

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ

ШЕСТОЕ ИЗДАНИЕ

ЭНДРЮ ТАНЕНБАУМ
НИК ФИМСТЕР
ДЭВИД УЭЗЕРОЛЛ



Санкт-Петербург • Москва • Минск

2024

Краткое содержание

Предисловие	20
Об авторах	24
Глава 1. Введение.....	26
Глава 2. Физический уровень	121
Глава 3. Канальный уровень	242
Глава 4. Подуровень управления доступом к среде	312
Глава 5. Сетевой уровень	412
Глава 6. Транспортный уровень	563
Глава 7. Прикладной уровень	684
Глава 8. Сетевая безопасность	813
Глава 9. Рекомендации для чтения и библиография	960

Оглавление

Предисловие	20
Новое в шестом издании	20
Список аббревиатур.....	22
Материалы для студентов.....	22
Благодарности.....	23
Об авторах	24
От издательства.....	25
Глава 1. Введение.....	26
1.1. Применение компьютерных сетей	26
1.1.1. Доступ к информации.....	27
1.1.2. Общение	30
1.1.3. Электронная коммерция.....	31
1.1.4. Развлечения.....	32
1.1.5. Интернет вещей	32
1.2. Типы компьютерных сетей	33
1.2.1. Сети широкополосного доступа.....	33
1.2.2. Мобильные и беспроводные сети	34
1.2.3. Сети доставки контента	37
1.2.4. Транзитные сети.....	38
1.2.5. Корпоративные сети.....	39
1.3. Сетевые технологии, от локальных до глобальных	41
1.3.1. Персональные сети	41
1.3.2. Локальные сети.....	42

1.3.3. Домашние сети	45
1.3.4. Городские сети	47
1.3.5. Глобальные сети	48
1.3.6. Объединенные сети	52
1.4. Примеры сетей	53
1.4.1. Интернет	53
1.4.2. Мобильные сети	65
1.4.3. Беспроводные сети (Wi-Fi)	71
1.5. Сетевые протоколы	76
1.5.1. Цели проектирования	76
1.5.2. Разделение протокола на уровни	78
1.5.3. Соединения и надежность	82
1.5.4. Примитивы служб	85
1.5.5. Службы и протоколы	88
1.6. Эталонные модели	89
1.6.1. Эталонная модель OSI	89
1.6.2. Эталонная модель TCP/IP	90
1.6.3. Критика модели и протоколов OSI	94
1.6.4. Критика модели и протоколов TCP/IP	96
1.6.5. Модель, используемая в этой книге	97
1.7. Стандартизация	98
1.7.1. Стандартизация и открытый исходный код	98
1.7.2. Кто есть кто в мире телекоммуникаций	99
1.7.3. Кто есть кто в мире международных стандартов	101
1.7.4. Кто есть кто в мире интернет-стандартов	104
1.8. Политические, правовые и социальные проблемы	106
1.8.1. Свобода слова в интернете	106
1.8.2. Сетевой нейтралитет	107
1.8.3. Безопасность	108
1.8.4. Защита персональной информации	109
1.8.5. Дезинформация	111
1.9. Единицы измерения	111

1.10. Краткий обзор следующих глав.....	112
1.11. Резюме	113
Вопросы и задачи.....	115
Глава 2. Физический уровень	121
2.1. Проводные среды передачи данных	121
2.1.1. Запоминающее устройство	122
2.1.2. Витая пара.....	123
2.1.3. Коаксиальный кабель	125
2.1.4. Линии электропередачи.....	126
2.1.5. Оптоволокно	127
2.2. Беспроводная передача данных	133
2.2.1. Спектр электромагнитных волн.....	133
2.2.2. Псевдослучайная перестройка рабочей частоты.....	135
2.2.3. Метод прямой последовательности для расширения спектра.....	136
2.2.4. Сверхширокополосная связь	137
2.3. Применение спектра электромагнитных волн для передачи данных.....	137
2.3.1. Радиосвязь	137
2.3.2. Микроволновая связь	139
2.3.3. Передача данных в инфракрасном диапазоне	140
2.3.4. Передача данных в видимом диапазоне	141
2.4. От форм волн к битам.....	143
2.4.1. Теоретические основы обмена данными	143
2.4.2. Максимальная скорость передачи данных по каналу	147
2.4.3. Цифровая модуляция	149
2.4.4. Мультиплексирование.....	158
2.5. Коммутируемая телефонная сеть общего пользования	166
2.5.1. Структура телефонной системы	167
2.5.2. Абонентские шлейфы: телефонные модемы, ADSL и оптоволокно.....	170
2.5.3. Соединительные линии и мультиплексирование	179
2.5.4. Коммутация.....	186

2.6. Сотовые сети.....	191
2.6.1. Основные понятия: соты, передача обслуживания, пейджинг	191
2.6.2. Технология 1G: аналоговая передача голоса.....	193
2.6.3. Технология 2G: цифровая передача голоса.....	195
2.6.4. GSM: Глобальная система мобильной связи	196
2.6.5. Технология 3G: цифровая передача голоса и данных.....	200
2.6.6. Технология 4G: коммутация пакетов	204
2.6.7. Технология 5G	206
2.7. Кабельные сети	207
2.7.1. История кабельных сетей: ТВ-системы коллективного приема	207
2.7.2. Широкополосный доступ в интернет по кабелю: сети HFC	208
2.7.3. DOCSIS.....	211
2.7.4. Совместное использование ресурсов в сетях DOCSIS: узлы и мини-слоты	212
2.8. Спутники связи	214
2.8.1. Геостационарные спутники.....	216
2.8.2. Среднеорбитальные спутники.....	220
2.8.3. Низкоорбитальные спутники	220
2.9. Сравнение различных сетей доступа	223
2.9.1. Наземные сети доступа: кабельные, оптоволоконные и ADSL	223
2.9.2. Спутники и наземные сети.....	225
2.10. Нормативное регулирование физического уровня.....	227
2.10.1. Распределение частот	227
2.10.2. Сотовые сети.....	230
2.10.3. Телефонная сеть.....	231
2.11. Резюме	234
Вопросы и задачи.....	235
Глава 3. Канальный уровень	242
3.1. Ключевые вопросы проектирования канального уровня	242
3.1.1. Службы, предоставляемые сетевому уровню.....	243

1.10. Краткий обзор следующих глав.....	112
1.11. Резюме	113
Вопросы и задачи	115
Глава 2. Физический уровень	121
2.1. Проводные среды передачи данных	121
2.1.1. Запоминающее устройство	122
2.1.2. Витая пара.....	123
2.1.3. Коаксиальный кабель	125
2.1.4. Линии электропередачи.....	126
2.1.5. Оптоволокно	127
2.2. Беспроводная передача данных	133
2.2.1. Спектр электромагнитных волн.....	133
2.2.2. Псевдослучайная перестройка рабочей частоты.....	135
2.2.3. Метод прямой последовательности для расширения спектра.....	136
2.2.4. Сверхширокополосная связь	137
2.3. Применение спектра электромагнитных волн для передачи данных.....	137
2.3.1. Радиосвязь	137
2.3.2. Микроволновая связь	139
2.3.3. Передача данных в инфракрасном диапазоне.....	140
2.3.4. Передача данных в видимом диапазоне	141
2.4. От форм волн к битам.....	143
2.4.1. Теоретические основы обмена данными	143
2.4.2. Максимальная скорость передачи данных по каналу	147
2.4.3. Цифровая модуляция	149
2.4.4. Мультиплексирование.....	158
2.5. Коммутируемая телефонная сеть общего пользования	166
2.5.1. Структура телефонной системы	167
2.5.2. Абонентские шлейфы: телефонные модемы, ADSL и оптоволокно.....	170
2.5.3. Соединительные линии и мультиплексирование	179
2.5.4. Коммутация.....	186

2.6. Сотовые сети.....	191
2.6.1. Основные понятия: соты, передача обслуживания, пейджинг	191
2.6.2. Технология 1G: аналоговая передача голоса.....	193
2.6.3. Технология 2G: цифровая передача голоса	195
2.6.4. GSM: Глобальная система мобильной связи	196
2.6.5. Технология 3G: цифровая передача голоса и данных.....	200
2.6.6. Технология 4G: коммутация пакетов	204
2.6.7. Технология 5G	206
2.7. Кабельные сети	207
2.7.1. История кабельных сетей: ТВ-системы коллективного приема	207
2.7.2. Широкополосный доступ в интернет по кабелю: сети HFC	208
2.7.3. DOCSIS.....	211
2.7.4. Совместное использование ресурсов в сетях DOCSIS: узлы и мини-слоты	212
2.8. Спутники связи	214
2.8.1. Геостационарные спутники.....	216
2.8.2. Среднеорбитальные спутники.....	220
2.8.3. Низкоорбитальные спутники	220
2.9. Сравнение различных сетей доступа	223
2.9.1. Наземные сети доступа: кабельные, оптоволоконные и ADSL	223
2.9.2. Спутники и наземные сети.....	225
2.10. Нормативное регулирование физического уровня.....	227
2.10.1. Распределение частот	227
2.10.2. Сотовые сети.....	230
2.10.3. Телефонная сеть.....	231
2.11. Резюме	234
Вопросы и задачи.....	235
Глава 3. Канальный уровень.....	242
3.1. Ключевые вопросы проектирования канального уровня	242
3.1.1. Службы, предоставляемые сетевому уровню.....	243

3.1.2. Формирование фрейма	246
3.1.3. Обработка ошибок	250
3.1.4. Управление потоком.....	251
3.2. Обнаружение и коррекция ошибок	252
3.2.1. Корректирующие коды.....	253
3.2.2. Коды для обнаружения ошибок	259
3.3. Элементарные протоколы передачи данных на канальном уровне	266
3.3.1. Исходные упрощающие допущения.....	266
3.3.2. Базовая схема передачи и приема данных.....	267
3.3.3. Симплексные протоколы канального уровня	271
3.4. Повышение эффективности.....	277
3.4.1. Цель: двунаправленная передача, отправка сразу нескольких фреймов	278
3.4.2. Примеры дуплексных протоколов раздвижного окна	280
3.5. Практическое использование протоколов канального уровня.....	296
3.5.1. Передача пакетов по каналам SONET	296
3.5.2. ADSL.....	300
3.5.3. DOCSIS.....	303
3.6. Резюме.....	305
Вопросы и задачи.....	306
 Глава 4. Подуровень управления доступом к среде	312
4.1. Проблема распределения канала.....	313
4.1.1. Статическое распределение канала	313
4.1.2. Допущения, связанные с динамическим распределением каналов.....	315
4.2. Протоколы коллективного доступа.....	317
4.2.1. Система ALOHA.....	317
4.2.2. Протоколы множественного доступа с контролем несущей.....	321
4.2.3. Протоколы без коллизий.....	325
4.2.4. Протоколы с ограниченной конкуренцией	329
4.2.5. Протоколы беспроводных локальных сетей.....	333
4.3. Сеть Ethernet	336
4.3.1. Физический уровень классического Ethernet.....	337

4.3.2. Протокол MAC в классическом Ethernet.....	338
4.3.3. Производительность Ethernet	342
4.3.4. Коммутируемый Ethernet	344
4.3.5. Fast Ethernet.....	347
4.3.6. Gigabit Ethernet.....	350
4.3.7. 10-гигабитный Ethernet	354
4.3.8. 40- и 100-гигабитный Ethernet	356
4.3.9. Ретроспективный взгляд на Ethernet.....	357
4.4. Беспроводные локальные сети	358
4.4.1. Стандарт 802.11: архитектура и стек протоколов	359
4.4.2. Стандарт 802.11: физический уровень.....	361
4.4.3. Стандарт 802.11: протокол подуровня управления доступом к среде	364
4.4.4. Стандарт 802.11: структура фрейма.....	371
4.4.5. Службы	373
4.5. Bluetooth.....	376
4.5.1. Архитектура Bluetooth	376
4.5.2. Применение Bluetooth.....	377
4.5.3. Стек протоколов Bluetooth.....	378
4.5.4. Bluetooth: уровень радиосвязи	380
4.5.5. Bluetooth: канальный уровень	380
4.5.6 Bluetooth: структура фрейма.....	382
4.5.7. Bluetooth 5	383
4.6. DOCSIS	384
4.6.1. Общие сведения	384
4.6.2. Пристрелка	385
4.6.3. Распределение пропускной способности каналов.....	385
4.7. Коммутация на канальном уровне	386
4.7.1. Применение мостов	387
4.7.2. Обучающиеся мосты	388
4.7.3. Мосты связующего дерева	391
4.7.4. Повторители, концентраторы, мосты, коммутаторы, маршрутизаторы и шлюзы	394
4.7.5. Виртуальные локальные сети	397

4.8. Резюме.....	404
Вопросы и задачи.....	405
Глава 5. Сетевой уровень	412
5.1. Вопросы разработки сетевого уровня.....	412
5.1.1. Метод коммутации пакетов с ожиданием	412
5.1.2. Службы, предоставляемые транспортному уровню	413
5.1.3. Реализация службы без установления соединения	415
5.1.4. Реализация службы с установлением соединения.....	416
5.1.5. Сравнение сетей виртуальных каналов и дейтаграммных сетей	418
5.2. Алгоритмы маршрутизации в рамках одной сети	419
5.2.1. Принцип оптимальности.....	422
5.2.2. Алгоритм поиска кратчайшего пути.....	423
5.2.3. Лавинная адресация	426
5.2.4. Маршрутизация по вектору расстояний.....	427
5.2.5. Маршрутизация с учетом состояния линий	431
5.2.6. Иерархическая маршрутизация внутри сети	437
5.2.7. Широковещательная маршрутизация	438
5.2.8. Многоадресная рассылка.....	441
5.2.9. Произвольная маршрутизация.....	444
5.3. Управление трафиком на сетевом уровне	445
5.3.1. Необходимость в управлении трафиком: перегрузка.....	445
5.3.2. Методы управления трафиком.....	448
5.4. QoS и QoE приложений.....	463
5.4.1. Требования приложений к QoS.....	463
5.4.2. Избыточное обеспечение.....	465
5.4.3. Планирование пакетов	466
5.4.4. Комплексное обслуживание.....	474
5.4.5. Дифференцированное обслуживание	477
5.5. Межсетевое взаимодействие.....	480
5.5.1. Интерсети: общие сведения.....	480
5.5.2. Различия сетей	481
5.5.3. Объединение гетерогенных сетей.....	483

5.5.4. Соединение конечных точек в гетерогенных сетях.....	485
5.5.5. Межсетевая маршрутизация	487
5.5.6. Поддержка различных размеров пакета: фрагментация пакета.....	488
5.6. Программно-конфигурируемые сети.....	492
5.6.1. Общие сведения	492
5.6.2. Плоскость управления в SDN: логически централизованное программное управление.....	493
5.6.3. Плоскость данных в SDN: программируемое оборудование	495
5.6.4. Программируемая сетевая телеметрия.....	498
5.7. Сетевой уровень интернета	499
5.7.1. Протокол IP версии 4.....	501
5.7.2. IP-адреса.....	505
5.7.3. Протокол IP версии 6.....	519
5.7.4. Управляющие протоколы интернета.....	530
5.7.5. Коммутация меток и MPLS.....	535
5.7.6. Протокол внутреннего шлюза OSPF.....	538
5.7.7. Протокол внешнего шлюза BGP.....	544
5.7.8. Многоадресная интернет-рассылка	551
5.8. Политика сетевого уровня	552
5.8.1. Пиринговые споры.....	552
5.8.2. Приоритизация трафика.....	553
5.9. Резюме.....	554
Вопросы и задачи.....	556
Глава 6. Транспортный уровень	563
6.1. Транспортные службы.....	563
6.1.1. Службы, предоставляемые верхним уровням.....	563
6.1.2. Примитивы транспортных служб.....	565
6.1.3. Сокеты Беркли	569
6.1.4. Пример программирования сокета: файл-сервер для интернета.....	571
6.2. Элементы транспортных протоколов	575
6.2.1. Адресация.....	577

6.2.2. Установление соединения	580
6.2.3. Разрыв соединения	586
6.2.4. Контроль ошибок и управление потоком данных	590
6.2.5. Мультиплексирование.....	596
6.2.6. Восстановление после сбоев.....	597
6.3. Контроль перегрузки	599
6.3.1. Выделение требуемой пропускной способности.....	599
6.3.2. Регулирование скорости отправки.....	604
6.3.3. Проблемы беспроводного соединения.....	608
6.4. Транспортные протоколы интернета: UDP	611
6.4.1. Основы UDP.....	611
6.4.2. Вызов удаленной процедуры.....	613
6.4.3. Транспортные протоколы реального времени	616
6.5. Транспортные протоколы интернета: TCP	623
6.5.1. Основы TCP	623
6.5.2. Модель службы TCP.....	624
6.5.3. Протокол TCP	626
6.5.4. Заголовок TCP-сегмента	628
6.5.5. Установка TCP-соединения.....	631
6.5.6. Разрыв TCP-соединения	633
6.5.7. Модель управления TCP-соединением.....	633
6.5.8. Раздвижное окно TCP	636
6.5.9. Управление таймерами в TCP	640
6.5.10. Контроль перегрузки в TCP.....	643
6.5.11. CUBIC TCP	654
6.6. Транспортные протоколы и контроль перегрузки.....	654
6.6.1. QUIC.....	655
6.6.2. BBR: контроль перегрузки на основе пропускной способности узких мест.....	655
6.6.3. Будущее протокола TCP.....	658
6.7. Вопросы производительности	658
6.7.1. Проблемы производительности компьютерных сетей.....	659
6.7.2. Оценка производительности сети	660
6.7.3. Оценка пропускной способности сетей доступа	660

6.7.4. Оценка QoE.....	662
6.7.5. Проектирование хостов для быстрых сетей.....	663
6.7.6. Быстрая обработка сегментов.....	666
6.7.7. Сжатие заголовков.....	670
6.7.8. Протоколы для протяженных сетей с высокой пропускной способностью.....	672
6.8. Резюме.....	676
Вопросы и задачи.....	677
Глава 7. Прикладной уровень	684
7.1. Служба имен доменов DNS.....	684
7.1.1. История и общие сведения	685
7.1.2. Процесс поиска DNS.....	685
7.1.3. Пространство имен и иерархия DNS.....	688
7.1.4. DNS-запросы и DNS-ответы	692
7.1.5. Разрешение имен	699
7.1.6. Практическое ознакомление с DNS.....	701
7.1.7. DNS и конфиденциальность.....	701
7.1.8. Разногласия по поводу способов именования	704
7.2. Электронная почта	704
7.2.1. Архитектура и службы	706
7.2.2. Пользовательский агент.....	708
7.2.3. Форматы сообщений.....	710
7.2.4. Пересылка сообщений.....	716
7.2.5. Окончательная доставка	721
7.3. Всемирная паутина.....	725
7.3.1. Представление об архитектуре.....	726
7.3.2. Статичные веб-объекты	735
7.3.3. Динамические веб-страницы и веб-приложения	736
7.3.4. HTTP и HTTPS	740
7.3.5. Конфиденциальность в интернете	753
7.4. Потокковая передача аудио и видео	758
7.4.1. Цифровой звук	759
7.4.2. Цифровое видео.....	762

7.4.3. Потокковая передача сохраненных медиафайлов	766
7.4.4. Потокковая передача в реальном времени	774
7.5. Доставка контента.....	785
7.5.1. Контент и интернет-трафик	786
7.5.2. Серверные фермы и веб-прокси.....	788
7.5.3. Сети доставки контента	792
7.5.4. Одноранговые сети	797
7.5.5. Эволюция интернета.....	803
7.6. Резюме.....	807
Вопросы и задачи.....	808
Глава 8. Сетевая безопасность	813
8.1. Основы сетевой безопасности	815
8.1.1. Базовые принципы безопасности	817
8.1.2. Базовые принципы проведения атак.....	819
8.1.3. Методы борьбы с угрозами	821
8.2. Основные компоненты атаки.....	822
8.2.1. Разведка	822
8.2.2. Прослушивание и перехват (и немного подмены данных)	825
8.2.3. Подмена данных (помимо ARP).....	827
8.2.4. Нарушение работы.....	840
8.3. Брандмауэры и системы обнаружения вторжений.....	844
8.3.1. Брандмауэры.....	844
8.3.2. Обнаружение и предотвращение вторжений	847
8.4. Криптография	852
8.4.1. Основы криптографии	852
8.4.2. Два базовых принципа криптографии.....	855
8.4.3. Подстановочные шифры.....	857
8.4.4. Перестановочные шифры.....	859
8.4.5. Одноразовые блокноты.....	860
8.5. Алгоритмы с симметричным ключом	866
8.5.1. Стандарт шифрования данных DES.....	867

8.5.2. Улучшенный стандарт шифрования AES	868
8.5.3. Режимы шифрования	870
8.6. Алгоритмы с открытым ключом	875
8.6.1. Алгоритм RSA	876
8.6.2. Другие алгоритмы с открытым ключом	878
8.7. Цифровые подписи	879
8.7.1. Подписи с симметричным ключом	880
8.7.2. Подписи с открытым ключом	881
8.7.3. Профили сообщений	883
8.7.4. Атака «дней рождения»	886
8.8. Управление открытыми ключами	888
8.8.1. Сертификаты	889
8.8.2. X.509	890
8.8.3. Инфраструктуры систем с открытыми ключами	892
8.9. Протоколы аутентификации	895
8.9.1. Аутентификация на основе общего секретного ключа	896
8.9.2. Установка общего ключа: протокол обмена ключами Диффи — Хеллмана	901
8.9.3. Аутентификация с помощью центра распространения ключей	904
8.9.4. Аутентификация при помощи протокола Kerberos	907
8.9.5. Аутентификация путем шифрования с открытым ключом	910
8.10. Защита соединений	911
8.10.1. IPsec	911
8.10.2. Виртуальные частные сети	915
8.10.3. Безопасность в беспроводных сетях	917
8.11. Безопасность электронной почты	921
8.11.1. PGP	921
8.11.2. S/MIME	926
8.12. Веб-безопасность	926
8.12.1. Угрозы	927
8.12.2. Безопасное именованье ресурсов и DNSSEC	928
8.12.3. Протокол TLS	931
8.12.4. Выполнение недоверенного кода	935

8.13. Социальные вопросы.....	938
8.13.1. Приватная и анонимная коммуникация.....	938
8.13.2. Свобода слова.....	942
8.13.3. Авторское право.....	946
8.14. Резюме	949
Вопросы и задачи.....	951

Глава 9. Рекомендации для чтения и библиография960

9.1. Литература для дальнейшего чтения.....	960
9.1.1. Введение	961
9.1.2. Физический уровень	962
9.1.3. Канальный уровень	963
9.1.4. Подуровень управления доступом к среде.....	964
9.1.5. Сетевой уровень.....	965
9.1.6. Транспортный уровень	966
9.1.7. Прикладной уровень	967
9.1.8. Сетевая безопасность.....	968
9.2. Алфавитный список литературы.....	970