-соединения	595
6.5.6. Разрыв соединения TCP	596
6.5.7. Модель управления TCP-соединением	597
6.5.8. Скользящее окно TCP	599
6.5.9. Управление таймерами в TCP	603
6.5.10. Контроль перегрузки в TCP	606
6.5.11. Будущее TCP	617
6.6. Вопросы производительности	618
6.6.1. Причины снижения производительности компьютерных сетей	618
6.6.2. Измерение производительности сети	619
6.6.3. Проектирование хостов для быстрых сетей	623
6.6.4. Быстрая обработка сегментов	626
6.6.5. Сжатие заголовков	629
6.6.6. Протоколы для протяженных сетей с высокой пропускной способностью	631
6.7. Сети, устойчивые к задержкам	636
6.7.1. Архитектура DTN	637
6.7.2. Протокол Bundle	639
6.8. Резюме	642
Вопросы	643
Глава 7. Прикладной уровень	648
7.1. Служба имен доменов DNS	648
7.1.1. Пространство имен DNS	649
7.1.2. Записи ресурсов доменов	653
7.1.3. Серверы имен	656
7.2. Электронная почта	660
7.2.1. Архитектура и службы	661
7.2.2. Пользовательский агент	664
7.2.3. Форматы сообщений	668
7.2.4. Пересылка сообщений	677
7.2.5. Окончательная доставка сообщений	682
7.3. Всемирная паутина (WWW)	685
7.3.1. Представление об архитектуре	687
7.3.2. Статичные веб-страницы	702
7.3.3. Динамические веб-страницы и веб-приложения	712
7.3.4. HTTP — протокол передачи гипертекста	724
7.3.5. Мобильный веб	734
7.3.6. Веб-поиск	736
7.4. Потокковая передача аудио и видео	739
7.4.1. Цифровой звук	741
7.4.2. Цифровое видео	747
7.4.3. Потокковая передача сохраненных медиафайлов	755
7.4.4. Передача медиа в реальном времени	763
7.4.5. Конференции в реальном времени	767

7.5. Доставка контента	778
7.5.1. Контент и интернет-трафик	779
7.5.2. Серверные фермы и веб-прокси	782
7.5.3. Сети доставки контента	787
7.5.4. Сети одноранговых узлов (пиринговые сети)	792
7.6. Резюме	801
Вопросы	803

Глава 8. Безопасность в сетях **807**

8.1. Криптография	810
8.1.1. Основы криптографии	811
8.1.2. Метод подстановки	814
8.1.3. Метод перестановки	815
8.1.4. Одноразовые блокноты	817
8.1.5. Два фундаментальных принципа криптографии	822
8.2. Алгоритмы с симметричным криптографическим ключом	824
8.2.1. Стандарт шифрования данных DES	826
8.2.2. Улучшенный стандарт шифрования AES	829
8.2.3. Режимы шифрования	833
8.2.4. Другие шифры	838
8.2.5. Криптоанализ	839
8.3. Алгоритмы с открытым ключом	840
8.3.1. Алгоритм RSA	841
8.3.2. Другие алгоритмы с открытым ключом	843
8.4. Цифровые подписи	844
8.4.1. Подписи с симметричным ключом	845
8.4.2. Подписи с открытым ключом	846
8.4.3. Профили сообщений	847
8.4.4. Задача о днях рождения	852
8.5. Управление открытыми ключами	854
8.5.1. Сертификаты	855
8.5.2. X.509	856
8.5.3. Инфраструктуры систем с открытыми ключами	858
8.6. Защита соединений	861
8.6.1. IPsec	862
8.6.2. Брандмауэры	866
8.6.3. Виртуальные частные сети	869
8.6.4. Безопасность в беспроводных сетях	871
8.7. Протоколы аутентификации	876
8.7.1. Аутентификация, основанная на общем секретном ключе	877
8.7.2. Установка общего ключа: протокол обмена ключами Диффи—Хеллмана	882
8.7.3. Аутентификация с помощью центра распространения ключей	884
8.7.4. Аутентификация при помощи протокола Kerberos	887
8.7.5. Аутентификация с помощью шифрования с открытым ключом	889
8.8. Конфиденциальность электронной переписки	890
8.8.1. PGP	891
8.8.2. S/MIME	895

8.9. Защита информации во Всемирной паутине	896
8.9.1. Возможные опасности	896
8.9.2. Безопасное именование ресурсов	897
8.9.3. SSL — протокол защищенных сокетов	902
8.9.4. Безопасность переносимых программ	906
8.10. Социальный аспект	910
8.10.1. Конфиденциальность	910
8.10.2. Свобода слова	914
8.10.3. Защита авторских прав	917
8.11. Резюме	921
Вопросы	922
Глава 9. Рекомендации для чтения и библиография	928
9.1. Литература для дальнейшего чтения	928
9.1.1. Введение и неспециализированная литература	929
9.1.2. Физический уровень	930
9.1.3. Канальный уровень	930
9.1.4. Подуровень управления доступом к среде	931
9.1.5. Сетевой уровень	931
9.1.6. Транспортный уровень	932
9.1.7. Прикладной уровень	933
9.1.8. Безопасность в сетях	933
9.2. Алфавитный список литературы	935
Алфавитный указатель	947

Глава 2

Физический уровень

В этой главе мы рассмотрим нижний уровень сетевой модели — физический уровень. Он определяет электрические, временные и прочие характеристики сетей, по которым биты информации пересылаются в форме электрических сигналов. Физический уровень — это фундамент сети. Производительность каналов передачи данных (их полоса пропускания, время запаздывания и частота ошибок) определяется различными свойствами физических носителей. Базовые характеристики каналов передачи и станут отправной точкой нашего увлекательного путешествия в мир компьютерных 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 — проводниковые (медный провод и оптоволокно), радиоэфир (наземная радиосвязь) и радиоэфир, связанный со спутниковыми системами. Уникальные отличительные свойства каждой из этих технологий в значительной степени влияют на принципы построения и производительность сетей. Мы изучим основы ключевых технологий передачи данных, применяемых в современных сетях.

Нашей следующей темой станет цифровая модуляция — мы поговорим о том, как аналоговые сигналы превращаются в цифровые и обратно. После этого мы рассмотрим схемы уплотнения и узнаем, как данные нескольких сеансов связи могут передаваться по одному носителю, не мешая друг другу.

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, и третий — кабельное телевидение. Все эти технологии крайне важны и повсеместно применяются на практике, поэтому мы уделим достаточно внимания каждому примеру.

2.1. 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.

2.1.1. 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 выражения (2.1) на $\sin(2\pi kft)$, а затем проинтегрировать от 0 до T . Поскольку:

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

остается только один член ряда: a_n . Ряд b_n исчезает полностью. Аналогично, умножая выражение (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 выражения, не изменяя его, то можно получить значение константы c . Результаты этих действий будут следующими:

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

2.1.2. Сигналы с ограниченным спектром

Вы спросите, какое отношение все это имеет к передаче данных? В зависимости от физических характеристик каналов сигналы с разными частотами ведут себя в них по-разному. Рассмотрим конкретный пример — передачу двоичного кода ASCII символа «b». Для этого потребуется 8 бит (то есть 1 байт). Задача — передать следующую последовательность 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:

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{\pi n} [\cos(\pi n/4) - \cos(3\pi n/4) + \cos(5\pi n/4) - \cos(7\pi n/4)]; \\ b_n &= \frac{1}{\pi n} [\sin(3\pi n/4) - \sin(\pi n/4) + \sin(7\pi n/4) - \sin(5\pi n/4)]; \\ c &= 3/4. \end{aligned}$$

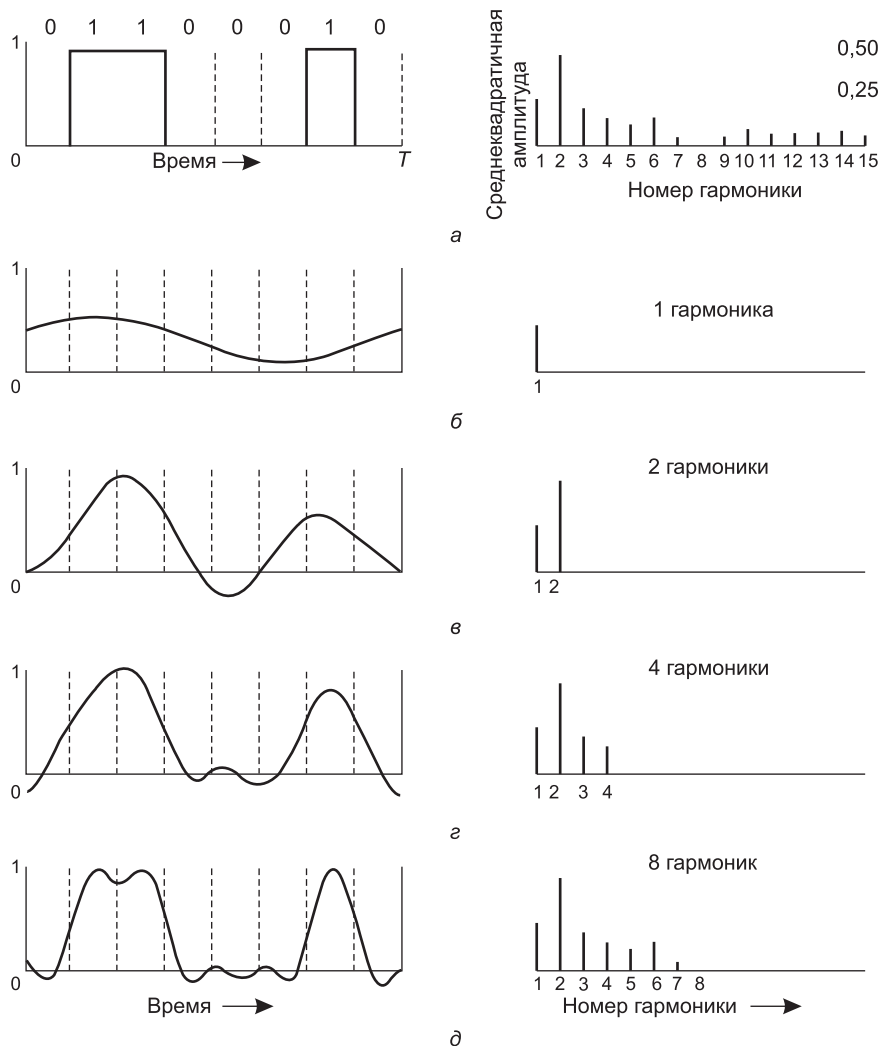


Рис. 2.1. Двоичный сигнал и его среднеквадратичные гармоники Фурье (а); последовательные приближения к оригинальному сигналу (б–д)

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, по кабельным сетям амплитуды передаются почти 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 выше полосу пропускания включают те частоты, которые передаются с потерей мощности, не превышающей 50 %.

Полоса пропускания является физической характеристикой среды передачи данных и зависит, например, от конструкции, толщины и длины носителя — провода или оптоволокна. Иногда для намеренного уменьшения полосы пропускания, доступной абонентам, в линию включается специальное устройство — *фильтр*. Например, беспроводным каналам стандартов 802.11 выделяется полоса пропускания шириной примерно 20 МГц, поэтому радиопередатчики соответствующим образом урезают сигнал. Еще один пример: у традиционных (аналоговых) телевизионных каналов полоса пропускания равна 6 МГц, независимо от того, передаются данные по проводам или беспроводным способом. Благодаря такой фильтрации в определенном диапазоне спектра можно передать большее количество сигналов, за счет чего повышается общая эффективность системы. Диапазон частот отдельных сигналов будет начинаться со значения, отличного от нуля, но это не играет никакой роли. Полоса пропускания — это все также некий разрешенный диапазон частот, и возможность передачи информации зависит только от его ширины, но не от начального и конечного значения частот. Сигналы, передающиеся в диапазоне частот от 0 и до верхней границы полосы, называются модулирующими сигналами. Сигналы, которые сдвигаются в верхний диапазон частот, как, например, для всех видов беспроводной передачи данных, называются сигналами в полосе.

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 выражения (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. Что касается цифровых данных, то главная задача — передавать их с минимальным качеством, позволяющим восстановить первоначальную последовательность битов. Для этого достаточно сигнала, показанного на рис. 2.1, *д*; следовательно, совершенно не нужно тратить ресурсы и использовать большее количество гармоник для получения более точной копии.

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 полосы 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 ниже в этой главе.

Таблица 2.1. Соотношение между скоростью передачи данных и числом гармоник для нашего примера

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

С термином «полоса пропускания» связано множество недоразумений, так как для инженеров-электриков и компьютерных специалистов он означает разные вещи. Для инженера-электрика (аналоговая) полоса пропускания, как уже говорилось выше, это значение в герцах, указывающее ширину диапазона частот. Для компьютерного специалиста (цифровая) полоса пропускания — это максимальная скорость данных в канале, то есть значение, измеряемое в битах в секунду. Фактически скорость данных определяется аналоговой полосой пропускания физического канала, применяемого для передачи цифровой информации, и эти два показателя связаны, как мы увидим далее. В этой книге будет понятно из контекста, какой термин имеется в виду в каждом конкретном случае — аналоговая (Гц) или цифровая (бит/с) полоса пропускания.

2.1.3. 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. Это важнейшая работа во всей теории передачи информации. Мы кратко рассмотрим результаты работы Найквиста и Шеннона, ставшие сегодня классическими.

Найквист доказал, что если произвольный сигнал прошел через низкочастотный фильтр с полосой пропускания B , то такой отфильтрованный сигнал может быть полностью восстановлен по дискретным значениям этого сигнала, измеренным с частотой

$2B$ в секунду. Производить измерения сигнала чаще, чем $2B$ 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:

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

Так, например, бесшумный канал с частотой пропускания в 3 кГц не может передавать двоичные (то есть двухуровневые) сигналы на скорости, превосходящей 6000 бит/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 величина отношения выражается через ее десятичный логарифм, умноженный на 10: $10 \lg S/N$, так как ее значение может меняться в очень большом диапазоне. Единица такой логарифмической шкалы называется **децибелом** (decibel, dB, дБ); здесь приставка «деци» означает «десять», а «бел» — это единица измерения, названная в честь изобретателя телефона Александра Грэма Белла. Таким образом, отношение сигнал/шум, равное 10, соответствует 10 дБ, отношение, равное 100, равно 20 дБ, отношение, равное 1000, равно 30 дБ и т. д. Производители стереоусилителей часто указывают полосу частот (частотный диапазон), в которой их аппаратура имеет линейную амплитудно-частотную характеристику в пределах 3 дБ. Отклонение в 3 дБ соответствует ослаблению сигнала примерно в два раза (потому что $10 \log_{10} 0,5 \approx -3$).

Главным результатом, который получил Шеннон, было утверждение о том, что максимальная скорость передачи данных или емкость канала с полосой частот B Гц и отношением сигнал/шум, равным S/N , вычисляется по формуле:

$$\text{максимальная скорость передачи данных} = B \log_2 (1 + S/N), \text{ бит/с.}$$

Это наилучшее значение емкости, которое можно наблюдать для реального канала. Например, полоса пропускания канала ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line, асимметричная цифровая абонентская линия), по которому осуществляется доступ в Интернет через телефонные сети, равна приблизительно 1 МГц. Отношение сигнал/шум в значительной степени зависит от расстояния между компьютером пользователя и телефонной станцией. Для коротких линий длиной от 1 до 2 км очень хорошим считается значение около 40 дБ. С такими характеристиками канал никогда не сможет передавать более 13 Мбит/с, независимо от способа модуляции сигнала, то есть количества используемых уровней сигнала, частоты дискретизации и т. д. Поставщики услуг заявляют скорость передачи данных до 12 Мбит/с, однако пользователям редко удастся наблюдать такое качество передачи данных. Тем не менее это великолепный результат для шестидесяти лет развития технологий передачи информации, в течение которых произошел огромный скачок от емкости каналов, характерной для времен Шеннона, и до существующей в современных реальных сетях.

Результат, полученный Шенноном и подкрепленный постулатами теории информации, применим к любому каналу с Гауссовским (термальным) шумом. Попытки доказать обратное заранее обречены на провал. Для того чтобы добиться в канале ADSL скорости, превышающей 13 Мбит/с, необходимо либо улучшить отношение

сигнал/шум (например, добавив цифровые повторители в линии передачи данных, подходящие к компьютерам пользователей), либо расширить полосу пропускания, как это сделано в новой версии технологии, ADSL2+.

2.2. Проводниковые среды передачи информации

Назначением физического уровня сети является передача 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. Среда передачи информации можно разделить на две группы: проводниковые среды, такие как медный провод и оптоволоконный кабель, и беспроводные, например предназначенные для наземной беспроводной и спутниковой связи, а также передача по лазерному лучу без кабеля. Мы рассмотрим проводниковые среды в этом разделе, а беспроводные — в последующих.

2.2.1. 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 800 Гбайт. В коробку размером $60 \times 60 \times 60$ см помещается около 1000 таких кассет, что дает общую емкость 800 терабайт или 6400 терабит (6,4 петабит). 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 6400 терабит/86 400 с или немногим больше 70 Гбит/с. Если же пункт назначения находится всего в часе езды, то пропускная способность составит свыше 1700 Гбит/с. Ни одна компьютерная сеть пока не в состоянии даже приблизиться к таким показателям.

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 мы получим около \$5000 за передачу 800 Тбайт или чуть более половины 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.

2.2.2. 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 напоминающая молекулу ДНК. Это позволяет уменьшить электромагнитное взаимодействие нескольких расположенных рядом витых пар. (Два параллельных провода образуют простейшую антенну, витая пара — нет.) Сигнал обычно передается в виде разницы потенциалов в двух проводах, составляющих пару. Это обеспечивает лучшую устойчивость к внешнему шуму, так как шум одинаково влияет на оба провода, и, таким образом, разница потенциалов остается неизменной.

Самым распространенным применением витой пары является телефонная линия. Почти все телефоны соединяются с телефонными компаниями при помощи этого носителя. По витой паре передаются не только телефонные звонки; доступ в Интернет по технологии ADSL также осуществляется через витую пару. Витая пара может передавать сигнал без ослабления мощности на расстояние, составляющее несколько километров. На более дальних расстояниях из-за ослабления сигнала 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. В офисных зданиях наиболее распространена витая пара категории 5 или «Cat 5». Витая пара категории 5 состоит из двух изолированных проводов, свитых друг с другом. Четыре такие пары обычно помещаются вместе в пластиковую оболочку. Подобная схема показана на рис. 2.2.

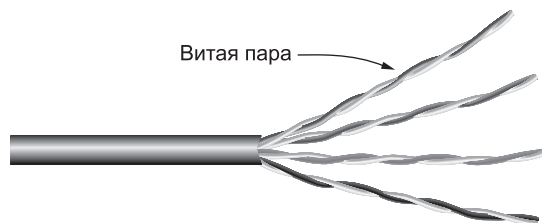


Рис. 2.2. Кабель UTP категории 5 с четырьмя витыми парами

В сетях разных стандартов витая пара используется по-разному. Например, в 100-мегабитной сети Ethernet данные передаются по двум (из четырех) парам, по одной паре в каждом направлении.

Для того чтобы достичь более высокой скорости, в 1-гигабитных сетях Ethernet данные передаются по всем четырем парам одновременно в обоих направлениях. Во избежание ошибок принимающее устройство должно уметь отделять сигнал, передаваемый локально.

Немного сухой терминологии. Линии, по которым данные могут одновременно передаваться в обе стороны, как на улице с двухсторонним движением, называются дуплексными. А те линии, по которым данные в каждый момент времени могут пересылаться лишь в одном направлении, как на дороге с реверсивным движением, называются полудуплексными. Третья категория — это дороги с односторонним движением — линии, по которым передача сигнала возможна только в одну сторону. Они называются симплексными.

Возвращаясь к витой паре, на смену витой паре третьей категории пришла витая пара категории 5. У витой пары пятой категории такой же разъем, но число витков на метр длины проводов больше, чем у кабеля третьей категории. Большее число витков обеспечивает лучшее качество передачи сигнала на большие расстояния и уменьшает наводки. Таким образом, витая пара категории 5 лучше подходит для высокоскоростной компьютерной связи, особенно для 100-мегабитных и 1-гигабитных сетей Ethernet.

Новым стандартом станут, вероятно, кабели категорий 6 или даже 7. Жесткие спецификации этих категорий обеспечивают обработку сигналов с большой полосой пропускания. Некоторые кабели категории 6 и выше предназначены для сигналов с частотой 500 МГц; их можно использовать в 10-гигабитных сетях, развертывание которых планируется в ближайшем будущем.

Вплоть до категории 6, все эти типы соединений часто называются UTP (unshielded twisted pair — неэкранированная витая пара), так как они состоят всего лишь из проводов и изоляции. В противоположность им, в кабелях категории 7 экранированы не только отдельные витые пары, но и весь кабель (помещенный в защитную пластиковую оболочку). Экранирование снижает чувствительность к внешним помехам и наводки между соседними кабелями. Благодаря этому витая пара седьмой категории отвечает высоким требованиям к производительности. Кабель категории 7 напоминает высококачественные, но громоздкие экранированные кабели из витых пар корпорации IBM, которые она представила на рынке в 1980 году. Они так и не стали популярными за пределами фирмы IBM. Очевидно, настало время попробовать еще раз.

2.2.3. 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). Начиная с середины 1990-х годов операторы кабельного телевидения стали также предоставлять услуги доступа к Интернету, что сделало 75-Омный кабель еще более значимой средой передачи информации.

Коаксиальный кабель состоит из твердого медного провода, расположенного в центре кабеля, покрытого изоляцией. Поверх изоляции натянут 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.

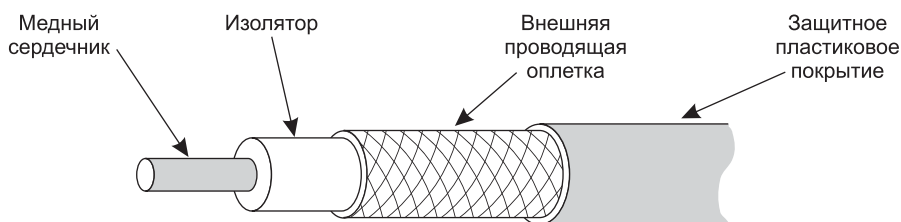


Рис. 2.3. Коаксиальный кабель

Конструкция и специальный тип экранирования коаксиального кабеля обеспечивают высокую пропускную способность и отличную помехозащищенность. Максимальная пропускная способность зависит от качества и длины. Современные кабели имеют полосу пропускания до нескольких гигагерц. Коаксиальные кабели широко применялись в телефонных системах, но теперь на линиях большой протяженности они все чаще заменяются оптоволоконными кабелями. Однако коаксиальные кабели все еще широко используются для кабельного телевидения, а также в некоторых региональных сетях.

2.2.4. Линии электропитания

Телефонные сети и кабельное телевидение — не единственные линии передачи данных, которые можно приспособить для пересылки информации. Есть и еще одна распространенная проводная сеть: электрическая. По линиям электропитания электричество поставляется в дома. Внутри домов электричество по проводам подводится к розеткам.

Идея использовать линии электропитания для передачи данных возникла довольно давно. Электрические компании таким способом много лет удаленно снимают показания. Кроме того, подобная низкоскоростная передача данных позволяет управлять различными домашними устройствами (например, по стандарту X10). В последние годы снова возродился интерес к высокоскоростной передаче информации по линиям электропитания, как внутри дома, так и за его пределами — для доступа к Интернету. Мы рассмотрим наиболее распространенный вариант: использование электропроводки внутри дома.

Удобство такого варианта очевидно. Просто подключите телевизор и ресивер к стенной розетке (это необходимо сделать в любом случае, так как устройствам нужно электропитание), и они смогут отправлять и получать фильмы по электрическим про-

водам. Подобная конфигурация показана на рис. 2.4. Никаких других разъемов или точек передачи радиосигналов нет. Сигнал данных накладывается на низкочастотный сигнал электропитания (на активном проводе — том, что находится под напряжением), и оба сигнала передаются по проводам одновременно.

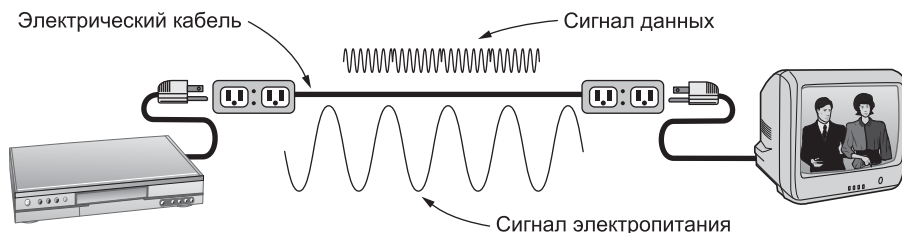


Рис. 2.4. Сеть на основе домашней электропроводки

Сложность применения домашней электропроводки для построения сети передачи данных заключается в том, что основное ее предназначение — это распределение электроэнергии. Очевидно, что эти две задачи кардинально различаются. Электрические сигналы пересылаются с частотой 50–60 Гц, а более высокочастотные сигналы (их частота измеряется с единиц мегагерц) затухают. Свойства проводки в разных домах могут сильно отличаться, к тому же они меняются при включении и выключении бытовых приборов, что приводит к нестабильности сигналов данных. Неустойчивый ток при включении или выключении устройства создает электрический шум в большом диапазоне частот. А без тщательного скручивания (как в витой паре) электрическая проводка действует как тонкая антенна, собирая внешние сигналы и излучая собственные. Такое поведение означает, что для того чтобы отвечать нормативам стандартов, сигналам данных нужно исключать лицензированные частоты, такие как частоты, выделенные для любительских радиостанций.

Несмотря на перечисленные трудности, по обычной домашней электросети можно отправлять данные со скоростью как минимум 100 Мбит/с, используя схемы с предотвращением ослабления сигнала и подавлением ошибок. Для многих продуктов применяются запатентованные стандарты передачи данных по линиям электропитания, но международные стандарты пока что находятся в активной разработке.

2.2.5. Волоконная оптика

Быстрое развитие компьютерных технологий в соответствии с законом Мура (который предсказал, что число транзисторов на кристалле будет удваиваться приблизительно каждые два года) 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 28 лет этот показатель вырос до 3 ГГц на четырехъядерных процессорах. Прирост множителя составил около 2500 или 16 за декаду. Не так уж плохо.

За тот же период скорость передачи данных выросла с 45 Мбит/с (линия T3 по телефонным проводам) до 100 Гбит/с (современная длинная линия), это означает не менее впечатляющий рост в 2000 раз или 16 раз за 10 лет. При этом вероятность

ошибки при передаче уменьшилась с 10^{-5} на бит почти до нуля. Помимо этого, процессоры начинают приближаться к своим физическим пределам, поэтому теперь на одном кристалле их используется сразу несколько. Существующая ныне оптоволоконная технология, напротив, может развивать скорость передачи данных вплоть до 50 000 Гбит/с (50 Тбит/с), и до достижения ее физического предела нам еще далеко. Сегодняшний практический предел в 100 Гбит/с обусловлен нашей неспособностью быстрее преобразовывать электрические сигналы в оптические и обратно. Для того чтобы достичь более высокой скорости, по одному волокну просто одновременно передаются данные нескольких каналов.

В этом разделе мы познакомимся с оптическим волокном и узнаем, как данные передаются по оптоволокну. В гонке компьютеров и средств связи у последних еще есть шанс на победу — благодаря волоконной оптике. Если это произойдет, то в мире появится не только совершенно новое понятие о почти бесконечной полосе пропускания, но и неслыханная доселе идея о том, что все компьютеры безнадежно медленны и сетям следует любой ценой избегать вычислений, независимо от того, какая часть полосы пропускания при этом будет потеряна. Необходимо время, чтобы изменения впитались в умы поколений ученых-компьютерщиков и инженеров, приученных думать в терминах низкоскоростных медных линий и ограничений, сформулированных Шенноном.

Конечно, в этом представлении не хватает одной немаловажной детали: стоимости. Затраты на прокладку оптоволокну до компьютера каждого пользователя, чтобы обойти характерные для проводов ограничения — низкую полосу пропускания и небольшой диапазон частот, — попросту огромны. Помимо этого, на пересылку битов тратится больше энергии, чем на вычисления. Всегда будут существовать островки неравенства, в которых стоимость либо вычислений, либо пересылки данных будет приближаться к нулю. Например, перед тем как выйти в Интернет, мы применяем все имеющиеся вычислительные возможности и расходует место на диске, чтобы решить проблему сжатия и кэширования содержимого — все для того, чтобы наиболее эффективно воспользоваться доступом к Всемирной сети. В Интернете же может происходить обратное. Такие компании, как Google, перемещают по сети огромные объемы данных, сбрасывая их туда, где хранение и обработка будут стоить дешевле.

Оптоволокну используется для пересылки информации на очень большие расстояния по сетевым магистральным соединениям, внутри высокоскоростных локальных сетей (хотя пока что ему не удастся достаточно далеко уйти вперед от медных проводов) и для высокоэффективного доступа в Интернет, например, по технологии FTTH (Fiber to the Home — волокно прямо к дому). 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. 2.5, а. Здесь мы видим, что луч света падает под углом α_1 , выходя под углом β_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. 2.5, б, и может быть передан на большое расстояние почти без потерь.

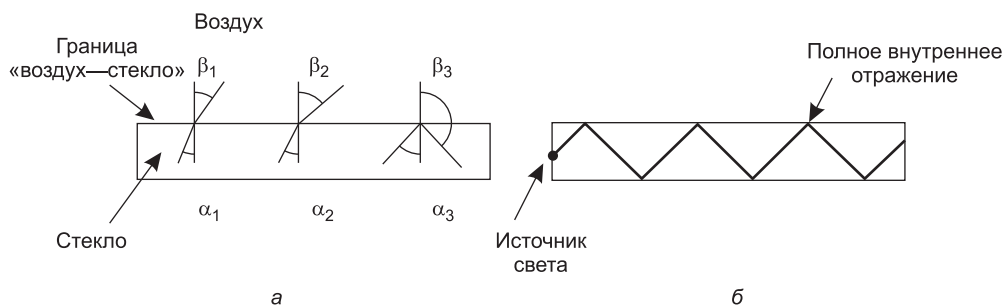


Рис. 2.5. Три примера преломления луча света, падающего под разными углами, на границе кварцевого волокна и воздуха (а); луч света, пойманный полным внутренним отражением (б)

На рис. 2.5, 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 использоваться при передаче данных на большие расстояния. Сегодняшние одномодовые волоконные линии могут работать со скоростью 100 Гбит/с на расстоянии до 100 км. В лабораториях были достигнуты и более высокие скорости, правда, на меньших дистанциях.

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 (а также от некоторых физических свойств стекла). Оно определяется в виде отношения мощности входного сигнала к мощности выходного сигнала. Для стекла, используемого в оптическом волокне, зависимость ослабления от длины волны показана на рис. 2.6 в децибелах на километр длины волокна. 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 или 1 микрон равен 10^{-6} метра). Приверженцы точных наименований сказали бы, что длина волны измеряется в нанометрах — в данном случае речь о диапазоне от 400 до 700 нм, — однако мы будем использовать более привычные термины.

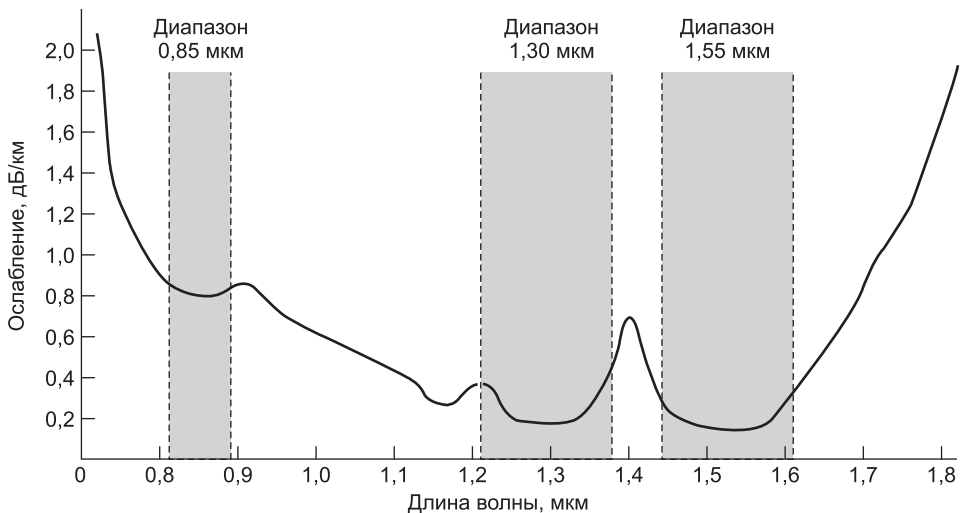


Рис. 2.6. Ослабление света в инфракрасной области спектра при прохождении через оптическое волокно

В системах связи используются три диапазона длин волн: 0,85, 1,30 и 1,55 мкм. Все три диапазона обладают полосой пропускания от 25 000 до 30 000 ГГц. Первым стал применяться диапазон с центром 0,85 мкм. Он обладает более высоким ослаблением, поэтому используется для передачи на короткие расстояния. Однако его преимуществом является то, что для этой длины волны лазеры и электроника могут быть сделаны из одного и того же материала (арсенида галлия). У двух остальных диапазонов показатели по ослаблению лучше (менее 5 % потерь на километр). В настоящее время широко используется диапазон 1,55 мкм и волоконные усилители с добавкой эрбия, которые работают прямо в оптическом домене.

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 уединенными волнами или солитонами. Значительная часть исследователей намерена перейти от лабораторных исследований уединенных волн к их промышленному использованию.

Оптоволоконные кабели

Структура оптоволоконного кабеля схожа с описанной выше структурой коаксиального провода. Разница состоит лишь в том, что в первом нет экранирующей сетки. На рис. 2.7, 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.

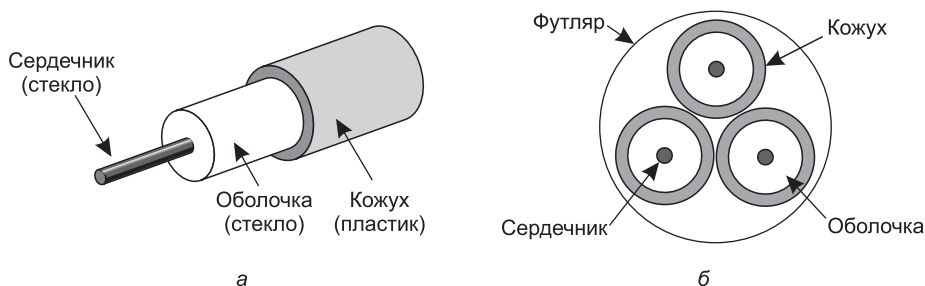


Рис. 2.7. Вид одиночного волокна сбоку (а); поперечное сечение трехжильного кабеля (б)

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. 2.7, б показан трехжильный кабель.

Обычно кабели кладутся в грунт на глубину около метра, 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.