

Федеральное агентство по образованию
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ГОУВПО «АмГУ»

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой ИУС
_____ А.В.Бушманов
«__» _____ 2007г.

СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО ДИСЦИПЛИНЕ

для специальности: 230102 – Информационные системы и технологии

Составитель: ассистент Шагжиев А.С.

Факультет Математики и информатики

Кафедра Информационных и управляющих систем

Благовещенск
2007 г.

Печатается по решению
редакционно-издательского совета
факультета математики и информатики
Амурского государственного
университета

А.С. Шагжиев

Учебно-методический комплекс по дисциплине «Сетевые технологии» для студентов очной формы обучения специальности 230102 – Автоматизированные системы обработки информации и управления. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2007. – 74 с.

Учебно методические рекомендации ориентированны на оказание помощи студентам очной формы обучения по специальности 230102 – Автоматизированные системы обработки информации и управления для успешного освоения дисциплины «Сетевые технологии»

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Рабочая программа дисциплины | 4 |
| 2. Лабораторный практикум | 14 |
| 3. Конспекты лекций по дисциплине | 28 |
| 4. Карта обеспечения дисциплины кадрами профессорско-преподавательского состава | 74 |

Федеральное агентство по образованию РФ
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ГОУВПО «АмГУ»)

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по УНР
_____ Астапова Е.С.
« ____ » _____ 2007 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

По дисциплине: Сетевые технологии.

Для специальности: 230102 – Автоматизированные системы обработки информации и управления.

Курс: 4 Семестр: 8

Лекции: ____ (час.) Экзамен 8 семестр.

Практические (семинарские) занятия: нет

Лабораторные занятия: ____ (час.)

Самостоятельная работа: ____ (час.)

Всего: ____ (час.)

Составитель: Шагжиев А.С., аспирант

Факультет: Математики и информатики.

Кафедра: Информационные и управляющие системы.

2007 г.

Рабочая программа составлена на основании Государственного образовательного стандарта по специальности 230102 – Автоматизированные системы обработки и управления.

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры Информационных и управляющих систем.

« ____ » _____ 2007 г., протокол № ____

Заведующий кафедрой

А.В.Бушманов

Рабочая программа одобрена на заседании УМСС 230102 – Автоматизированные системы обработки и управления.

« ____ » _____ 2007 г., протокол № ____

Заведующий кафедрой

А.В.Бушманов

СОГЛАСОВАНО

Начальник УМУ

_____ Г.Н.Торопчина

« ____ » _____ 2007 г.

СОГЛАСОВАНО

Председатель УМС факультета

_____ Е.Л.Еремин

« ____ » _____ 2007 г.

СОГЛАСОВАНО

Заведующий выпускающей кафедры

_____ А.В.Бушманов

« ____ » _____ 2007 г.

1. Общая характеристика дисциплины, ее место в учебном процессе.

Учебная дисциплина «Сетевые технологии» предназначена для более углубленного изучения сетевых технологий.

Освоение курса «Сетевые технологии» имеет целью ознакомления студентов с современными сетевыми технологиями: основами построения современных сетей, современными аппаратными и программными средствами построения сети, технологиями разработки и построения Internet приложений.

Освоение курса предусматривает дальнейшее изучение студентами сетевых технологий, структур сетей, современных аппаратных и программных средств построения сетей. Ознакомление студентов с основными принципами проектирования, разработки Internet приложений.

Изучив дисциплину, студенты должны:

- владеть основными понятиями современных сетевых технологий;
- иметь представления о базовых компонентах и технологиях глобальных и локальных сетей;
- уметь планировать и настраивать структуру локальных сетей;
- иметь представления о базовых технологиях проектирования и разработки Internet приложений;
- уметь проектировать и разрабатывать Internet приложения с использованием современных программных средств и с учетом предъявляемых требований.

2. Содержание дисциплины

2.1. Лекционные занятия

2.1.1. Обзор развития сетевых технологий

2.1.2. Зарождение и развитие документальной связи

2.1.3. Телефонная связь и важнейшие этапы развития сетей общего пользования

- 2.1.3.1. Многоканальная связь
- 2.1.3.2. Телефонные сети и развитие услуг
- 2.1.3.3. Линии связи.
- 2.1.3.4. Узлы коммутации
- 2.1.3.5. Переход телефонных сетей на цифровую технику
- 2.1.4. Основы техники коммутации
 - 2.1.4.1. Структуры современных систем коммутации
 - 2.1.4.2. Структуры узлов коммутации каналов.
 - 2.1.4.3. Цифровая коммутация каналов
 - 2.1.4.4. Коммутация сообщений и пакетов.
 - 2.1.4.5. Коммутация ячеек АТМ.
- 2.1.5. Узкополосные цифровые сети интегрального обслуживания
 - 2.1.5.1. Цифровая передача речи.
 - 2.1.5.2. Цифровая аппаратура многоканальной связи
 - 2.1.5.3. Плезиохронная цифровая иерархия
 - 2.1.5.4. Сопряжение базового доступа ISDN
- 2.1.6. Общекабельная сигнализация и интеллектуальная сеть
 - 2.1.6.1. Система ОКС-7
 - 2.1.6.2. Интеллектуальная сеть
- 2.1.7. Широкополосные ЦСИО и технология АТМ
- 2.1.8. Доступ к информационным услугам по абонентским линиям
- 2.1.9. Высокоскоростные магистральные сети и беспроводный доступ к информационным услугам
- 2.1.10. Принципы передачи информации по оптическому волокну
 - 2.1.10.1. Волновая оптика
 - 2.1.10.2. Характеристики световодов
 - 2.1.10.3. Волоконно-оптические сети связи общего пользования
 - 2.1.10.4. Два поколения волоконно-оптических сетей
 - 2.1.10.5. Системы передачи по оптическому волокну
 - 2.1.10.6. Повышение скоростей передачи в сети Интернет

- 2.1.10.7. Интегрирование услуг
- 2.1.10.8. Требования к маршрутизаторам и протокол RSVP
- 2.1.10.9. Дифференцирование услуг
- 2.1.10.10. Коммутация в сети Интернет
- 2.1.11. Концепция универсальной персональной связи
- 2.1.11.1. Системы спутниковой связи
- 2.1.11.2. Принципы действия системы сотовой связи GSM
- 2.1.11.3. Физические каналы связи
- 2.1.11.4. Логические каналы связи
- 2.1.11.5. Иерархия циклов
- 2.1.11.6. Работа мобильного аппарата и процессы обмена сообщениями
- 2.1.11.7. Особенности каналов беспроводного доступа
- 2.1.11.8. Распространение радиоволн
- 2.1.11.9. Кодирование сигналов
- 2.1.11.10. Пакетная радиосвязь

2.2. Лабораторные занятия

- 2.2.1. Реализовать приложение на основе клиент - серверной технологии, позволяющее передавать и получать текстовую информацию.
- 2.2.2. В существующем приложении реализовать возможность передачи файлов.
- 2.2.3. В существующем приложении реализовать модуль ведения статистики по отправленным и полученным сообщениям, файлам, пакетам и т.д.
- 2.2.4. В существующем приложении реализовать команду PING и синхронизировать время клиентской части приложения с серверной.
- 2.2.5. В существующем приложении реализовать многопользовательский интерфейс с профилем пользователя, в котором будут храниться настройки, статистика и история работы.

2.2.6. В существующем приложении реализовать возможность авторизованного подключения к удаленной базе данных и выполнить основные инструкции SQL Select, Insert, Delete, Update.

2.2.7. В клиентской части существующего приложения реализовать графический модуль, в котором будут отображаться управляемые пользователями графические объекты.

2.3. Самостоятельная работа студентов

Самостоятельная работа студента, это работа над рекомендованной литературой и использование приобретенных знаний для создания программного приложения.

2.4. Вопросы к экзамену

1. Важнейшие этапы развития сетевых технологий.
2. Понятия о документальной связи и направлениях её развития.
3. Передача буквенно-цифровой информации в современных сетях связи.
4. Принципы организации сети телефонной связи.
5. Линии связи и их характеристики.
6. Принципы перевода сетей связи на цифровую технику.
7. Структура узла коммутации каналов.
8. Принципы цифровой коммутации.
9. Сравнение коммутации каналов и коммутации сообщений (пакетов).
10. Коммутация ячеек АТМ
11. Узкополосные цифровые сети интегрального обслуживания.
12. Общеканальная сигнализация.
13. Широкополосные ЦСИО и технология АТМ.
14. Принципы действия и организация сети АТМ.
15. Форматы ячеек АТМ и назначение полей заголовка.
16. Установление соединений и виды услуг сети АТМ.
17. Доступ к информационным услугам по абонентским линиям.
18. Волоконно-оптические линии связи и их свойства.
19. Понятие синхронной цифровой иерархии.
20. Понятие об универсальной персональной связи.
21. Классификация сетей
22. Протоколы TCP и UDP
23. Концепция универсальной персональной связи
24. Принципы передачи информации по оптическому волокну
25. Высокоскоростные магистральные сети и беспроводный доступ к информационным услугам

26. Многоканальная связь
27. Повышение скоростей передачи в сети Интернет
28. Архитектура INTSERV
29. Архитектура DIFFSERV
30. Технология MPLS
31. Принципы действия системы сотовой связи GSM
32. Системы спутниковой связи
33. Требования к маршрутизаторам и протокол RSVP
34. Поколения волоконно-оптических сетей
35. Локальная сеть LAN
36. Городская сеть MAN
37. Региональная сеть WAN
38. Беспроводные сети
39. Магистраль и мультиплексирование
40. ATM переключатели

Экзамен предусматривает два теоретических вопроса.

Экзаменуемый студент должен подтвердить знание фундаментальных основ:

ATM-технология, ISDN, принципы передачи информации по оптоволокну, концепция персональной мобильной связи.

2.5. Оценочные критерии

При оценке знаний на экзамене учитывается:

правильность и осознанность изложения содержания ответа на вопросы, полнота раскрытия понятий и закономерностей, точность употребления и трактовки общенаучных и специальных терминов; степень сформированности интеллектуальных и научных способностей экзаменуемого; самостоятельность ответа; речевая грамотность и логическая последовательность ответа.

Оценка "отлично":

полно раскрыто содержание вопросов в объеме программы и рекомендованной литературы; четко и правильно даны определения и раскрыто содержание концептуальных понятий, закономерностей, корректно использованы научные термины; для доказательства использованы различные теоретические знания, выводы из наблюдений и опытов; ответ самостоятельный, исчерпывающий, без наводящих дополнительных вопросов, с опорой на знания, приобретенные в процессе специализации по выбранному направлению информатики.

Оценка "хорошо":

раскрыто основное содержание вопросов;
в основном правильно даны определения понятий и использованы научные термины;
ответ самостоятельный;
определения понятий неполные, допущены нарушения последовательности изложения, небольшие неточности при использовании научных терминов или в выводах и обобщениях, исправляемые по дополнительным вопросам экзаменаторов.

Оценка "удовлетворительно":

усвоено основное содержание учебного материала, но изложено фрагментарно, не всегда последовательно;
определение понятий недостаточно четкое;
не использованы в качестве доказательства выводы из наблюдений и опытов или допущены ошибки при их изложении;
допущены ошибки и неточности в использовании научной терминологии, определении понятий.

Оценка "неудовлетворительно":

ответ неправильный, не раскрыто основное содержание программного материала;
не даны ответы на вспомогательные вопросы экзаменаторов;
допущены грубые ошибки в определении понятий, при использовании терминологии.

3. Литература

3.1. Основная литература:

1. Олифер В.Г. и Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. Учебник. Питер, 1999 (2002), 672 с.
2. Халеби С. Принципы маршрутизации в Internet (2 изд.). Диал-ка, 2001, 448 с.
3. Шиндер Д. Основы компьютерных сетей. Диал-ка, 2002, 304с.
4. Олифер Н. Сетевые операционные системы. Учебник. Питер, 2001, 544 с.
5. Бройдо Вычислительные системы, сети и телекоммуникации., Питер, 2002, 688 с.

6. Зима В. Безопасность глобальных сетевых технологий (2 изд.) ВHV-СПб, 2003, 368 с.

3.2. Дополнительная литература:

1. Русев Д. Технологии беспроводного доступа. Справочник, ВHV-СПб, 2002, 352 с

2. Олифер В. Новые технологии и оборудование IP-сетей, ВHV-СПб, 2001, 512 с.

3. Березин С. Интернет у вас дома (2 изд.), ВHV-СПб, 2002, 752 с

Мак-Квери С. Передача голосовых данных по сетям Cisco Frame Relay, АТМ и IP, Диал-ка, 2002, 512 с

4. Бумфрей Ф. XML. Новые перспективы WWW ДМК, 2000, 688 с.

5. В.В.Кириллов, Г.Ю.Громов. Структурированный язык запросов (SQL). Учебное пособие

6. Информационный сервер Центра информационных технологий МГУ

<http://www.citforum.ru>

7. Информационный сервер ГНИИ ИТТ "Информика"

<http://www.mformika.ru/text/inftech>

4. Учебно – методическая (технологическая) карта дисциплины

| Номер недели | Номер темы | Вопросы, изучаемые на лекции | Занятия | | Используемые наглядные и методические пособия | Самостоятельная работа студентов | | Форма контроля |
|--------------|------------|------------------------------|--------------|--------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|------|----------------|
| | | | Практические | Лабораторные | | Содержание | Часы | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | |

Лабораторный практикум

Требования к выполнению лабораторных работ.

Реализуемые приложения должны точно соответствовать заданию и придерживаться указанным в нем требованиям. Среда для разработки программного кода не регламентируется, однако скомпилированные приложения должны работать в среде Windows и не требовать дополнительно установленных программ. Программы коллективов разработчиков должны взаимодействовать между собой, независимо от выбранной среды разработки.

Каждая выполненная и зачтенная лабораторная работа должна сопровождаться отчетом о проделанной работе, где разработчик описывает программный код и шаги при выполнении приложения. Оформление отчета должно соответствовать ГОСТу _____.

Лабораторная работа № 1

Задача.

Реализовать приложение на основе клиент - серверной технологии, позволяющее передавать и получать текстовую информацию.

Рекомендации к выполнению.

Приложение должно строго разделяться на клиентскую и серверную часть. Функциональные возможности клиента должны ограничиваться только отправкой и получением сообщений с сервером. Сервер должен получать сообщения от клиента и отправлять их либо прямо адресованному клиенту либо всем подключенным к серверу клиентам. Для удобства подключения клиент должен отображать IP-адрес компьютера, с которого производится отправка сообщений. Клиент и сервер работают с использованием TCP/IP протокола по порту 1019. Для реализации соединения клиента к серверу необходимо следовать алгоритму:

1. Создание socket'a.

Создание socket'a осуществляется следующим системным вызовом

```
#include <sys/socket.h> int socket (domain, type, protocol) int domain; int type; int protocol;
```

Аргумент domain задает используемый для взаимодействия набор протоколов (вид коммуникационной области), для стека протоколов TCP/IP он должен иметь символьное значение AF_INET (определено в sys/socket.h).

Аргумент type задает режим взаимодействия:

- SOCK_STREAM - с установлением соединения;
- SOCK_DGRAM - без установления соединения.

Аргумент protocol задает конкретный протокол транспортного уровня (из нескольких возможных в стеке протоколов). Если этот аргумент задан равным 0, то будет использован протокол "по умолчанию" (TCP для SOCK_STREAM и UDP для SOCK_DGRAM при использовании комплекта протоколов TCP/IP).

При удачном завершении своей работы данная функция возвращает дескриптор socket'a - целое неотрицательное число, однозначно его идентифицирующее. Дескриптор socket'a аналогичен дескриптору файла ОС UNIX.

При обнаружении ошибки в ходе своей работы функция возвращает число "-1".

1.2. Связывание socket'a

Для подключения socket'a к коммуникационной среде, образованной вычислительной сетью, необходимо выполнить системный вызов bind, определяющий в принятом для сети формате локальный адрес канала связи со средой. В сетях TCP/IP socket связывается с локальным портом. Системный вызов bind имеет следующий синтаксис:

```
#include <sys/types.h>
#include <sys/socket.h>
#include <netinet/in.h>
int bind (s, addr, addrlen)
int s;
```

```
struct sockaddr *addr;int addrlen;
```

Аргумент `s` задает дескриптор связываемого `socket`'а.

Аргумент `addr` в общем случае должен указывать на структуру данных, содержащую локальный адрес, приписываемый `socket`'у. Для сетей TCP/IP такой структурой является `sockaddr_in`.

Аргумент `addrlen` задает размер (в байтах) структуры данных, указываемой аргументом `addr`.

Структура `sockaddr_in` используется несколькими системными вызовами и функциями `socket`-интерфейса и определена в `include`-файле `in.h` следующим образом:

```
struct sockaddr_in {
    short sin_family;
    u_short sin_port;
    struct in_addr sin_addr;
    char sin_zero[8];
};
```

Поле `sin_family` определяет используемый формат адреса (набор протоколов), в нашем случае (для TCP/IP) оно должно иметь значение `AF_INET`.

Поле `sin_addr` содержит адрес (номер) узла сети.

Поле `sin_port` содержит номер порта на узле сети.

Поле `sin_zero` не используется.

Определение структуры `in_addr` (из того же `include`-файла) таково:

```
struct in_addr {
    union {
        u_long S_addr;
    } S_un;
#define s_addr S_un.S_addr
};
```

Структура `sockaddr_in` должна быть полностью заполнена перед выдачей системного вызова `bind`. При этом, если поле `sin_addr.s_addr` имеет зна-

чение `INADDR_ANY`, то системный вызов будет привязывать к `socket`'у номер (адрес) локального узла сети.

В случае успеха `bind` возвращает 0, в противном случае - "-1".

2. Функции установления связи

Для установления связи "клиент-сервер" используются системные вызовы `listen` и `accept` (на стороне сервера), а также `connect` (на стороне клиента). Для заполнения полей структуры `sockaddr_in`, используемой в вызове `connect`, обычно используется библиотечная функция `gethostbyname`, транслирующая символическое имя узла сети в его номер (адрес).

2.1. Ожидание установления связи

Системный вызов `listen` выражает желание выдавшей его программы-сервера ожидать запросы к ней от программ-клиентов и имеет следующий вид:

```
#include <sys/socket.h>
```

```
int listen (s, n)
```

```
int s;
```

```
int n;
```

Аргумент `s` задает дескриптор `socket`'а, через который программа будет ожидать запросы к ней от клиентов. `Socket` должен быть предварительно создан системным вызовом `socket` и обеспечен адресом с помощью системного вызова `bind`.

Аргумент `n` определяет максимальную длину очереди входящих запросов на установление связи. Если какой-либо клиент выдаст запрос на установление связи при полной очереди, то этот запрос будет отвергнут.

Признаком удачного завершения системного вызова `listen` служит нулевой код возврата.

2.2. Запрос на установление соединения

Для обращения программы-клиента к серверу с запросом на установление логической соединения используется системный вызов `connect`, имеющий следующий вид

```
#include <sys/types.h>
#include <sys/socket.h>
#include <netinet/in.h>
int connect (s, addr, addrlen)
int s;
struct sockaddr_in *addr;
int addrlen;
```

Аргумент `s` задает дескриптор `socket'a`, через который программа обращается к серверу с запросом на соединение. `Socket` должен быть предварительно создан системным вызовом `socket` и обеспечен адресом с помощью системного вызова `bind`.

Аргумент `addr` должен указывать на структуру данных, содержащую адрес, приписанный `socket'у` программы-сервера, к которой делается запрос на соединение. Для сетей TCP/IP такой структурой является `sockaddr_in`. Для формирования значений полей структуры `sockaddr_in` удобно использовать функцию `gethostbyname`.

Аргумент `addrlen` задает размер (в байтах) структуры данных, указываемой аргументом `addr`.

Для того, чтобы запрос на соединение был успешным, необходимо, по крайней мере, чтобы программа-сервер выполнила к этому моменту системный вызов `listen` для `socket'a` с указанным адресом.

При успешном выполнении запроса системный вызов `connect` возвращает 0, в противном случае - "-1" (устанавливая код причины неуспеха в глобальной переменной `errno`).

Примечание. Если к моменту выполнения `connect` используемый им `socket` не был привязан к адресу посредством `bind`, то такая привязка будет выполнена автоматически.

Примечание. В режиме взаимодействия без установления соединения необходимости в выполнении системного вызова `connect` нет. Однако, его выполнение в таком режиме не является ошибкой - просто меняется смысл

выполняемых при этом действий: устанавливается адрес "по умолчанию" для всех последующих посылок дейтаграмм.

2.3. Прием запроса на установление связи

Для приема запросов от программ-клиентов на установление связи в программах-серверах используется системный вызов ассерт, имеющий следующий вид:

```
#include <sys/socket.h>
#include <netinet/in.h>
int accept (s, addr, p_addrln)
int s;
struct sockaddr_in *addr;
int *p_addrln;
```

Аргумент `s` задает дескриптор `socket`'а, через который программа-сервер получила запрос на соединение (посредством системного запроса `listen`).

Аргумент `addr` должен указывать на область памяти, размер которой позволял бы разместить в ней структуру данных, содержащую адрес `socket`'а программы-клиента, сделавшей запрос на соединение. Никакой инициализации этой области не требуется.

Аргумент `p_addrln` должен указывать на область памяти в виде целого числа, задающего размер (в байтах) области памяти, указываемой аргументом `addr`.

Системный вызов ассерт извлекает из очереди, организованной системным вызовом `listen`, первый запрос на соединение и возвращает дескриптор нового (автоматически созданного) `socket`'а с теми же свойствами, что и `socket`, задаваемый аргументом `s`. Этот новый дескриптор необходимо использовать во всех последующих операциях обмена данными.

Кроме того после удачного завершения ассерт:

- область памяти, указываемая аргументом `addr`, будет содержать структуру данных (для сетей TCP/IP это `sockaddr_in`), описывающую адрес

socket'a программы-клиента, через который она сделала свой запрос на соединение;

- целое число, на которое указывает аргумент `p_addrlen`, будет равно размеру этой структуры данных.

Если очередь запросов на момент выполнения ассерт пуста, то программа переходит в состояние ожидания поступления запросов от клиентов на неопределенное время (хотя такое поведение ассерт можно и изменить).

Признаком неудачного завершения ассерт служит отрицательное возвращенное значение (дескриптор socket'a отрицательным быть не может).

Примечание. Системный вызов ассерт используется в программах-серверах, функционирующих только в режиме с установлением соединения.

2.4. Формирование адреса узла сети

Для получения адреса узла сети TCP/IP по его символическому имени используется библиотечная функция

```
#include <netinet/in.h>
#include <netdb.h>
struct hostent *gethostbyname (name)
char *name;
```

Аргумент `name` задает адрес последовательности литер, образующих символическое имя узла сети.

При успешном завершении функция возвращает указатель на структуру `hostent`, определенную в `include`-файле `netdb.h` и имеющую следующий вид

```
struct hostent { char *h_name; char **h_aliases; int h_addrtype; int
h_lenght; char *h_addr; };
```

Поле `h_name` указывает на официальное (основное) имя узла.

Поле `h_aliases` указывает на список дополнительных имен узла (синонимов), если они есть.

Поле `h_addrtype` содержит идентификатор используемого набора протоколов, для сетей TCP/IP это поле будет иметь значение `AF_INET`.

Поле `h_lenght` содержит длину адреса узла.

Поле `h_addr` указывает на область памяти, содержащую адрес узла в том виде, в котором его используют системные вызовы и функции `socket-интерфейса`.

Пример обращения к функции `gethostbyname` для получения адреса удаленного узла в программе-клиенте, использующей системный вызов `connect` для формирования запроса на установления соединения с программой-сервером на этом узле, рассматривается ниже.

3. Функции обмена данными

В режиме с установлением логического соединения после удачного выполнения пары взаимосвязанных системных вызовов `connect` (в клиенте) и `accept` (в сервере) становится возможным обмен данными.

Этот обмен может быть реализован обычными системными вызовами `read` и `write`, используемыми для работы с файлами (при этом вместо дескрипторов файлов в них задаются дескрипторы `socket'ов`).

Кроме того могут быть дополнительно использованы системные вызовы `send` и `recv`, ориентированные специально на работу с `socket'ами`.

Примечание. Для обмена данными в режиме без установления логического соединения используются, как правило, системные вызовы `sendto` и `recvfrom`. `Sendto` позволяет специфицировать вместе с передаваемыми данными (составляющими дейтаграмму) адрес их получателя. `Recvfrom` одновременно с доставкой данных получателю информирует его и об адресе отправителя.

3.1. Посылка данных

Для посылки данных партнеру по сетевому взаимодействию используется системный вызов `send`, имеющий следующий вид

```
#include <sys/types.h>
#include <sys/socket.h>
int send (s, buf, len, flags)
int s;
```

```
char *buf;  
int len;  
int flags;
```

Аргумент `s` задает дескриптор `socket'a`, через который посылаются данные.

Аргумент `buf` указывает на область памяти, содержащую передаваемые данные.

Аргумент `len` задает длину (в байтах) передаваемых данных.

Аргумент `flags` модифицирует исполнение системного вызова `send`. При нулевом значении этого аргумента вызов `send` полностью аналогичен системному вызову `write`.

При успешном завершении `send` возвращает количество переданных из области, указанной аргументом `buf`, байт данных. Если канал данных, определяемый дескриптором `s`, оказывается "переполненным", то `send` переводит программу в состояние ожидания до момента его освобождения.

3.2. Получение данных

Для получения данных от партнера по сетевому взаимодействию используется системный вызов `recv`, имеющий следующий вид

```
#include <sys/types.h>  
#include <sys/socket.h>  
int recv (s, buf, len, flags)  
int s;  
char *buf;  
int len;  
int flags;
```

Аргумент `s` задает дескриптор `socket'a`, через который принимаются данные.

Аргумент `buf` указывает на область памяти, предназначенную для размещения принимаемых данных.

Аргумент `len` задает длину (в байтах) этой области.

Аргумент `flags` модифицирует исполнение системного вызова `recv`. При нулевом значении этого аргумента вызов `recv` полностью аналогичен системному вызову `read`.

При успешном завершении `recv` возвращает количество принятых в область, указанную аргументом `buf`, байт данных. Если канал данных, определяемый дескриптором `s`, оказывается "пустым", то `recv` переводит программу в состояние ожидания до момента появления в нем данных.

4. Функции закрытия связи

Для закрытия связи с партнером по сетевому взаимодействию используются системные вызовы `close` и `shutdown`.

4.1. Системный вызов `close`

Для закрытия ранее созданного `socket`'а используется обычный системный вызов `close`, применяемый в ОС UNIX для закрытия ранее открытых файлов и имеющий следующий вид

```
int close (s)
```

```
int s;
```

Аргумент `s` задает дескриптор ранее созданного `socket`'а.

Однако в режиме с установлением логического соединения (обеспечивающем, как правило, надежную доставку данных) внутрисистемные механизмы обмена будут пытаться передать/принять данные, оставшиеся в канале передачи на момент закрытия `socket`'а. На это может потребоваться значительный интервал времени, неприемлемый для некоторых приложений. В такой ситуации необходимо использовать описываемый далее системный вызов `shutdown`.

Лабораторная работа № 2

Задача.

В существующем приложении реализовать возможность передачи файлов.

Рекомендации к выполнению.

Передача файла от клиента к клиенту должна происходить через сервер, при этом файл может быть передан как сообщение либо использовать протокол FTP. Клиент должен иметь возможность выбора файла и отправлять или получать подтверждение отправки/получения файла соответственно. Полученный файл сохранить в той же директории, откуда произведен запуск клиента.

Лабораторная работа № 3

Задача.

В существующем приложении реализовать модуль ведения статистики по отправленным и полученным сообщениям, файлам, пакетам и т.д.

Рекомендации к выполнению.

Статистика должна быть двух типов: накопленная, т.е. учитывать все время связи и текущая, т.е. учитывающая текущее подключение.

Лабораторная работа № 4

Задача.

В существующем приложении реализовать команду PING и синхронизировать время клиентской части приложения с серверной.

Рекомендации к выполнению.

Команда ping служит для принудительного вызова ответа конкретной машины. Для этого используется дейтаграмма ECHO_REQUEST протокола ICMP. Это протокол низкого уровня, который не требует наличия серверных процессов на зондируемой машине; это хороший способ убедиться в том, что питание машины включено и она не отказала. Успешный результат команда PING не обязательно означает, что выполняются какие-то сервисные программы высокого уровня.

Если команда ping используется для зондирования машины, о которой известно, что она включена и работает, это хорошее средство проверки правильности конфигурации сети. В выполнении команды ping участвуют система маршрутизации, схемы разрешения адресов и сетевые шлюзы, поэтому для достижения успешного результата сеть должна быть в более или менее рабочем состоянии. Если команда ping не работает, Вы можете быть уверены в том, что более сложные средства тем более не функционируют.

Для практической реализации можно пойти 2-мя путями. Первый из них - использование низкоуровневых функций API (к примеру встроенные в библиотеку ICMP.DLL). Второй - использование высокоуровневых компонентов (к примеру Indy IdICMPClient). У первого и у второго способа есть свои позитивные и негативные моменты. Так при использовании функций API откомпилированный код будет гораздо меньших размеров нежели при использовании высокоуровневых компонентов и производительность его будет больше (например при одновременном пинге одной подсети с использованием потоков). С другой стороны компоненты можно использовать имея только отдаленное представление о работе с протоколом ICMP, а также об использовании Windows API. Но в то же время компоненты порождают неоправданно большой исполняемый код и производительность их на порядок меньше.

Лабораторная работа № 5

Задача.

В существующем приложении реализовать многопользовательский интерфейс с профилем пользователя, в котором будут храниться настройки, статистика и история работы.

Рекомендации к выполнению.

При попытке установить соединение с сервером должен выводиться запрос с указанием имени пользователя. После выбора пользователя клиент

соединяется с сервером и запрашивает данные из профиля пользователя. Восстанавливает настройки пользователя и делает возможным просмотреть статистику по данному пользователю и историю его работы с данным сервером. История может быть представлена в виде log файла.

Лабораторная работа № 6

Задача.

В существующем приложении реализовать возможность авторизованного подключения к удаленной базе данных и выполнить основные инструкции SQL Select, Insert, Delete, Update.

Рекомендации к выполнению.

В самом примитивном случаи можно представить базу данных в виде одного файла формата db, dbf, mdb и т.д. Подключение к серверу должно быть установлено при соответствии имени пользователя и пароля, хранящихся в виде списка на сервере. Пароль может быть не зашифрован. В случаи удачного соединения к пользователю применяется политика учетных записей, иначе говоря в работу должен быть включен модуль разграничения прав. Учетные записи условно разделим на Администратора (имеет все права, вплоть до изменения пароля пользователя), Пользователя (может просматривать данные, но не изменять) и Модератора (может просматривать данные и изменять). База данных хранится на сервере.

Формат использования инструкций:

```
SELECT [DISTINCT] имя_столбца [as новое_имя], имя_столбца2 [as
новое_имя2], ... FROM таблица1 | имя_курсора1, таблица2 | имя_курсора2, ...
[WHERE условие] [GROUP BY имя_столбца1, имя_столбца2, ...] [HAVING
условие] [ORDER BY имя_столбца1 [DESC], имя_столбца2 [DESC2], ...]
```

```
INSERT int имя_таблицы [ имя_столбца1 [, имя_столбца2] ...] VALUES
( значение1 [, значение2] ...)
```

DELETE FROM имя_таблицы WHERE условие

UPDATE имя_таблицы

SET имя_столбца1=значение1, имя_столбца2=значение2, ...

WHERE условие

Лабораторная работа № 7

Задача.

В клиентской части существующего приложения реализовать графический модуль, в котором будут отображаться управляемые пользователями графические объекты.

Рекомендации к выполнению.

Графические объекты должны управляться с клавиатуры и иметь строго фиксированный размер 40x40 пикселей любой формы. Объект может перемещаться только вверх, вниз, вправо и влево с шагом в 40 пикселей. Объекты не должны выходить за границы графической области и в случае выхода за границы появляться с другой стороны. Размеры графической области 400x400 пикселей. Объекты не должны накладываться друг на друга. Клиент генерирует команду движения и передает её серверу. Сервер обрабатывает координаты объекта и пересылает их всем активным клиентам, для отображения.

1. Обзор развития сетевых технологий

Три важнейшие информационные революции прошлого, которые привели человечество к современной цивилизации, относились к формированию языка, письменности и книгопечатания. Четвертая относится к созданию средств связи. От древнейших форм связи при посредстве гонцов и условных сигналов с использованием костров и других подручных средств люди постепенно пришли к системе регулярной пересылки почтовых отправок. Почта сыграла важную роль в развитии производства и торговли, а совершенствование транспорта способствовало увеличению скорости доставки почтовых отправок. Этот вид связи не потерял своего значения и до наших дней, однако многие сферы человеческой деятельности требовали более оперативных и надежных средств. Например, в финансовой сфере основатель известной европейской династии банкиров М.А. Ротшильд (1743-1812) пользовался для связи со своими представителями в пяти европейских столицах почтовыми голубями. Тогда же, в конце XVIII столетия появился оптический телеграф, работавший по принципу ретрансляции сообщений, передававшихся сигнальщиками с помощью флажков. Сигнальщики работали на специально построенных башнях, и сети таких башен были созданы в ряде европейских стран. В первой половине XIX столетия оптический телеграф стал важным средством оперативной связи. В 1825 г. в Париже состоялась первая международная конференция по телеграфной связи, где обсуждались задачи международного сотрудничества и стандартизации в этой области. Впоследствии такие конференции проводились регулярно, причем их роль резко выросла с появлением электрической связи. В 1865 году был учрежден Международный телеграфный союз. Эта организация, которая с 1932 года называется Международным Союзом Связи (МСС, или по-английски, ИТУ – International Telecommunication Union) является одной из старейших международных организаций. С 1947 года это специализированное учреждение Организации Объединенных Наций, членами которого являются более 180 государств. С 1965 по 1993 гг. стандартизацией проводной связи занимался постоянный орган МСС – Международный Консультативный Комитет по телеграфии и телефонии (МККТТ, международное сокращенное обозначение – ССИТТ). Рекомендации МККТТ публиковались каждые четыре года в виде многотомных сборников, различавшихся по цвету обложек (например, Оранжевая книга 1976 г., Желтая книга 1984 г., Синяя книга 1988 г. и т.д.). Каждая рекомендация имеет буквенный индекс, обозначающий профиль рекомендации, и порядковый номер. Например, в этой книге встречаются ссылки на рекомендации МККТТ G.711, H.263, V.32, X.25, и многие другие. С 1993 г. после реорганизации МСС вместо МККТТ был создан Комитет по стандартизации связи (английское сокращенное название ИТУ-Т), который вместо выпуска периодических сборников публикует рекомендации по мере их утверждения.

Кроме МСС, в области стандартизации передачи данных работают еще такие международные организации, как Международная Организация по Стандартизации (МОС, английское сокращение ISO) и Международная Электротехническая Комиссия (МЭК или, по-английски, IEC). Активную работу по стандартизации ведут также Европейский институт стандартизации связи ETSI, Американский Институт инженеров электротехники и радиоэлектроники IEEE, Американский национальный институт стандартов ANSI и некоторые другие международные и национальные организации. Сведения о некоторых результатах их работы приводятся в этой книге.

1.1. Зарождение и развитие документальной связи

Коренной поворот в развитии средств документальной связи произошел в результате открытий в области электричества и создания электрического телеграфа. В 1830-х гг. различные системы электрического телеграфа были предложены во многих странах. Наиболее удачной из них оказалась система, созданная в США в 1837 г. С. Морзе (1791-1872), которая отличается особой простотой. Морзе разработал неравномерный код, в котором каждая буква кодируется комбинацией точек и тире. При этом длина каждой кодовой комбинации определялась статистикой английского языка, т.е. часто встречающиеся буквы кодируются более короткими комбинациями. Азбука Морзе получила очень широкое распространение и даже до сих пор еще кое-где применяется для радиотелеграфной связи. Первая линия электрического телеграфа была построена Морзе между Вашингтоном и Балтимором лишь в 1844 г., так как не сразу были найдены необходимые для строительства линии средства (30 тысяч долларов, по тем временам огромная сумма). В 1874 г. французский инженер Э. Бодо (1845-1903) изобрел многократный буквопечатающий телеграфный аппарат с равномерным пятизначным кодом. Эта система получила распространение во всем мире и широко применялась до середины XX столетия (например, в годы Великой Отечественной войны телеграф Бодо применялся для связи ставки со штабами фронтов). Главной неудобство как системы Морзе, так и системы Бодо состояло в необходимости специальной подготовки кадров телеграфистов, натренированных на работу с ключом Морзе или с пятиразрядной клавиатурой Бодо. К тому же последняя система требовала синхронной работы в такт с акустическими сигналами, подававшимися в аппаратных залах. Более предпочтительными явились телеграфные аппараты с клавиатурой типа пишущей машинки, получившие название телетайпов.

С учетом опыта эксплуатации кода Бодо, в первых телетайпах применялся пятиэлементный международный телеграфный код № 2. Поскольку с помощью пятизначного двоичного кода можно закодировать лишь 32 знака письменности, для расширения алфавита были использованы три регистра. В результате код допускал возможность работы в режимах передачи русских букв, латинских букв или цифр. Переключение регистров осуществлялось с помощью кодовых комбинаций 00000 (переход на русский), 11111 (переход на латинский) и 11011 (переход на цифры). Кроме того, предусматривались управляющие кодовые комбинации 00010 (возврат каретки), 00100 (пробел) и 01000 (перевод строки). Таким образом, для кодирования знаков оставались 26 комбинаций, что достаточно для латинского, но недостаточно для русского алфавита, требующего, по меньшей мере, 30 комбинаций. Поэтому четыре русские буквы (Ш, Щ, Э и Ю) были помещены в регистр цифр. Ввиду неудобства традиционного пятиэлементного кода, особенно в связи с требованиями автоматической работы, позднее был принят семиэлементный международный телеграфный код № 5 (рекомендация МККТТ V.3) Ниже приводится также расшифровка служебных символов, расположенных, главным образом, в столбцах 0 и 1.

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| NUL | - Пусто |
| ТС | - Десять символов управления передачей, которые расшифрованы ниже |
| ТС ₁ (SOH) | - Начало заголовка |
| ТС ₂ (STX) | - Начало текста |
| ТС ₃ (ETX) | - Конец текста |
| ТС ₄ (EOT) | - Конец передачи |
| ТС ₅ (ENQ) | - Запрос (Кто там?) |
| ТС ₆ (ACK) | - Подтверждение |
| BEL | - Звонок |
| FE | - Шесть символов управления форматом |
| FE ₀ (BS) | - Возврат на шаг |
| FE ₁ (HT) | - Горизонтальная табуляция |
| FE ₂ (LF) | - Перевод строки |
| FE ₃ (VT) | - Вертикальная табуляция |
| FE ₄ (FF) | - Перевод формата |
| FE ₅ (CR) | - Возврат каретки |
| S0 | - 2-й регистр (выход из кода) |
| S1 | - 1-й регистр (вход в код) |
| ТС ₇ (DLE) | - Авторегистр - 1 |
| DC ₁ , DC ₂ , DC ₃ , DC ₄ | - Четыре символа управления устройствами |
| ТС ₈ (NAC) | - Отрицание |
| ТС ₉ (SYN) | - Синхронизация |
| ТС ₁₀ (ETB) | - Конец блока |
| CAN | - Аннулирование |
| EM | - Конец носителя |
| SUB | - Замена |
| ESC | - Авторегистр-2 |
| IS | - Четыре символа разделения информации |
| IS ₄ (FS) | - Разделитель файлов (массивов) |
| IS ₃ (GS) | - Разделитель групп |
| IS ₂ (RS) | - Разделитель записей |
| IS ₁ (US) | - Разделитель блоков |
| SP | - Пробел |
| DEL | - Забой |

В нашей стране этот код допускает переключение на русские буквы при помощи кодовой комбинации 0001110, а на латинские – при помощи комбинации 0001111. Отметим также, что порядок следования латинских букв здесь удовлетворяет требованиям автоматической обработки текстов, так как двоичные числа, применяемые для кодирования букв, растут с порядковым номером буквы в алфавите. Расположение же русских букв этому требованию не удовлетворяет. Оно соответствует расположению латинских клавиш на телетайпе, которое не соответствует расположению клавиш на русской пишущей машинке. Впоследствии при создании русской клавиатуры для ЭВМ, от такого расположения пришлось отказаться и перейти к клавиатуре русской пишущей машинки, но процесс перехода теперь оказался более трудным и сопровождался неоднократным пересмотром стандартов на коды.

Для обнаружения ошибок передачи путем проверки на четность в коде № 5 при телеграфной связи используется восьмой проверочный элемент, приводящий к получению четной суммы. Однако возможности обнаружения ошибки при проверке на четность довольно ограничены, так как ошибки типа двух лишних импульсов (единиц), двух пропусков или одного лишнего импульса и одного пропуска остаются необнаруженными.

При разработке кодов для обмена информацией между ЭВМ специалистами по вычислительной технике компании IBM (США) был предложен так называемый Расширенный десятичный код обмена, образуемый двоичным кодированием EBSDIC (Extended Binary Coded Decimal Interchange Code). Этот код был создан с учетом специфики вычислительной техники. Большинство терминалов, работающих кодом EBSDIC, могут выполнять функции запира и отпира клавиатуры, благодаря которым клавиатура может временно запирается при чрезмерном потоке данных. С другой стороны, связистами был предложен код, известный под названием ASCII (American Standard Code for Information Interchange, т.е. Американский стандартный код для обмена информацией). В терминале, работающем кодом ASCII, при чрезмерном потоке данных оператору подается тревожный сигнал. Поскольку в нашей стране широко применяется *код ASCII*, остановимся на нём подробнее. Именно этот набор кодовых комбинаций был рекомендован Международной Организацией по Стандартизации в качестве семиэлементного кода для обмена при обработке информации. Впоследствии этот код был принят в качестве общеобязательной половины таблицы восьмизначного кода, тогда как вторая половина была предоставлена для кодирования национальных алфавитов и знаков.

1.2. Телефонная связь и важнейшие этапы развития сетей общего пользования

Резкое изменение ориентиров в развитии средств связи произошло после изобретения телефона в 1876 г. А.Г. Беллом (1847-1922). Уже в течение первого десятилетия существования телефона появились телефонные сети во многих городах мира (с коммутаторами ручного обслуживания), а также были изобретены *автоматические телефонные станции (АТС)*. Про изобретателя АТС американские авторы описывают романтическую историю. Первую АТС декадно-шаговой системы изобрел гробовщик из г. Канзас-Сити (США) А. Струоджер. Когда его ритуальный бизнес неожиданно пошел на убыль, он узнал, что телефонистка на местной телефонной станции преднамеренно соединяет его клиентов с конкурентом, своим женихом. В стремлении восстановить справедливость Струоджер забросил похоронное дело, занялся электромеханикой, разработал и запатентовал устройство декадно-шаговой АТС и организовал производство коммутационной аппаратуры. Впоследствии другой выдающийся американец основатель кибернетики Н. Винер (1884-1964) скажет, что АТС были изобретены потому, что старая система ручного переключения грозила поглотить всех девушек, кончающих среднюю школу.

Декадно-шаговая система коммутации основана на применении электромагнитного прибора – *иска-теля*, в котором при срабатывании электромагнита перемещаются щетки по десятирядному контактному полю на один шаг. Электромагнит же срабатывает от импульса, возникающего в цепи постоянного тока при её кратковременном разрыве. Пользуясь номеронабирателем, в котором осуществляется серия разрывов электрической цепи в зависимости от набранной цифры (цифре 0 соответствуют 10 разрывов), абонент телефонной линии сам управляет процессом установления своего соединения. В последующие годы в разных странах было создано много остроумных конструкций электромеханических АТС, некоторые из которых также нашли широкое применение, но декадно-шаговая система оказалась наиболее популярной во всем мире, и в некоторых местах, куда еще не дошла электроника, успешно работает до наших дней.

Таким образом, первый этап развития телефонной связи характеризуется созданием телефонных станций. На этом этапе были поставлены и решены на уровне местных станций, прежде всего, две главные задачи: задача автоматического установления разговорных соединений между телефонными линиями по принципу коммутации цепей и задача передачи сигналов управления, которая получила закрепившееся до наших дней название *сигнализации*. Большинство задач сигнализации на уровне местной (оконечной) станции решались с помощью цепей постоянного тока, которые отделялись от разговорных цепей переменных токов с помощью конденсаторов и дросселей (катушек реле). Второй этап развития телефонной связи характеризуется решением задачи создания сетей. В конечном итоге этот этап привел к созданию всемирной сети телефонной связи, которая позволила связать абонентов практически в любых точках Земного шара, однако путь к этому триумфу цивилизации был не прост и потребовал огромных усилий. Для решения такой грандиозной задачи было необходимо провести большое количество научных исследований и технических разработок. Не вдаваясь в подробности, отметим лишь принципиально важные моменты. Прежде всего, необходимость создания больших пучков каналов между телефонными станциями привела к идее многоканальной связи, т.е. к организации передачи по одной проводной линии большого числа телефонных каналов.

Многоканальная связь. На уровне развития техники начала XX столетия наиболее целесообразным было применение частотного разделения каналов. В связи с этим было проведено исследование свойств речевого сигнала и признано достаточным ограничение спектра частот разговорного сигнала для коммерческой телефонной связи общего пользования в пределах 300 - 3400 Гц. Эти цифры были зафиксированы в рекомендациях МККТТ и приняты за основу при разработке аппаратуры многоканальной связи. На практике нашли широкое применение системы многоканальной связи, позволяющие организовать 3 и 12 телефонных каналов по воздушной линии связи (т.е. по проводам, подвешенным на столбах), 12 и 60 каналов по парам симметричного кабеля, 300, 1920 и более каналов по коаксиальным кабелям. Формирование групп каналов в аппаратуре с частотным разделением каналов осуществлялось путем переноса частотных полос на нужные участки диапазона с помощью амплитудной модуляции и аналоговых частотных фильтров. Напри-

мер, первичная группа содержит 12 телефонных каналов, каждый из которых переносится в определенное место спектра этой группы. Затем такие первичные группы могут использоваться для формирования вторичных групп (а те, в свою очередь, третичных, и т.д.), и поэтому они, как и отдельный канал, должны быть стандартизированы по занимаемой полосе частот. Так формируется *иерархия систем аналоговой многоканальной передачи*. Как уже упоминалось, для первичной группы определена полоса частот 60-108 КГц. В ней на каждый частотный канал отводится с учетом защитных полос между соседними каналами по 4 КГц. В соответствии с этим несущие частоты для переноса отдельных телефонных каналов в указанный спектр выбираются равными $108, 104, \dots, 64$ КГц [т.е. $108 - 4(i - 1)$, где i – порядковый номер канала], и из каждого амплитудно-модулированного сигнала отфильтровывается нижняя боковая полоса. Ввиду того, что в аппаратуре многоканальной связи, работающей на значительные расстояния, сигналы нужно многократно усиливать, телефонные каналы дальней связи приходится делать четырехпроводными, а на междугородных телефонных станциях применять четырехпроводную коммутацию.

С решением задач организации каналов многоканальной телефонной связи неразрывно связано решение задач сигнализации, так как сигналы управления, передаваемые в местных сетях по цепям постоянного тока, теперь нужно распространять по частотным каналам. Для этого сначала были разработаны системы сигнализации, в которых управляющие сигналы передавались с помощью фиксированных частот. Различают системы *внутриполосной* и *внеполосной* сигнализации, в названиях которых под полосой понимают спектр передаваемых частот разговорного канала. При внутриполосной сигнализации применяются специальные обнаружители, которые не просто реагируют на выбранные частоты, но во избежание ложных срабатываний от речевых сигналов одновременно проверяют отсутствие в сигнале других частот. При внеполосной сигнализации фактически формируется специальный канал, однако он, как и в случае внутриполосной сигнализации, жестко привязан к своему разговорному каналу.

Телефонные сети и развитие услуг. С использованием описанных принципов к середине XX столетия были созданы мощные сети телефонной связи во многих странах мира. Эти сети строились по иерархическому принципу, в соответствии с которым оконечные станции соединяются с городскими узлами, а затем через них с зонавыми и междугородными станциями. Были созданы также станции международного сообщения и проложены трансокеанские телефонные кабели. В результате национальные сети соединились в единую глобальную сеть телефонной связи, в которую были включены сотни миллионов абонентов. Таким образом, телефонные сети стали универсальной средой электросвязи, и уже в эпоху аналоговой техники начали предприниматься шаги, направленные на расширение услуг связи, которые могут предоставляться телефонными сетями. Важным толчком на пути к существенному расширению возможностей телефонной связи послужило усовершенствование телефонной сигнализации. Придуманное Струуджером прямое управление процессами установления соединения от номеронабирателя неэффективно, прежде всего, потому, что абонент может допускать большие паузы между набираемыми цифрами и занимать тем самым непродуктивно канал связи (особенно, если он уже вошел с набираемым номером в другой город). Поэтому вместо прямого управления были созданы системы косвенного, или регистрового, управления, при котором процесс установления соединения начинается лишь после того, как весь набранный номер уже зафиксирован на местной станции в специально предназначенном для этого приборе – регистре. Однако и косвенное управление с воспроизведением импульсов постоянного тока (или, как говорят, батарейных импульсов), по современным меркам, действует слишком медленно, особенно когда нужно передать более десятка цифр при международной связи. Более быстродействующий метод набора связан с созданием кнопочного номеронабирателя, или *тастатуры*.

Существует две конструкции кнопочного номеронабирателя, в котором при передаче сигналов набора номера нажатие каждой кнопки соответствует не число кратковременных прерываний удерживающей цепи постоянного тока, а посылка пары частот продолжительностью 40 мс. При такой же длительности паузы между посылками скорость передачи составляет около 12 цифр в секунду. Создание такой довольно сложной конструкции номеронабирателя стало возможным лишь в эпоху микроэлектроники. Гораздо чаще, встречаются 12-кнопочные номеронабиратели, на которых отсутствуют правые четыре кнопки. Кроме 10 кнопок с цифрами, здесь предусматриваются еще две дополнительные кнопки («звездочка» и «решетка»), на которые могут быть возложены функции управления. На цифровые кнопки таких номеронабирателей за рубежом часто, кроме цифр, наносятся еще и латинские буквы (по 2 – 3 буквы на кнопку, чтобы можно было разместить весь алфавит). Если теперь с помощью одной вспомогательной кнопки осуществлять переключение режима передачи с цифр на буквы и обратно, а с помощью другой вспомогательной кнопки фиксировать окончание передачи каждой буквы, то с помощью одно-, двух- или трехкратного нажатия цифровой кнопки можно передать нужную букву алфавита. Такая система передачи буквенной информации за рубежом получила широкое распространение не только при пользовании интерактивными услугами, предоставляемыми телефонными сетями, но и в самих абонентских устройствах (телефаксах, автоответчиках, телефонных аппаратах с дополнительными услугами) для их программирования.

История развития телефонных сетей в докомпьютерную эпоху обогатила технику рядом выдающихся открытий и изобретений, многие из которых повторяются в новой или видоизмененной форме и в наши дни (новое – это хорошо забытое старое!). Поэтому остановимся на этом периоде развития сетей, отметив важнейшие его этапы. Как уже говорилось, любая сеть связи состоит из *линий связи, узлов коммутации и абонентских устройств*; последние часто называют *оконечными устройствами, или тер-*

миналами. Докомпьютерный период характеризуется узкой специализацией абонентских устройств, каждое из которых предназначалось лишь для конкретной услуги связи. Соответственно и сети специализировались по услугам. Например, хорошо известны телеграфная и телефонная сети, которые в докомпьютерную эпоху получили широкое распространение. Они охватили все страны и континенты и позволили связываться людям, удаленным на очень большие расстояния друг от друга. Можно упомянуть еще сети проводного вещания, а также самые разнообразные сети связи и управления местного значения. В конце докомпьютерной эпохи начали развиваться также сети кабельного телевидения. Все перечисленные сети были рассчитаны на специализированные оконечные устройства, ориентированные на конкретную услугу.

Линии связи. Другая важная составляющая сетей – линии связи. Их развитие началось с подвески голых (т.е. неизолированных) металлических проводов, которые крепились на опорах с применением фарфоровых изоляторов. Затем наступила эпоха кабелей электрической связи, и был создан большой ассортимент кабельных изделий, которые постоянно совершенствуются и находят самое широкое применение в современных сетях связи. Первыми появились телеграфные кабели, в которых сигналы передавались по однопроводной системе, так как вторым проводом служила земля. С изобретением телефона в 1876 г. началось производство симметричных кабелей для городских телефонных сетей. В отличие от телеграфных кабелей, в них применялись двухпроводные скрученные цепи (**парная скрутка**). Благодаря скрутке жилы кабеля ставятся в одинаковые условия по отношению друг к другу. При этом ослабляются электромагнитные связи между цепями, и повышается защищенность цепей от взаимных и внешних помех. Кроме того, скрутка облегчает взаимное перемещение жил при изгибах кабеля и обеспечивает ему более устойчивую круглую форму. На местных сетях связи широко применяются кабели с бумажной изоляцией и парной скруткой медных жил, диаметр которых выбирается в пределах 0,3 – 0,64 мм. Коэффициент затухания таких пар, измеряемый на частоте 800 Гц, составляет 1-2 дБ/км. С увеличением частоты сигнала его затухание растет. Поэтому полоса частот, пропускаемая кабелями местной связи, сравнительно небольшая. Кабели для городской телефонной связи могут содержать 10, 50, 100, 300, 600, 1200 и более пар.

Для зонной или междугородной связи применяются кабели с диаметром жил 0,8 - 1,2 мм и четверочной, или звездной, скруткой. Примерами таких кабелей могут служить широко применяемые кабели с одной, четырьмя или семью четверками жил. Они предназначены для передачи сигналов многоканальной аппаратуры телефонной связи в диапазоне до 252 КГц. Таким образом, увеличение диаметра жилы и более совершенная конструкция кабеля позволяют увеличить полосу передаваемых частот. Подобные кабели характеризуются затуханием около 2 дБ/км уже при частоте 150 КГц. Более широкую полосу частот передают **коаксиальные** кабели, в которых, в отличие от упомянутых только что **симметричных** кабелей, пара проводов располагается соосно. В них центральная медная жила находится внутри изолированной от неё трубки. Последняя же выполняется в виде оплетки из тонких медных проводников, которая наносится поверх пластмассы, служащей изоляцией центральной жилы. Важными характеристиками коаксиальной пары являются два числа: диаметр центральной жилы и диаметр оплетки. Наиболее широко применяются кабели среднего (2,6/9,4 мм) и малогабаритного (1,2/4,6 мм) типов. Получили распространение также микрокоаксиальные кабели (0,7/2,9 мм). Конструкции коаксиальных кабелей могут содержать коаксиальные пары одного или разных типов. Затухание сигналов в коаксиальных кабелях существенно ниже, чем в симметричных кабелях. Например, затухание коаксиальной пары 2,6/9,4 мм составляет 2,48 дБ/км уже на частоте 1 МГц. В зависимости от назначения кабели связи могут быть комбинированными и содержать одновременно как коаксиальные, так и симметричные пары. В настоящее время в условиях резкого увеличения скоростей передачи все большее распространение получают **волоконно-оптические линии связи**, которые имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с кабелями, содержащими медные жилы. Среди преимуществ волоконно-оптических кабелей – небольшие размеры и вес, очень широкая полоса передаваемых частот, небольшое затухание сигнала, высокая надежность и срок службы, доступность и невысокая стоимость сырья для производства таких кабелей, практическое отсутствие переходных помех между волокнами в кабеле. Однако пока волоконно-оптические линии связи используются только в качестве сверхбыстродействующих средств передачи сигналов преимущественно на магистральных направлениях. Сеть же в целом остаётся электронной. Поэтому к волоконно-оптической связи мы вернемся в гл.6, а пока завершим рассмотрение традиционных сетей.

Характеристики кабелей, применяемых на местных телефонных сетях, представляют особый интерес потому, что из всех сетей, существующих в мире, телефонная сеть является наиболее разветвленной. Она дает возможность получить доступ к миллиарду абонентов, разбросанных по всему миру. Поэтому естественен интерес поставщиков разнообразных услуг связи к телефонной сети как наиболее массовому и удобному средству доступа к пользователям. Проблема такого доступа получила в зарубежной литературе название **проблемы последней мили**. В связи с этим важно обратить внимание на различия, существующие в принципах организации местных телефонных сетей в разных странах. Например, в нашей стране до самого недавнего времени единственным способом телефонизации вновь сдаваемых в эксплуатацию домов был ввод в подъезд дома чаще всего 10-парного телефонного кабеля, который разделялся

в распределительной коробке, установленной на лестничной площадке. Когда же доходила очередь до установки телефона в конкретной квартире, в эту квартиру прокладывался плоский двухжильный полихлорвиниловый телефонный распределительный кабель, похожий на лапшу. Совсем иначе дело обстояло, например, в США, где телефонизация дома, как и электрификация, полностью завершается до сдачи дома в эксплуатацию. Там в квартирах, как и в учреждениях, телефонная проводка и необходимые розетки устанавливаются заблаговременно и с некоторым запасом, как и электрические розетки. При этом учитывается возможность установки в квартире нескольких телефонов. Поэтому там стандартный телефонный распределительный кабель может иметь одну, две или четыре пары, причем в этом кабеле также применяется скрутка. В свете сказанного привлекательность идеи локальной вычислительной сети (ЛВС) типа Ethernet в США состояла в том, что её сооружение обычно не требовало никакой прокладки кабелей. ЭВМ нужно было просто включать в резервные телефонные розетки и выполнить необходимые соединения в телефонной распределительной коробке. По мере накопления опыта работы таких ЛВС, в США занимались усовершенствованием конструкций распределительных кабелей. Например, был налажен выпуск кабелей с уменьшенным шагом скрутки жил для улучшения частотных характеристик. Кроме того, было замечено, что работе ЛВС со скоростью передачи 10 Мбит/с мешают любительские радиостанции. В связи с этим в номенклатуру телефонных распределительных кабелей были включены также экранированные кабели. При этом стали учитывать не только требования телефонной связи, но и перспективы применения абонентских телефонных линий в качестве средства доступа к более широкому набору информационных услуг. Эта работа в США завершилась принятием национального стандарта на распределительные кабели, в котором были описаны восемь категорий таких кабелей. Позднее этот стандарт был принят и на международном уровне (МОС/МЭК - 11801). В настоящее время кабели по этому стандарту выпускаются и в нашей стране (их часто называют кабелями для ЛВС, или LAN-кабелями). По поводу изложенного важно заметить, что в зарубежной литературе часто можно найти обсуждения предпочтительности тех или иных типов кабелей для ЛВС, причем такие обсуждения предполагают не прокладку кабелей, а выбор типа розетки для подключения компьютеров. Интерпретация подобных обсуждений как выбор кабеля для прокладки может привести к серьезным недоразумениям.

Узлы коммутации. Третья важная составная часть сетей связи – узлы коммутации. Узлы не только определяют специфику работы сети, но и принципы её построения. Решающую роль в истории развития телефонных сетей играло соотношение стоимостей линейных сооружений и узлов коммутации. На первом этапе развития телефонных сетей основные затраты приходились на линейные сооружения, тогда как в узлах применялись сравнительно простые и недорогие телефонные станции ручного обслуживания. С развитием же автоматизации телефонных сообщений узлы коммутации становились все дороже. Относительная же стоимость линейных сооружений неуклонно снижалась. Это не означает уменьшения стоимости самих линий связи. Но развитие средств многоканальной связи ведет к снижению стоимости отдельного канала. Здесь особенно важными были этапы перехода от аппаратуры многоканальной связи с электронными лампами к аппаратуре на полупроводниках, а также расширение полосы частот передачи за счет усовершенствования кабельной техники. Этот процесс продолжается и в наше время. Так, фантастически высокая пропускная способность волоконно-оптических линий связи ведет к дальнейшему снижению стоимости отдельного канала, хотя сами волоконно-оптические линии и дороже традиционных кабельных линий с металлическими проводами. По описанным причинам традиционные телефонные сети строились по *иерархической* схеме, которая обычно охватывала пять уровней телефонных станций (*оконечные, узловые, зонавые, междугородные и международные*). В принципе, подобная иерархия применяется и на ведомственных сетях, например на железнодорожном транспорте. Процесс управления установлением соединений в таких сетях основан на применении прямых и обходных путей в узлах каждого уровня иерархии. Современные же сети строятся по так называемой *неиерархической схеме*, которая предусматривает лишь наличие магистральной сети и сетей доступа и направлена на сокращение числа узлов за счет увеличения пучков каналов.

Переход телефонных сетей на цифровую технику. История развития сетевых технологий в компьютерную эпоху началась фактически независимо от вычислительной техники с перевода систем передачи на цифровую технику импульсно-кодовой модуляции (ИКМ). В отличие от аналоговых систем многоканальной передачи, которые строятся по принципу *частотного разделения каналов*, цифровые системы многоканальной передачи с ИКМ строятся по принципу *временного разделения каналов*. Это значит, что, например, за 125 мкс, отводимых для передачи одного отсчета телефонного сигнала, с помощью более коротких импульсов передаются отсчеты не одного, а целой группы каналов. Например, для одного отсчета сигнала за 125 мкс обычно требуется передать восемь двоичных разрядов. Для каждого такого разряда, передаваемого отдельным импульсом, с учетом разделительного интервала потребуется $125:8 \cong 15$ мкс. Если же за 125 мкс передавать отсчеты не одного, а 32 каналов, то на каждый канальный интервал придется $125:32 = 3,9$ мкс. Время же, отводимое для передачи одного разряда, в этом случае составит лишь $3,9 \text{ мкс} : 8 = 488$ нс. Чем короче импульсы, которые могут быть реализованы современной техникой, тем больше каналов может быть организовано путем разделения во времени.

. Первый этап перехода сетей связи на цифровую технику состоял в **интеграции средств передачи и коммутации**. При старой аналоговой технике связи все телефонные каналы дальней связи (формируемые с помощью аппаратуры многоканальной связи с частотным уплотнением) на входе каждого узла коммутации приходилось разделять, а сигналы демодулировать. Это требовалось для того, чтобы в узле выполнить необходимую коммутацию каналов низких (т.е. разговорных) частот. После коммутации на выходе узла сигналы вновь модулировались для дальнейшей передачи, а каналы одного направления вновь объединялись в аппаратуре многоканальной связи. Не говоря об огромной сложности аппаратной реализации подобных систем, они еще и накапливали помехи при многократном повторении процессов модуляции и демодуляции. Поэтому **импульсно-кодовая модуляция (ИКМ), которая является более устойчивой к помехам и одновременно решает задачу объединения средств передачи и коммутации**, позволила решить важнейшую задачу, возникшую на пути прогресса техники связи. Сети с применением такой техники стали называться **интегральными цифровыми сетями связи** (ИЦСС, или по-английски, IDN – Integrated Digital Networks). Развитие таких сетей началось с городских телефонных сетей, где линии, уплотненные цифровыми каналами с помощью аппаратуры ИКМ, получили широкое распространение для соединения телефонных станций между собой (они так и называются: **соединительные линии**). На следующем этапе аппаратура ИКМ начала применяться на междугородных линиях (линиях дальней связи). После этого для полной «цифровизации» телефонной сети осталось перевести на цифровую передачу абонентские линии (от абонента до ближайшей телефонной станции).

Решение последней задачи связывалось с идеей интеграции на базе описанной цифровой сети с применением ИКМ всех (или, по крайней мере, большинства) услуг связи. Этот процесс называют интеграцией услуг, или обслуживания (если его рассматривать с точки зрения пользователя), или интеграцией служб (если его рассматривать с точки зрения администрации). Идея **цифровой сети интегрального обслуживания** (ЦСИО, или по-английски, ISDN – Integrated Services Digital Network) оказалась плодотворной именно благодаря цифровой технике. Первые шаги подобной интеграции предпринимались еще в эпоху аналоговой связи. Примерами могут служить факсимильная связь, широко распространенные за рубежом системы автоматического считывания и передачи показаний счетчиков коммунальных услуг, некоторые другие виды связи, организуемые по телефонным каналам, а в последние годы – еще и связь персональных ЭВМ с применением модемов. Главное отличие перечисленных и им подобных систем, которые работают по аналоговым телефонным сетям, состоит в том, что **они не могут работать одновременно с телефоном**. Перечисленные услуги занимают телефонную линию, когда она свободна, и при этом лишают абонента возможности пользования телефоном во время подобных сеансов связи. Сеть же **ЦСИО свободна от указанного недостатка**.

Отметим два важных обстоятельства. Во-первых, из трех рассмотренных составляющих сети связи определяющей с точки зрения сетевых технологий является техника коммутации. Именно поэтому обсуждение технологий цифровых сетей начинается со средств коммутации. Во-вторых, уже на первом этапе развития ЦСИО, а именно в так называемых **узкополосных ЦСИО (У-ЦСИО)**, абонент получил много новых возможностей связи. Абонент получил возможности устанавливать связь одновременно по двум коммутируемым цифровым каналам со скоростью передачи 64 Кбит/с в каждом. Он может, кроме этого, еще передавать данные со скоростью 16 Кбит/с. Ожидалось, что такое решение позволит абоненту работать на компьютере с информационно-вычислительной сетью без модема и без нарушения связи по двум коммутируемым каналам и вполне удовлетворит его потребности. Более того, если скорость 16 Кбит/с представится абоненту недостаточной, он может за счет временного отказа от других услуг связи воспользоваться для передачи данных скоростью 144 Кбит/с. Однако надежды на очень широкое распространение У-ЦСИО не оправдались. Развитие вычислительной техники вскоре потребовало гораздо более высоких скоростей, которые необходимы для передачи больших файлов, а также видеоизображений. Как показывает статистика развития сетей связи ряда стран, процент абонентов телефонных сетей, перешедших на услуги У-ЦСИО, оказался довольно низким. В силу этого возникла вторая концепция развития цифровых сетей связи, направленная на охват интеграцией и таких услуг, которые требуют высокоскоростной передачи. Эта концепция получила название **широкополосной ЦСИО (Ш-ЦСИО)** и была основана на **технологии АТМ**.

Название АТМ происходит от английских слов Asynchronous Transfer Mode, означающих асинхронный способ (или режим) передачи. Однако перевод этого названия почти ничего не говорит о конкретной технологии. Например, режим передачи, используемый в традиционных телетайпах, тоже является асинхронным способом передачи. Поэтому сокращение АТМ следует понимать в более узком смысле: это не любой асинхронный способ передачи, а конкретная технология, которая на всех языках называется просто технологией АТМ. Такая технология включает в себе новую концепцию многоканальной связи. Она объединяет новые методы **передачи** сообщений, **коммутации** и **мультиплексирования** (или уплотнения). Сущность этих методов состоит в представлении любых сообщений в виде последовательностей небольших стандартных блоков цифровых данных постоянной длины, которые называются **ячейками**. Именно передача, коммутация и мультиплексирование ячеек и составляют сущность технологии АТМ. Ячейки данных отдельного пользователя вставляются в общий поток данных асинхронно по мере их ге-

нерирования источником. Это выгодно отличается от синхронных систем передачи, где сообщения должны передаваться в фиксированных во времени позициях (канальных интервалах), а также от систем пакетной передачи, в которых пакеты синхронизируются по разрядам. В результате получается очень гибкая система, позволяющая предоставлять логические каналы для любой услуги связи с требуемой шириной полосы без установления физического канала соответствующей ширины. При этом, поскольку скорость передачи по каналу и по сети не может быть неограниченной, предусматриваются механизмы контроля интенсивности поступления ячеек.

Научно-исследовательские работы в области широкополосных ЦСИО были начаты в 1980-х гг. Большая заслуга в их проведении принадлежит Национальному научно-исследовательскому центру связи Франции CNET (произносится «Кнэт»). Первое сообщение о технологии ATM в её современном виде было сделано в 1984 году на XI Международном симпозиуме по коммутации во Флоренции (Италия) тремя сотрудниками CNET (А. Томас, Ж.Р. Кудр  з и М. Сервиль). Идея получила широкую поддержку, и для её развития в странах Европейского Сообщества в 1985 г. была принята рассчитанная на 10 лет научно-исследовательская программа RACE. Эта программа включала 90 проектов и стоила 2,5 млрд. долларов США. Результаты исследований по программе RACE были рассмотрены в 1994 г. на совещании глав европейских государств на острове Корфу. Там было принято решение об организации в западноевропейских странах десяти опытных участков для проведения испытаний новой техники, организации взаимосвязи между этими участками и последующего постепенного развития широкополосной ЦСИО с охватом все новых территорий. Одновременно технология ATM стала распространяться в США и Японии, причем не только для Ш-ЦСИО, но и для специализированных информационно-вычислительных сетей. Например, в США этот способ был предложен и реализован институтом Bellcore для организации коммутируемой услуги многомегабитной передачи данных SMDS и нашел применение для объединения локальных информационно-вычислительных сетей. В целом, можно говорить о том, что развитие технологии ATM проходило достаточно успешно. Однако не обошлось и без критики, которая утверждает, что технология ATM является весьма сложной и дорогостоящей. В связи с этим часто ссылаются на коммутацию пакетов, которая является гораздо более простой, подтверждением чего является успешная работа сети Интернет.

В результате появилась третья концепция развития сетевых технологий, крупным идеологом которой является американская компания Cisco. Согласно такой концепции, сеть Интернет вполне может взять на себя весь информационный обмен в мире, в том числе телефонную связь и передачу видео. Интенсивные работы, которые ведутся в этом направлении, дали неплохие результаты. Однако во всей остроте встала проблема гарантий качества обслуживания, которым в традиционной сети Интернет почти не уделялось внимания. Стало очевидным, что принятый в сети Интернет так называемый принцип *наибольшего благоприятствования* (т.е. справедливая обработка пакетов в порядке их поступления) несовместим с мероприятиями по обеспечению качества обслуживания. Поэтому, если от сети Интернет требовать гарантий качества обслуживания в зависимости от вида конкретной услуги, то эту сеть необходимо коренным образом усовершенствовать.

Так возникла четвертая концепция развития сетевых технологий, которая ставит задачи резкого повышения пропускной способности сети Интернет и полной реализации мероприятий, гарантирующих качество обслуживания для всех предоставляемых услуг. Первая из этих задач может быть решена с помощью волоконно-оптических магистральных сетей с плотным разделением по длине волны. Вторая задача решается на основе шестой версии Интернет-протокола IPv6 и коммутации протокольных меток. Коммутация протокольных меток MPLS (Multi-Protocol Label Switching) позволяет устанавливать виртуальные соединения в пределах соответствующей подсети (домена), причем каждое такое соединение ориентировано на конкретное качество обслуживания.

Каждая из четырех перечисленных концепций развития сетевых технологий возникали на разных этапах истории внедрения цифровой техники в сетях связи, но каждая из них оставила не только теоретические разработки, но и огромные технические средства, которые успешно эксплуатируются. Поэтому пути дальнейшего развития сетевых технологий при наличии такого разнообразия эксплуатируемых технических средств являются предметом острых дискуссий и ожесточенной конкуренции ведущих промышленных компаний. Поскольку окончательная точка в этих дискуссиях не поставлена, и неизвестно, будет ли когда-нибудь поставлена.

1.3. Основы техники коммутации

Начальный период развития техники коммутации был связан с телефонией. Но перед тем, как обратиться непосредственно к технике телефонной коммутации как основному оборудованию узлов связи, важно еще раз обратить внимание на сравнение затрат на линейные сооружения и узлы связи. На третью составную часть сетей связи – абонентские устройства – приходится не столь большая доля стоимости сетей связи. К тому же обычно затраты на эту часть сети несут сами абоненты. Поэтому здесь эту состав-

ляющую рассматривать не будем. В первый период развития сетей связи львиная доля стоимости сетей приходилась на линейные сооружения. Можно еще раз вспомнить о затратах С. Морзе на первую телеграфную линию. Дорого стоило и сооружение телефонных линий, которые начали получать широкое распространение после изобретения телефона в 1876 г. В то же время первые телефонные станции, которые обслуживались телефонистками, представляли собой довольно простые устройства, и затраты на них по сравнению с затратами на линейные сооружения, были невелики. Сегодня же относительная стоимость узлов коммутации значительно превышает стоимость линейных сооружений. Это не значит, что линии связи становятся более дешевыми. Наоборот, затраты на линейные сооружения неуклонно растут. Но затраты на оборудование узлов коммутации растут более высокими темпами.

Структуры современных систем коммутации. Серьезным недостатком декадно-шаговой системы коммутации, является применение контактов скольжения, требующих значительных затрат на техническое обслуживание. Поэтому дальнейшее развитие электромеханических коммутационных приборов пошло по пути перехода от контактов скольжения к более надежным контактам нажатия (реле, многократные координатные соединители). Появление последних привело к пересмотру общей структуры АТС, и в её составе процессы коммутации были отделены от процессов управления. Поэтому функциональными группами приборов современной АТС являются коммутационное поле, управляющие и периферийные устройства. Однако первые шаги к созданию такой структуры закладывались в электромеханических системах телефонных станций, получивших название *координатных АТС*. В коммутационное поле КП включаются абонентские линии АЛ и соединительные линии СЛ, связывающих данную телефонную станцию с другими станциями. К периферийным устройствам относятся не абонентские комплекты (т.е. станционные оконечные устройства каждой абонентской линии) и комплекты СЛ, а также распределители сигналов РС, устройства опробования (сканирования) линейных комплектов УОЛ и некоторые другие устройства, которые могут связываться с коммутационным полем или устройствами управления в процессе работы станции, а также электронные устройства управления, включающие центральное управляющее устройство ЦУУ и запоминающие устройства ЗУ. К последним относятся оперативное ЗУ, регистрирующее соединения, и полупостоянное ЗУ, хранящее программы управления и управляющее трансляциями.

Перевод АТС на электронику оказался непростой задачей. Если переход устройств управления на электронику больших трудностей не встретил, то создание электронного коммутационного прибора для аналогового телефонного сигнала оказалось делом весьма трудным. По условиям работы коммутационного элемента на аналоговой АТС, он должен обеспечивать перепад сопротивления во включенном и выключенном состояниях не менее 10^9 (от 0,1 ома до 100 мегом). Ввиду невозможности реализации такого прибора электронными средствами, крупные аналоговые системы коммутации могут быть только *квази-электронными*. В таких АТС на электронных элементах построены все узлы, кроме коммутационного поля. В последнем же применяются механические герметизированные контакты (*герконы*) в стеклянных баллончиках с электрическим или магнитным удержанием соединений. Полностью же электронные АТС удалось реализовать только в цифровом исполнении, при котором требования к перепаду сопротивления контакта удалось понизить, по меньшей мере, на четыре порядка (до 10^5). В литературе часто можно встретить обсуждение достоинств цифровой техники связи перед аналоговой. Как правило, при таких обсуждениях подчеркивается выигрыш в помехоустойчивости систем передачи, который может достигать одного-двух порядков. Однако, как видим, помехоустойчивость систем коммутации удастся повысить на четыре порядка. Перед тем, как перейти к принципам цифровой коммутации, остановимся кратко на структурах аналогового коммутационного поля.

Структуры узлов коммутации каналов. На профессиональном языке простейшую структуру аналогового коммутационного поля, выполняющего коммутацию линий в пространстве часто называют *коммутатором* емкостью $N \times N$. Его достоинство – полная доступность выходов по отношению к входам независимо от наличия и расположения уже установленных соединений. Для соединения между входом и выходом требуется всего одна *точка коммутации*. Хотя здесь и дальше все рассматриваемые схемы даются в однопроводном изображении, фактически под точкой коммутации обычно имеют в виду целую группу контактов, выполняющих одновременное переключение нескольких проводов сложных электрических цепей (например, двухпроводных, четырехпроводных, а иногда даже шестипроводных). Наряду с достоинством рассматриваемой схемы коммутатора, бросаются в глаза и его очевидные недостатки. Прежде всего, с ростом числа коммутируемых линий быстро увеличивается число точек коммутации, хотя их использование остается довольно небольшим. При наличии N входов и N выходов общее число точек в коммутаторе составит N^2 , тогда как максимальное число точек, одновременно используемых в индивидуальных соединениях (т.е. соединениях одного входа с одним выходом) при 100%-ной занятости коммутатора, составит всего N . Кроме того, такая конструкция не очень хороша с точки зрения надежности: выход из строя какой-нибудь точки коммутации означает, что одна из конкретных пар «вход-выход» лишается возможности связи.

Сохранить свойство полнодоступности и преодолеть перечисленные недостатки позволяет трехступенчатая структура, предложенная Ч. Клосом. Для построения *схемы Клоса* входы и выходы коммутатора

нужно разбить на g групп по n входов (соответственно выходов) в каждой так, что $N = g \times n$. В результате вместо одного коммутатора емкостью $N \times N$ на входе новой схемы получится g коммутаторов емкостью $n \times n$, а на выходе g коммутаторов емкостью $m \times n$. Для упрощения рисунка эти коммутаторы показаны не в виде пересекающихся шин, а просто в виде прямоугольников. Упомянутые две группы коммутаторов, составляющие первую и третью ступень коммутации, обозначены соответственно буквами X и Z . Они связаны между собой через вторую ступень коммутации Y , содержащую m коммутаторов размером $g \times g$. Нетрудно заметить, что размеры входящих в нее коммутаторов (или, как говорят, структурные параметры схемы коммутации) подобраны таким образом, чтобы каждая пара коммутаторов соседних ступеней была связана одной промежуточной линией. Для того чтобы выбрать величину параметра m , гарантирующую полнодоступность построенной схемы, рассмотрим произвольную пару коммутаторов из первой и третьей ступени коммутации, например X_1 и Z_1 .

Пусть из n входов коммутатора X_1 уже заняты какими-то соединениями $n-1$ входов, а из n выходов коммутатора Z_1 уже заняты какими-нибудь другими соединениями $n-1$ выходов. В самом неблагоприятном случае может оказаться, что все упомянутые $2n-2$ соединения проходят через разные коммутаторы второй ступени. В результате приходим к выводу, который можно рассматривать как строгое доказательство теоремы о том, что *схема Клоса является полнодоступной и неблокирующей, если она содержит во второй ступени $m \geq 2n-1$ коммутаторов*. Действительно, при наличии $2n-2$ рассмотренных соединений с самым неблагоприятным расположением выбранных путей (когда все эти соединения проходят через разные коммутаторы второй ступени) найдется еще один коммутатор во второй ступени, через который можно будет соединить оставшийся свободным вход коммутатора X_1 с единственным свободным выходом коммутатора Z_1 . Таким образом, в первой и третьей ступенях коммутации потребуются не квадратные коммутаторы $n \times n$, а прямоугольные коммутаторы размером $n \times (2n-1)$, которые расширяют коммутационную схему в её средней части почти вдвое.

В рассмотренном случае говорят, что на первой ступени коммутации происходит процесс *расширения*, а на третьей – *концентрации* нагрузки. Приняв для простоты $n = g = \sqrt{N}$, нетрудно подсчитать, что общее число точек коммутации во всей схеме окажется равным $6N^{1.5} - 3N$, т.е. начиная приблизительно с N , равного трем десяткам, схема будет содержать меньше точек коммутации, чем предыдущая схема. Число же используемых точек коммутации в схеме при полной нагрузке станет равным $3N$, так как в каждом соединении теперь задействованы по три точки. Наконец, для установления соединения любого входа схемы с любым её выходом при отсутствии других соединений может быть выбран любой из $m = 2n-1$ возможных путей, что существенно повышает надежность схемы. Применение прямоугольных коммутаторов (т.е. процессов расширения и концентрации) ради исключения блокировок соединений и получения полнодоступности в практических схемах нередко признаётся излишним. Чаще предпочитают использовать квадратные коммутаторы емкостью $n \times n$, что позволяет существенно сэкономить число точек коммутации. Схема, построенная из квадратных коммутаторов $n \times n$ во всех трех ступенях коммутации, сохраняет свойство полнодоступности и неблокируемости лишь в так называемом режиме *разовой коммутации*, когда список всех N требуемых соединений задан заранее, и пути для них выбираются с учетом возможности одновременного установления всех других соединений заданного списка. Такие схемы находят применение в узлах *кроссовой коммутации*, которые служат, например, для сезонных переключений пучков каналов. В отличие от кроссовой коммутации, при которой все соединения устанавливаются и прекращаются одновременно, при обычной, или *абонентской*, коммутации соединения возникают и прекращаются в случайные моменты времени, и именно непредсказуемость этого процесса часто заставляет увеличивать число точек коммутации или допускать возможность блокировки отдельных соединений. В практических системах телефонной коммутации предпочтение обычно отдается второму пути как более экономичному. Схема, построенная из коммутаторов $n \times n$ во всех трех ступенях коммутации, требует лишь $3N^{1.5}$ точек коммутации. Однако каждой паре «вход-выход» такая схема может предоставить возможность выбора не из $2n-1$ путей установления соединения, а только из n путей. В традиционных системах коммутации рассмотренные коммутаторы могут быть реализованы с помощью многократных координатных соединителей (в АТС координатной системы) или герконовых матриц (в квазиэлектронных АТС). При росте емкости станции число ступеней коммутации увеличивается, и на станциях упомянутых систем может достигать восьми.

Понятие *ступени коммутации*, которая предоставляет одну точку коммутации в соединительном пути, нужно отличать от понятия *ступени искания*, которое относится к процессу управления выбором путей установления соединений. Ступень искания представляет собой каскад ступеней коммутации, выполняющий конкретную функцию искания соединительного пути. Обычно коммутационное поле АТС содержит ступени *абонентского* (и/или *линейного*) и *группового* искания. В ступень абонентского искания включаются абонентские линии. При исходящем вызове от абонента задача этой ступени состоит в том, чтобы подключить линию этого абонента к любому свободному выходу, ведущему к ступени группового искания. При входящем же вызове (к абоненту) эта ступень должна найти линию конкретного абонента и подключить к ней тот конкретный выход ступени, на котором оказался вызов, поступивший

из ступени группового искания. Что же касается ступени группового искания, то она представляет каскад ступеней коммутации, служащий для распределения вызовов по группам. В эту ступень включаются промежуточные линии от ступени абонентского искания, и она должна в соответствии с поступающими вызовами коммутировать эти линии по нужным группам путей, ведущим к вызываемым линиям. Таким образом, среди процессов управления коммутацией можно выделить три этапа искания. На первом этапе происходит *свободное искание* (или предыскание), при котором вызов должен быть скомутирован к любому свободному выходу; от него и начнется собственно процесс искания. На втором этапе происходит *групповое искание*, при котором выбирается произвольная линия в нужной группе. На третьем этапе осуществляется *линейное искание*, задачей которого является выбор конкретной линии, являющейся адресатом вызова. Структура коммутационных полей от Строуджера до электронных АТС претерпела коренные изменения, однако описанная последовательность этапов искания в той ли иной форме сохранилась во многих системах.

Цифровая коммутация каналов. Применительно к технике коммутации важнейшее следствие теоремы Котельникова состоит в том, что для передачи аналогового сигнала не требуется занимать канал в течение всего времени действия этого сигнала. Вся необходимая информация может быть передана за гораздо меньшее время. Например, можно занять канал лишь в течение 1% общего времени действия сигнала или и того меньше. Это, конечно, будет означать потерю 99% мощности передаваемого сигнала. Но потерю мощности можно восполнить усилением, что не представляет никаких трудностей. Важно при этом не потерять информацию, для чего нужно правильно распределить этот самый 1% времени, на которое занимается канал. Конкретно, для передачи речи в рассматриваемом примере мы должны располагать техникой, которая позволила бы передавать каждый отсчет речевого сигнала не за 125 мкс, а за 1,25 мкс. Тогда за остальные 123,75 мкс можно будет передать сигналы еще 99 каналов. В указанный промежуток времени 1,25 мкс входит как время передачи всех разрядов данного отсчета, так и некоторое защитное время, позволяющее избежать наложения соседних отсчетов. Например, уже приводился пример когда время передачи одного отсчета канального интервала составляет 3,9 мкс, а время передачи одного двоичного разряда равно 488 нс. Но это далеко не предел возможностей современной техники. Волоконно-оптические линии связи позволяют каждые 125 мкс передавать стандартный формат STM-1, содержащий 2430 восьмиразрядных блоков двоичных символов (которые в вычислительной технике называются *байтами*, а в технике связи чаще называются *октетами*). В этом случае время передачи одного разряда составляет 6,43 нс, а по линии могут быть переданы одновременно сигналы более 2000 телефонных каналов. При формате же STM-16 время передачи одного импульса составляет всего 402 пс, а число каналов увеличивается в 16 раз.

Все сказанное здесь о передаче полностью справедливо и для коммутации, а именно: рассмотренные в предыдущем разделе структуры систем коммутации могут соединять аналоговые каналы не на все время передачи разговора, а только на время прохождения нужного отсчета. Таким образом, при цифровой коммутации каждая точка представляет собой клапан, открываемый на время передачи нужного канального интервала. Если тракт передачи уплотнен 100 канальными интервалами, а клапаны собраны по схеме коммутатора, то пространственный эквивалент такой схемы цифровой коммутации можно представить как 100 параллельных и независимых коммутаторов, каждый из которых работает в своем канальном интервале. Из сказанного следует, что если по некоторой линии связи передаются 30 или 100 каналов, уплотненных во времени, то такие каналы скомутировать между собой с помощью описанной пространственной схемы невозможно. Поэтому, кроме коммутации цифровых каналов в *пространстве*, применяется еще коммутация цифровых каналов во *времени*, изобретенная японским ученым Х. Иносэ. Идея коммутации во времени поясняется на рисунке, на котором слева показаны два удаленных концентратора УКнц, в которые включаются абонентские линии. Каждый из рассматриваемых концентраторов связан с узлом коммутации четырехпроводной линией, уплотненной аппаратурой ИКМ. Предположим, что абоненту А, включенному в верхний концентратор, выделен для связи с узлом канальный интервал i , в котором он ведет передачу и приём. В этом канальном интервале абонент А передает по исходящей цифровой соединительной линии A_s и принимает по входящей цифровой соединительной линии A_r . Абоненту же В, включенному в нижний концентратор, выделен для связи с узлом канальный интервал j . В этом канальном интервале абонент В работает соответственно по соединительным линиям B_s и B_r . Не нарушая общности рассуждений, предположим, что $j > i$. Тогда с помощью устройства задержки D речевой сигнал абонента А, передаваемый в i -м канальном интервале соединительной линии A_s может быть задержан на промежуток времени, пропорциональный $j-i$, и сдвинут в j -й канальный интервал соединительной линии B_r , в котором и достигнет абонента В. В то же время речевой сигнал абонента В, передаваемый в j -м канальном интервале соединительной линии B_s , может быть задержан в устройстве задержки D' на промежуток времени, пропорциональный $n-(j-i)$, и сдвинут в i -й канальный интервал соединительной линии A_r , в котором он достигнет абонента А. Здесь n -число канальных интервалов в цикле аппаратуры ИКМ, работающей по соединительным линиям, а τ - длительность канального интервала. Абоненты А и А', включенные в один и тот же верхний концентратор, по рассматриваемой схеме также не могут получить соединение в концентраторе. Пример соединения этих абонентов показан на этой же схеме. Здесь предполагается, что абоненту А' предоставлен канальный интервал j , и таким образом в

соединительных линиях A_s и A_r используются оба канала i и j . У временного коммутатора емкостью N входов и N выходов на вход подается цифровая линия передачи, уплотненная N временными каналами, а на выходе подключается такая же цифровая линия, уплотненная N каналами, но переставленными во времени произвольным образом. Схема содержит секционированный регистр сдвига (либо линию задержки или прибор с зарядовой связью), имеющий выходные отводы, которые разнесены по времени задержки на один канальный интервал, обозначенный τ . Отводы связаны с управляемыми вентилями (двухвходовыми схемами совпадения, или логическими схемами «И»). Если общее число канальных интервалов в линии передачи равно N , то полностью доступная схема временной коммутации должна содержать регистр сдвига с $N-1$ секциями. В зависимости от управляющих сигналов, открывающих вентили на время того или другого канального интервала, рассматриваемая схема может произвольно сдвигать канальные интервалы на входе этого устройства в любую последовательность этих канальных интервалов на выходе. Именно благодаря тому, что **цифровая коммутация может осуществляться как в пространстве, так и во времени**, были созданы высокоэффективные средства электронной коммутации.

На основании изложенного можно подумать, что на структурные параметры схем цифровой коммутации накладываются довольно жесткие ограничения. В действительности это не так, и приведенное описание было бы неполным, если не добавить два важных замечания. Во-первых, как видно из текста, важнейшими составными элементами коммутационных полей являются вентили и запоминающие устройства. Выбирая предпочтительную схему, нужно сравнивать варианты, различающиеся соотношением числа вентилях и емкости памяти в битах. На первом этапе развития цифровой коммутации система считалась экономически неэффективной, если она требовала большого объема запоминающих устройств (ЗУ). Однако по мере развития микроэлектроники стоимость бита памяти стала гораздо меньше стоимости вентиля, и условием экономической эффективности стало применение большего объема памяти и меньшего числа вентилях. Второе замечание развивает первое и состоит в том, что в современных узлах коммутации находят широкое применение оперативные ЗУ, которые используются не только для сдвига импульсов, но и для накопления информации в коммутационных схемах. Такие накопители могут иметь многоцелевое назначение и использоваться для коммутации канальных интервалов, расширения и концентрации, последовательно-параллельного преобразования, преобразования скорости передачи, перестроения канальных интервалов, компенсации задержек, синхронизации. Например, схема Клоуса может быть построена не обязательно путем непосредственного расширения и концентрации методом удвоения числа промежуточных линий, но также путем удвоения скорости передачи в промежуточных линиях (удвоения тактовой частоты). С другой стороны, если скорость передачи по уплотненным линиям слишком велика, в узле может выполняться параллельная коммутация разрядов. Любые подобные схемы легко реализуются с помощью ЗУ.

Коммутация сообщений и пакетов. Описанные решения показывают, что электронная коммутация позволяет значительно усовершенствовать коммутационную технику. В то же время остается нерешенной одна из главных проблем коммутации каналов: она может работать только со стандартными каналами. В телефонных сетях, которые были ориентированы только на один тип услуги, подобных проблем не возникало. С увеличением же номенклатуры услуг, требующих разных каналов, серьезным конкурентом коммутации каналов выступает коммутация сообщений, т.е. запись передаваемых сообщений в узле с последующим их считыванием и воспроизведением в нужном направлении передачи на пути к адресату. Сам термин «коммутация сообщений» устарел, точнее устарело только слово, но не сам процесс связи. Это легко понять, если представить себе случай передачи очень длинного сообщения. Такое сообщение не только задержит многие следующие за ним короткие сообщения, но и перегрузит накопитель, что может привести к потере части сообщения. Поэтому вполне естественно было перейти от передачи и коммутации сообщений к передаче и коммутации пакетов. В этом случае сообщение разбивается на отдельные блоки данных (пакеты), и каждый такой блок передается самостоятельно. В результате принятия этого технического решения короткие сообщения, которые укладываются в один пакет, получают преимущество, и доставляются быстрее. Представляется полезным сравнить коммутацию каналов и коммутацию сообщений (пакетов) по важнейшим характеристикам.

Таблица 1.1. Сравнение режимов коммутации

| Наименование характеристики | Оценка | характеристики |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| | При коммутации каналов | При коммутации сообщений (пакетов) |
| Использование канала | Недостаточно высокое, так как в режиме работы с потерями для га- | Высокое, так как работа происходит с ожиданием, и это позволя- |

| | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Затраты на сеанс связи | <p>рантии установленной нормы потерь нельзя повышать нагрузку.</p> <p>Определяются стоимостью передающих, приёмных устройств и средств коммутации</p> | <p>ет повышать нагрузку до значения, довольно близкого к пределу.</p> <p>Приблизительно такие же, как и при коммутации каналов, плюс затраты на промежуточные накопители</p> |
| Принцип коммутации | <p>Соединение устанавливается с применением сигнализации, работающей по участкам сети.</p> | <p>Сообщения последовательно передаются по каждому участку от узла к узлу.</p> |
| Длительность сеанса связи | <p>Складывается из почти постоянного времени установления соединения и однократного времени передачи сообщения</p> | <p>Складывается из многократных периодов передачи сообщения (в зависимости от числа участков) и многократного случайного времени ожидания в каждом узле.</p> |
| Влияние длины сообщения | <p>Короткие сообщения невыгодны из-за относительно большой доли времени установки соединений</p> <p>Перегрузка ведет к увеличению числа отказов.</p> | <p>Длинные сообщения невыгодны из-за многократного накопления больших массивов данных.</p> <p>Кратковременная перегрузка не ощущается.</p> |
| Влияние перегрузки | | <p>Возможно без ограничений.</p> |
| Многократное распределение сообщений | <p>Требует установления специальных конференц-соединений</p> | |

Как показывает сравнение двух способов коммутации в таблице 1.1, коммутация каналов очень удобна для сетей, ориентированных на одну конкретную услугу (например, для телефонной сети). Если же сеть предоставляет большое разнообразие услуг, требующих каналы с разной скоростью передачи, становится очевидным преимущество коммутации пакетов. Поэтому при разработке принципов коммутации для Ш-ЦСИО, где могут работать каналы, сильно различающиеся по скорости передачи, была предпринята попытка создания гибридной системы коммутации, объединяющей достоинства обоих рассмотренных способов. Такой системой является коммутация ячеек по технологии АТМ. В этом случае любое сопряжение между пользователем и сетью представляет собой единственный физический канал, по которому могут передаваться сообщения любого вида (речь, другие звуковые сообщения, данные, тексты, неподвижные изображения, видео). При этом для каждого вида сообщения может быть создан отдельный виртуальный (логический) канал, по которому любая информация передается в форме последовательности стандартных ячеек, содержащих по 53 октета. Из них 5 октетов составляют заголовок ячейки, а остальные 48 – полезную (или, как говорят за рубежом, трибутарную, или оплачиваемую) информацию.

Коммутация ячеек АТМ. Идея технологии АТМ замечательна во многих отношениях. Особенно новаторскими являются подходы к её реализации в технике коммутации, которая позволяет объединить воедино идеи коммутации пакетов и коммутации каналов. С одной стороны, ячейка, как блок данных, снабженный адресом, обрабатывается в системе коммутации как пакет, т.е. коммутируется методом быстрой коммутации пакетов. В то же время последовательность ячеек, направляемых от конкретного отправителя к конкретному получателю, принадлежит единому логическому каналу, которому присваивается определенный номер. Установление виртуального канала аналогично традиционному процессу абонентской коммутации. Но наряду с этим возможна и кроссовая коммутация, когда производится долговременная установка целых пучков возможных виртуальных каналов. Такие пучки называются **виртуальными путями**. Другой новаторской идеей в сетях АТМ является новый принцип управления коммутацией. В рассмотренных выше системах коммутации с централизованным управлением выбор путей установления соединений осуществляется прибором, который выбирает путь в коммутационном поле целого блока искания. При проектировании такого прибора выбирается компромиссное решение между двумя крайностями. Исчерпывающий поиск предпоч-

тительного пути среди всех возможных путей требует огромных аппаратных и программных затрат, но гарантирует наилучшее решение. Намного проще попытка выбора случайного пути, но она может привести к отказу даже при наличии свободных путей. Поэтому управление выбором путей установления соединений в системе коммутации представляет довольно сложную задачу. В этом отношении *децентрализованный метод самомаршрутизации*, разработанный для систем АТМ, является крупным достижением в технике коммутации.

Система коммутации для сетей АТМ строится из двоичных коммутационных элементов, имеющих два входа и два выхода (2×2). Такие схемы в литературе называются *схемами Бенеша*. Если каждая точка коммутации в таком элементе управляется независимо от других, коммутатор может находиться в одном из 16 возможных состояний. Некоторые из них показаны на рисунке, где замкнутые точки коммутации показаны черными кружками, а в правой части показаны условные обозначения таких коммутаторов. Два наиболее важных состояния, в которых установлены по два соединения входов с выходами: прямое и перекрестное (эти соединения часто кодируются в литературе как состояния «0» и «1»). Однако существуют групповые соединения первого и второго входов с обоими выходами. Соединения такого типа применяются в системах, где предусмотрено установление многоадресных путей (например, при предоставлении услуги конференц-связи или циркулярного распределения сообщения). Мы ограничимся лишь рассмотрением схем, устанавливающих одноадресные соединения. Для построения систем коммутации большой емкости применяются многоступенные схемы, в которой на каждой ступени коммутации решается задача увеличения вдвое числа выходов, доступных каждому входу. Округлив емкость схемы N до ближайшей сверху целой степени двойки, получим необходимое число ступеней коммутации, равное $n = \log_2 N$.

Для примера возьмем базовую схему для случая $N = 8$. Из этой схемы понятен принцип построения базовых схем: берутся две базовые схемы меньшей емкости (в данном случае 4×4) и справа добавляется еще одна ступень коммутации. Каждый коммутатор этой новой ступени подключается к каждой из двух исходных схем. Построенная с помощью такой процедуры схема в свободном состоянии является полностью доступной, т.е. любой её вход может быть соединен с любым её выходом. Однако уже после установления первого соединения свойство полноты не сохраняется, и по мере установления новых соединений доступность выходов по отношению ко входам резко снижается. Это объясняется большим количеством возможных соединений (одних наборов требований из восьми одновременных соединений насчитывается $8! = 40320$, и маршруты многих из них пересекаются между собой и не могут быть реализованы одновременно). Достаточно заметить, что после установления соединения первого (верхнего) входа с первым (верхним) выходом второй вход со вторым выходом уже соединить нельзя.

Повысить коммутационные возможности рассматриваемой схемы можно двумя способами: предусмотреть возможность ожидания ячеек перед коммутационными элементами или подбирать вызовы по требуемым направлениям соединений. Первый способ не нуждается в особых пояснениях. Поскольку схема работает по принципу самомаршрутизации, управление состоянием каждого очередного коммутационного элемента осуществляется на основании информации, записанной в заголовке ячейки. Следовательно, в каждом коммутационном элементе должны быть предусмотрены средства обработки информации. Добавление к этим средствам некоторой памяти для записи ячеек не создает принципиальных трудностей. Дело сводится лишь к выбору предпочтительной схемы распределения памяти по ступеням коммутации с учетом требований предотвращения потерь ячеек и особенностей технологии производства микросхем (вся рассматриваемая коммутационная техника реализуется в микроэлектронном исполнении). Впрочем, как будет видно из дальнейшего, при успешном упорядочении поступающих требований схема становится неблокирующей во многих случаях даже без промежуточных накопителей.

Рассмотрим процедуру самомаршрутизации. Для этого пронумеруем входы, выходы и коммутаторы в каждой ступени двоичными числами как показано на рисунке. Аналогичным образом могут быть пронумерованы соединительные звенья между коммутаторами. Их номера состоят из номеров соединяемых коммутаторов, но вместо четырехзначного номера, содержащего всегда одинаковые вторую и третью цифры, достаточно воспользоваться трехзначным номером, в котором две одинаковые средние цифры заменены одной. Процедура выбора соединительных звеньев для соединения второго входа (имеющего номер 001) с шестым выходом (номер 101). Скользя по последовательности цифр, составленных из номеров соединяемых входов и выходов, считываем один за другим номера соединительных звеньев. Одновременно сравнивая соответствующие разряды номеров входов и выходов, находим необходимые состояния коммутаторов. При совпадении разрядов коммутатор соответствующей ступени устанавливается в состояние «0», при несовпадении – в состояние «1». Некоторые специалисты предпочитают применять термин «цифровая коммутация» именно к описанной схеме, хотя и при централизованном управлении коммутацией выбор путей может осуществляться чисто цифровыми методами.

Процесс упорядочения ячеек, подлежащих коммутации, называется *классификацией*, или *сортировкой*. Такой процесс выполняется с помощью классифицирующей (сортирующей) схемы, которая также строится из коммутаторов 2×2 . В основе алгоритма сортировки, предложенного Бетчером, лежит рекуррентная процедура объединения двух монотонных последовательностей чисел в одну путем сравнения представителей одной и другой последовательности и их упорядочения. Сравнение и упорядочение двух адресов удобно выполнить с помощью двоичного коммутационного элемента. Если на верхний вход этого элемента подается ячейка с меньшим номером адреса, коммутационная схема принимает состояние «0». Если же

сверху оказывается адрес с большим номером, схема принимает состояние «1», и эта ячейка идет вниз. Впрочем, возможен и обратный порядок работы. В 1971 г. два американских автора предложили называть схему баньяном. **Баньян** – это тропическое дерево, у которого каждая почка может дать ветвь, растущую вверх, и воздушный корень, растущий вниз и уходящий в землю. Вопреки практике, принятой в электротехнике, эти авторы изображали схему, повернув плоскость чертежа на 90° , что и навело на мысль о таком экзотическом названии. Оно было подхвачено другими авторами и закрепилось в литературе.

Полная схема коммутатора ячеек АТМ емкостью 8×8 для формирования виртуальных каналов между двумя абонентами показана в упрощенном обозначении. Она называется схемой **Бетчер-баньян** и состоит из сортирующего каскада (схемы Бетчера) и каскада маршрутизации (схемы баньян). В соответствии с алгоритмом Бетчера сортировка производится сначала путем сравнения двух отдельных чисел (четыре пары), затем двух монотонных последовательностей по два числа (две пары наборов) и, наконец, двух монотонных последовательностей по четыре числа. На выходе каскада сортировки все ячейки располагаются в порядке возрастания номеров адресов, поэтому далее схема маршрутизации позволяет установить все соединения без блокировок. Стандартная схема коммутатора Бетчер-баньян, на которой кажущееся несовпадение каскада маршрутизации разрешается очень просто: достаточно в схеме маршрутизации переставить местами (или номерами) второй и третий коммутаторы средней ступени коммутации. Коммутационные схемы большей емкости, построенные по описанному принципу, собираются на платах из стандартных микросхем. Такие узлы коммутации с универсальным коммутационным полем и децентрализованным управлением получают все более широкое распространение.

1.4. Узкополосные цифровые сети интегрального обслуживания

Узкополосную цифровую сеть интегрального обслуживания (У-ЦСИО) часто рассматривают как первый крупный шаг разработчиков и администраций сетей связи общего пользования навстречу новым пользователям информационных услуг, которые вооружены персональными ЭВМ. На самом же деле это был еще и важный шаг на пути к «бракосочетанию» техники связи с компьютером. Перевод всех услуг связи на цифровую технику, т.е. переход к передаче информации в цифровой форме, даёт возможность при обработке передаваемых и принимаемых сигналов выполнять сложнейшие вычисления. Именно такого рода вычисления и позволили нам приблизиться к потенциальным возможностям передачи информации, которые определены неравенством Шеннона. Одновременно с этим цифровая передача открывает широчайший диапазон возможностей создания новых услуг связи. Сети У-ЦСИО строятся по стандартам аппаратуры ИКМ, в которой за основу принята базовая скорость передачи 64 Кбит/с. Поэтому начнем с более подробного рассмотрения принципов цифровой передачи речи.

Цифровая передача речи. Для преобразования аналогового речевого сигнала в цифровую форму необходимо выполнить три операции: **дискретизацию, квантование и кодирование**. Совокупность этих операций и называется **импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ)**. Как уже упоминалось, для нужд коммерческой телефонной связи достаточно ограничить полосу частот передаваемого речевого сигнала пределами 300 – 3400 Гц. Следовательно, необходимая ширина полосы частот для передачи речи составляет $F = 3100$ Гц, и поэтому по теореме Котельникова минимальная частота дискретизации должна быть равна $2F = 6200$ отсчетов в секунду. Однако выбор нижнего предельного значения частоты отсчетов нежелателен. Если, например, в какой-то момент времени в передаваемом сигнале окажется только одна частота 3100 Гц, то описать такой сигнал точно с помощью 6200 отсчетов окажется невозможным. В зависимости от фазы, на которую будут попадать отсчеты, может получиться любое значение отсчета от нуля до амплитуды синусоиды. Частоту отсчетов $2F$ по теореме Котельникова нужно понимать как предельное значение, к которому стремится функция, а точность передачи речи будет тем выше, чем выше частота отсчетов. Исходя из этого выбор пал на частоту отсчетов $2F = 8000$, которая и принята в качестве стандарта для коммерческих систем цифровой передачи речи. Следовательно, отсчеты аналогового речевого сигнала должны происходить через каждые 125 мкс – цифра, которая уже неоднократно упоминалась и которую нужно твердо запомнить. Следующей после отсчета операцией аналого-цифрового преобразования является квантование, т.е. округление полученного отсчета до ближайшего разрешенного значения. Квантование – это операция, похожая на дискретизацию, но выполняемая не по оси времени, а по оси уровней сигнала. Если дискретизация, согласно теореме Котельникова, не вносит никаких искажений в передаваемый сигнал (поскольку он ограничен по частоте), то квантование неизбежно вносит некоторые искажения, которые называются **шумами квантования** и зависят от шага квантования. Чем больше шагов квантования, тем меньше шум квантования. Именно в этом состоит смысл утверждения теоремы Шеннона о возможности передачи информации со сколь угодно высокой достоверностью: задавая шаг квантования, мы выбираем эту самую достоверность, т.е. приемлемое для нас качество передачи. Речевой сигнал занимает очень широкий динамический диапазон – около 60 дБ. Это значит, что самый громкий сигнал отличается от самого тихого в 1000000 раз. Поэтому для получения качества пере-

дачи речи, удовлетворяющего требованиям коммерческой телефонной связи, приходится использовать 8192 уровня квантования.

После операции квантования округленный отсчет кодируется с помощью двоичных разрядов. Учитывая, что $\log_2 8192 = 13$, приходим к выводу, что цифровой поток для передачи речи должен иметь скорость 8000 отсчетов в секунду $\times 13 = 104$ Кбит/с. Именно такая скорость определена в стандартном интерфейсе аналого-цифрового преобразователя речевого сигнала и широко применяется в аппаратуре обработки речи. Однако для передачи по каналам связи такая скорость является неоправданно высокой. Поэтому в практических системах цифровой передачи речи с ИКМ скорость передачи снижена с учетом свойств органов слуха человека. Квантование по линейному закону не учитывает свойств органов слуха человека, которые воспринимают звуки по логарифмическому закону. Иначе говоря, более громкие звуки человек различает грубо, а более тихие – тоньше. Поэтому в аппаратуре ИКМ применяется логарифмическая шкала квантования, и в этом случае оказывается достаточным только 256 уровней. Это позволяет снизить скорость передачи до 64 Кбит/с. Цифровой телефонный канал с такой нелинейной характеристикой пригоден для передачи речи, но может серьезно снизить скорость передачи модема, который рассчитан на работу по аналоговому каналу. Что же касается полностью цифровой сети (а не сети с отдельными цифровыми вставками), то она может предоставлять услуги передачи данных со скоростью 64 Кбит/с (или в США 56 Кбит/с из-за различий в устройстве аппаратуры ИКМ).

Возможно ли дальнейшее снижение скорости передачи речи по цифровому каналу? Безусловно, возможно, и этот вопрос изучался очень многими исследователями. Прежде всего, между соседними отсчетами аналогового речевого сигнала существует зависимость, которая вносит избыточность в передаваемую информацию. Для устранения этой зависимости были разработаны *дифференциальная ИКМ и адаптивная дифференциальная ИКМ (АДИКМ)*. Подобные методы позволяют уменьшить скорость цифровой передачи речи до 32 и 16 Кбит/с. Однако широкого распространения они не получили из-за сложности аппаратуры, необходимой для их реализации. Проблема сложности аппаратуры, а следовательно и её стоимости, в инженерной практике имеет решающее значение. При проектировании сетей связи, как и любых других инженерных сооружений, необходимо различать *возобновляемые и не возобновляемые ресурсы*. Проводная линия связи – это возобновляемый ресурс. Поэтому если каналобразующая аппаратура для этой линии оказывается дороже сооружения новой линии, то для организации дополнительных каналов следует отдать предпочтение сооружению новой линии. Именно по этой причине во всем мире широкое применение находят системы цифровой передачи речи со скоростью 64 Кбит/с, и пока в широких масштабах нигде не ставился вопрос о переходе на более сложную проводную аппаратуру с пониженной скоростью передачи. С другой стороны, радиотелефония часто является не возобновляемым ресурсом, так как все доступные частоты давно распределены между пользователями в международном масштабе. Поэтому подходы к разработке аппаратуры радиосвязи сильно отличаются от подходов, которые практикуются в проводной связи. В частности, для телефонной связи по сотовому радиотелефону оправдываются гораздо более серьезные затраты, чем это могут себе позволить создатели аппаратуры проводной связи.

Стандартная скорость цифровой передачи телефонных сигналов по проводным линиям составляет 64 Кбит/с. Но с такой скоростью может работать не только телефон, но и многие другие устройства связи, которые могут предложить пользователям конструкторы новой абонентской аппаратуры. Именно из этих соображений в качестве стандарта в системе У-ЦСИО принята абонентская линия со скоростью передачи 144 Кбит/с, которая обеспечивает сопряжение абонентских устройств с узлом коммутации и обозначается 2В + D. Здесь В – базовый цифровой телефонный канал (64 Кбит/с), а D – канал передачи данных со скоростью 16 Кбит/с. Таким образом, абонент У-ЦСИО получает по традиционной абонентской линии два коммутируемых цифровых канала, которые устанавливаются путем набора номера. Это не значит, что оба эти канала обязательно должны использоваться для подключения телефонов. Концепция У-ЦСИО как раз и предоставляет возможности расширения номенклатуры услуг связи. Одновременно с этим пользователь персональной ЭВМ получает возможность доступа к информационно-вычислительной сети без процедуры установления соединения. В этом случае скорость передачи составляет 16 Кбит/с, причем передача с такой скоростью происходит независимо от работы по двум коммутируемым каналам.

Цифровая аппаратура многоканальной связи. Перед тем, как перейти к более подробному рассмотрению абонентских интерфейсов У-ЦСИО, остановимся на кратких характеристиках аппаратуры ИКМ, получившей очень широкое распространение во всем мире. Первые подобные системы цифровой передачи (ИКМ-24) были созданы в 1960-х гг. в США и Японии. В те годы была актуальна проблема интеграции систем уплотнения и коммутации каналов в телефонных сетях, но еще не ощущалась острота проблемы интеграции услуг связи. Принятая же в нашей стране европейская система ИКМ-30 создавалась в 1970-х гг. с учетом опыта аналогичных разработок в США и Японии уже при более ясном представлении перспектив интеграции услуг связи. По этим причинам последняя система является более совершенной. Однако в США и Японии системы, созданные в 1960-х гг., к 1970-м гг. получили очень широкое распространение и даже оказали влияние на выбор стандартов для других сопряженных систем связи. Поэтому при утверждении стандартов мировому сообществу пришлось принять во внимание фактическое положение дел и узаконить оба стандарта. Для читателя первоочередный интерес представляет, конечно, аппаратура ИКМ-30. Однако

для более глубокого понимания процесса развития технической мысли при создании средств цифровой передачи полезно начать с краткого рассмотрения принципов действия аппаратура ИКМ-24, применяемой в США и Японии.

Исходными предпосылками при разработке системы цифровой передачи речи на основе ИКМ являются уже обсуждавшиеся характеристики аналого-цифрового преобразования: частота дискретизации 8000 отсчетов в секунду и соответствующая ей длительность цикла многоканальной передачи 125 мкс. В этот интервал времени необходимо уложить все каналные интервалы, а также необходимые сигналы синхронизации и управления. В аппаратуре ИКМ-24 принят чисто логарифмический закон квантования отсчетов (так называемый μ -закон, где $\mu = 255$ - параметр логарифмического закона). Такой закон позволяет кодировать каждый отсчет аналогового речевого сигнала с помощью 8-разрядного двоичного числа. Для целей синхронизации создатели аппаратуры ИКМ-24 ограничились выделением одного разряда. Сигналы же управления процессами установления телефонных соединений в системе ИКМ-24 передаются по схеме внутрисполосной сигнализации, т.е. без выделения дополнительных ресурсов пропускной способности. Таким образом, в цикле аппаратуры ИКМ-24 необходимо разместить $24 \times 8 + 1 = 193$ двоичных разряда.

Важной общей чертой двух обсуждавшихся систем цифровой передачи ИКМ-24 и ИКМ-30 является то, что и та и другая строится на основе цикла длительностью 125 мкс. А выбор такой длительности цикла явился следствием выбора частоты дискретизации аналогового речевого сигнала. Этот выбор был совершенно естественным, так как именно телефонная связь являлась самым массовым видом связи на протяжении всего XX столетия. Возможности же уплотнения цикла зависят от прогресса импульсной техники. Мы видели, что в системе ИКМ-24 на передачу одного двоичного разряда отводится 648 нс, а в системе ИКМ-30 уже 488 нс. Чем короче импульс может быть получен, тем больше цифровых каналов можно организовать в пределах установленного цикла. Здесь мы подходим к понятию *иерархии цифровых систем передачи*. Аналогично тому, как путем многократной амплитудной модуляции получают многоканальные системы аналоговой передачи с частотным разделением каналов, так в данном случае используя все более короткие импульсы, можно выстроить иерархию каналных интервалов в цикле.

Плезиохронная цифровая иерархия. Согласно американскому стандарту, система ИКМ-24 называется аппаратурой D1 (а соответствующий сигнал DS-1). Скорость цифровой передачи этой аппаратуры составляет 1,544 Мбит/с, а сама система многоканальной передачи называется T-1. Следующие уровни иерархии DS-2, DS-3 и DS-4 работают со скоростями соответственно 6,312 Мбит/с (96 цифровых каналов), 44,736 Мбит/с (672 канала) и 274,176 Мбит/с (4032 канала). Аналогичный европейский стандарт, принятый в нашей стране, строится на основе системы ИКМ-30 и предусматривает следующие уровни: ИКМ-30 (2,048 Мбит/с), ИКМ-120 (8,448 Мбит/с), ИКМ-480 (34,368 Мбит/с), ИКМ-1920 (139,264 Мбит/с) и ИКМ-7680 (564,992 Мбит/с). Описанные системы часто называют системами *плезиохронной цифровой иерархии*. Слово «плезиохронная» означает «близкая к синхронной». Смысл этого термина становится очевидным, если обратиться, например, к приведенному выше перечню скоростей цифровой передачи, принятому в нашей стране. Из перечня видно, что каждый вышестоящий уровень формируется путем уплотнения четырех потоков предыдущего уровня. Например, цифровой поток со скоростью передачи 2,048 Мбит/с, обозначаемый E1 (Европейский стандарт первого уровня иерархии) объединяется с тремя другими такими же потоками в аппаратуре ИКМ-120. Чтобы выполнить такое объединение во времени, нужно сделать импульсы потока E1 короче в четыре раза и применить прослаивание (т.е. чередование) укороченных импульсов этих четырех потоков. Стандартный цикл потока имеет продолжительность 125 мкс. За это время поток E1 передает 32 каналных интервала (30 телефонных и 2 служебных канала), каждый из которых содержит по 8 двоичных разрядов. Всего, таким образом, за 125 мкс передается $32 \times 8 = 256$ двоичных разрядов. Учитывая, что 125 мкс – это одна восьмитысячная доля секунды и умножая 256 на 8000, получим скорость передачи 2,048 Мбит/с. Нетрудно рассчитать, что время передачи одного двоичного разряда составляет 488 наносекунд. Если это время сократить до величины около 100 нс, в цикле удастся разместить не 256, а $256 \times 4 = 1024$ двоичных разрядов. Именно такое количество информационных разрядов нужно передать за один цикл в аппаратуре ИКМ-120.

Теперь обратим внимание на то, что учетверенная скорость передачи нижестоящего уровня всегда меньше скорости передачи вышестоящего уровня. Например, $2,048 \times 4 = 8,192$ Мбит/с, тогда как скорость передачи аппаратуры ИКМ-120 составляет 8,448 Мбит/с. «Лишние разряды» вышестоящего уровня нужны не только для решения специфических задач аппаратуры ИКМ-120. Здесь мы и подходим к объяснению понятия «плезиохронная иерархия». Дело в том, что поддержание строгого синхронизма в сети связи – задача чрезвычайно трудная, особенно если эта сеть – большой протяженности. Гораздо проще иметь в каждом узле или даже в каждом комплекте аппаратуры ИКМ-30 (особенно, если эти комплекты находятся в разных местах) собственный генератор тактовой частоты. Требования к стабильности такого генератора – не очень высокие: допустимая нестабильность – 5×10^{-5} . Поэтому четыре комплекта аппаратуры ИКМ-30, которые должны составить поток системы ИКМ-120, могут работать с неодинаковыми скоростями передачи. Для выравнивания этих скоростей применяются накопителя (буферная память), запись в которые осуществляется со скоростями работы каждого из комплектов ИКМ-30, а считывание – с единой тактовой частотой, задаваемой аппаратурой ИКМ-120. Из-за небольшого различия частот генераторов разных комплектов аппаратуры может возникнуть либо переполнение накопителя (если скорость записи выше скорости считывания).

вания), либо его опустошение (когда скорость считывания выше скорости записи). Для борьбы с этими явлениями применяется подстановка холостых разрядов или передача лишнего разряда резервным путем. Этот способ называется *стаффингом*, причем при подстановке дополнительных битов говорят о положительном стаффинге, а при передаче лишних разрядов резервным путем – об отрицательном стаффинге. Более просто работать с положительным стаффингом, когда считывание производится с большей скоростью, чем запись, и нужно только в соответствующие моменты времени подставлять холостые разряды (которые после передачи удаляются на основании одновременно передаваемой информации о местах вставок). Кроме того, сигнал на выходе аппаратуры более высокого уровня иерархии должен быть дополнен сигналами цикловой синхронизации и некоторыми вспомогательными сигналами. Именно это и объясняет применение «лишних» разрядов, т.е. более высокой скорости передачи на вышестоящем уровне иерархии, чем учетверенная скорость нижестоящего уровня.

Сопряжение базового доступа ЦСИО. Рассмотрим теперь стандартную структуру сопряжения базового доступа ЦСИО согласно рекомендации I.411. Здесь латинскими буквами R, S, T, U и V обозначены пять стандартных эталонных точек, на которые часто можно встретить ссылки в литературе. Кроме того, через T1 обозначен терминал (абонентское устройство) ЦСИО, подключаемый по четырехпроводной схеме, а T2 – терминал, не удовлетворяющий требованиям ЦСИО и подключаемый поэтому через терминальный адаптер TA. Примером такого терминала может служить последовательный порт компьютера, который требует трансляции сигналов в эталонной точке R в формат, совместимый с ЦСИО. Эталонная точка S является важным элементом стандартизации аппаратуры связи, и для неё даются подробные описания характеристик приёма-передачи, структуры кадра, скорости передачи, порядка включения – выключения, процедур абонентского доступа. Эта точка подключается к двухпроводной абонентской линии (симметричный кабель парной скрутки, соответствующий эталонной точке U) через сетевые оконечные блоки (Network Terminations) NT-1 и NT-2. Блок NT-2 соответствует учрежденческой АТС или контроллеру терминала и может отсутствовать (тогда эталонная точка T совпадает с эталонной точкой S и часто обозначается S/T). Блок же NT-1 выполняет функции физического сопряжения с линией, а также некоторые эксплуатационные функции. Например, к этому блоку могут быть подсоединены телефонный аппарат, факсимильный аппарат и компьютер. Каждый из этих приборов может получать вызовы, но подключение прибора к каналу типа В происходит только после идентификации сообщения и соответствующей услуги. На станционной стороне предусматривается линейное окончание ЛО и абонентский комплект АК, подключение к которому осуществляется через эталонную точку V. Из изложенного очевидно, что если к ЦСИО общего пользования требуется подключить небольшую корпоративную сеть, она подключается по схеме включения блока NT-2. При необходимости же подключения более крупной корпоративной сети, вместо описанного базового интерфейса используется первичный интерфейс. Он позволяет организовать связь корпоративной сети с сетью общего пользования с помощью тракта передачи со скоростью 2,048 кбит/с, т.е. системы E1.

В специфических условиях нашей страны, где работы по созданию современной сети связи общего пользования серьезно отстают от реальных потребностей страны, техника плезиохронной цифровой иерархии получает широкое распространение в корпоративных сетях ряда ведущих отраслей народного хозяйства. Например, на железнодорожном транспорте еще в 1980-х гг. на всех железных дорогах было установлено довольно много комплектов аппаратуры ИКМ-30 для уплотнения соединительных линий на местных сетях обще технологической связи. Впоследствии цифровая связь начала использоваться и для нужд оперативно-технологической связи. Например, известна разработка аппаратуры ИКМ-120Т, которая отличается от ИКМ-120 более гибкими возможностями выделения отдельных 30-канальных групп. Современная концепция построения железнодорожной оперативно-технологической связи, утвержденная Департаментом информатизации и связи МПС Российской Федерации, серьезно ориентирована на применение цифровых сетей плезиохронной иерархии на всех уровнях управления железнодорожным транспортом. В настоящее время создается магистральная сеть волоконно-оптических линий связи на основе синхронной цифровой иерархии (STM-1: 155,52 Мбит/с; STM-4: 622,08 Мбит/с; STM-16: 2,4488 Гбит/с). В этой сети в качестве стандартных пучков, формируемых в сетях доступа, наиболее широкое применение получают системы E1. Для подключения низкоскоростных каналов на уровне сети доступа применяются мультиплексоры, которые отличаются достаточно высокой гибкостью.

Наряду с описанным базовым доступом применяется также первичный доступ. Здесь слово «первичный» относится к первому уровню плезиохронной цифровой иерархии. Главной функцией первичного доступа является передача 30 каналов типа В и одного канала сигнализации D со скоростью передачи 64 Кбит/с. Цикловая структура первичного доступа У-ЦСИО, обозначаемая 30В+D, соответствует структуре потока E1 в форме ИКМ-31. Структура первичного доступа во многом аналогична структуре базового доступа, описанного выше. Основу интерфейса также составляет схема 3.14 с той лишь разницей, что вместо стандартных интерфейсов S и U используются интерфейсы S_{2M} и U_{K2}. В процессе разработки услуг У-ЦСИО были проведены широкие исследования возможностей передачи изображений как по одному базовому каналу, так и по группе базовых каналов, в частности, со скоростью 384 Кбит/с. Однако в настоящее время актуальность этих разработок снизилась в связи с появлением новых систем передачи.

1.5. Общеканальная сигнализация и интеллектуальная сеть

Системы внеполосной сигнализации, обсуждавшиеся выше, были рассчитаны на привязку каждого канала сигнализации к управляемому телефонному каналу. Дальнейшее развитие систем сигнализации в телефонных сетях пошло по пути организации *общих каналов сигнализации* с адресным способом передачи сообщений. Это направление связано с процессом конвергенции средств связи и вычислительной техники, когда телефонные станции стали оснащаться средствами *программного управления*. Такие станции позволяют значительно снизить эксплуатационные расходы за счет широкого внедрения процессов автоматического контроля исправности оборудования, сокращения объема и стоимости аппаратных средств сигнализации за счет компьютерной памяти и высокой скорости обработки информации. Программное управление позволяет вводить новые услуги связи и повышать гибкость управления потоками нагрузки в сети. Первая система сигнализации по общему каналу для междугородной телефонной связи была принята МККТТ в 1977 г. и получила название системы сигнализации № 6 (предыдущие номера относились к разработкам систем сигнализации, привязанным к управляемым каналам). Кроме некоторых чисто технических недостатков, система № 6 предназначалась только для телефонной сигнализации, предъявляла высокие требования к каналам связи и работала со скоростью передачи не выше 2400 бит/с. Расширение цифровых сетей и предоставляемых ими услуг потребовало устранить эти недостатки. В результате возникла *система общеканальной сигнализации № 7 (ОКС-7)*, требования к которой были определены МККТТ в 1981 г. и в дальнейшем закреплены в рекомендациях серии Q.700.

Система ОКС-7. Система ОКС-7 представляет собой специализированную *сеть передачи данных*, которая накладывается на сеть связи общего пользования и служит для передачи сигналов управления работой этой сети. Сеть ОКС-7 имеет собственные цифровые каналы передачи и узлы связи, называемые пунктами сигнализации. *Пункт сигнализации* может располагаться вместе с узлом управляемой сети связи или может быть географически от него отделен. Иначе говоря, путь передачи сигналов управления может совпадать с путем передачи информации, но может и проходить по независимому маршруту. В последнем случае говорят о неассоциативном способе работы системы сигнализации. Система ОКС-7 работает по принципу коммутации пакетов и согласована с эталонной моделью ВОС МОС. При этом, рассматривая структуру организации сети ОКС-7, нужно учитывать, что по схеме многоуровневой модели строится не только сама управляемая сеть связи, но и сеть ОКС-7. Поэтому во избежание недоразумений семь уровней эталонной модели ВОС МОС, относящиеся к самой управляемой сети связи, будем называть уровнями, а семь уровней, относящихся к сети сигнализации ОКС-7, назовем слоями.

Система ОКС-7 состоит из двух основных частей: подсистемы пользователя и подсистемы передачи сообщений. *Подсистема пользователя* может быть реализована в нескольких версиях в зависимости от типа пользователя, т.е. от тех протоколов верхних уровней, которые предоставляют услуги связи конкретным пользователям. Это могут быть пользователи традиционной телефонной сети, сети передачи данных с коммутацией каналов, узкополосной цифровой сети интегрального обслуживания У-ЦСИО, а также это может быть система испытаний и технического обслуживания сети. Подсистема пользователя получает услугу передачи информации, которую предоставляет ей *подсистема передачи сообщений*. Это – транспортная услуга без установления соединений, называемая передачей *датаграмм*, однако она отличается тем, что обеспечивает упорядоченную последовательность передачи. В многоуровневой архитектуре ОКС-7 подсистема передачи сообщений включает слои 1-3, которые соответствуют в архитектуре ВОС уровням 1 и 2, а также нижней части уровня 3, на котором сравниваются эти две архитектуры. Подсистема передачи сообщений обозначена на этом рисунке ППС (вертикальная надпись с правой стороны нижнего прямоугольника). Она является частью подсистемы сетевых услуг ПСУ, куда входит еще функциональный блок, обозначенный ПУСС (подсистема управления сигнальными соединениями) и обеспечивающий обращение подсистемы передачи сообщений к сетевой услуге (как ориентированной на установление соединения, так и без установления соединения) в соответствии с моделью ВОС МОС. Обратим внимание на то, что высшие уровни модели ВОС связываются с ПУСС непосредственно.

Многослойная модель системы ОКС-7 предусматривает также возможности доступа сетевых прикладных процессов 3-го уровня эталонной модели ВОС к блоку ПУСС и подсистеме передачи сообщений через многослойную модель, эквивалентную модели ВОС, но находящуюся полностью в пределах сетевого уровня. Эти слои показаны в виде сетевой подсистемы прикладных услуг, которая обозначена N.ППУ и в системе ОКС-7 имеет номера слоёв 4-4, 4-5 и 4-6. Сетевые приложения (обозначенные как N-приложения) – это объекты, пользующиеся услугами сетевой подсистемы прикладных услуг N.ППУ подсистемы ПУСС и подсистемы передачи сообщений. Это могут быть не только такие прикладные процессы, как обработка телефонных вызовов, но и более широкий круг приложений (например, управление базой данных – УБД), которые обсуждаются в этом разделе ниже. Обычно подобные приложения требуют передачи коротких сообщений (*транзакций*) без установления соединений, в виде прикладной подсистемы

темы с возможностями транзакций ППВТ. Также различные подсистемы пользователя входят в модель на разных уровнях иерархии. Например, подсистема пользователя ЦСИО имеет дело только с услугами сети и поэтому фигурирует на сетевом уровне. Подсистема пользователя, находящаяся на сетевом уровне, но требующая услуг представления, организации сеанса и транспорта, подобных услугам модели ВОС, получает их от слоёв N.ППУ. Подсистемы же пользователей, лежащих за пределами самой сети, требуют услуг прикладного уровня ВОС. Примером подобной подсистемы является подсистема испытаний и технического обслуживания ПИТ. Но независимо от того, где именно в многоуровневой эталонной модели появляется конкретная подсистема пользователя, в конечном счете, она требует обслуживания от подсистемы передачи сообщений. Каждая подсистема пользователя, будь то подсистема телефонных услуг, ЦСИО, ПИТ или любая другая, имеет стандартные сообщения и процедуры, определяемые для конкретного вида услуги. Например, в подсистеме телефонных услуг должны быть установлены рабочие процедуры межстанционной сигнализации. Это как раз сигналы установления соединения, разъединения, ответа и другие сигналы управления телефонной связью. Их применение и обработка являются функциями подсистемы пользователя, и в этом случае они должны появляться в слое 4, а при необходимости и в высших слоях. Услуга же передачи информации по сети предоставляется подсистемой передачи сообщений (слои 1-3). Из них первый слой является физическим, а второй – слоем управления каналом, Этот слой управляет процессами передачи сообщений между двумя пунктами сигнализации. Наконец, третий слой подсистемы передачи сообщений отвечает за распределение сообщений и управление сетью ОКС.

Остановимся вкратце на уровне (или слое) канала. Подробно протокол уровня канала, который широко применяется в системах передачи данных, в том числе и в системе ОКС-7. Однако в системе ОКС-7 принята собственная терминология и имеются некоторые особенности, которые подробно рассматриваются в специальной литературе и технической документации по ОКС-7. Например, канал здесь обычно называют звеном (от английского слова link), а блоки данных уровня канала называются не кадрами, а *сигнальными единицами*. Различают три типа сигнальных единиц: информационная, или *значащая сигнальная единица ЗНСЕ* (английское обозначение MSU - Message Signal Unit), *сигнальная единица состояния звена СЕСЗ* (LSSU – Link Status Signal Unit) и *заполняющая сигнальная единица ЗСЕ* (FISU – Fill In Signal Unit). Первый тип сигнальных единиц служит для передачи сообщений, которые размещаются в информационной части сигнальной единицы. Кроме того, сигнальная единица имеет заголовок, несущий служебную информацию. Второй тип – СЕСЗ – используется для контроля состояния канала (звена) сигнализации и применяется в начале передачи или при восстановлении канала после сбоя в работе. Заполняющие же сигнальные единицы ЗСЕ применяются для передачи положительных и отрицательных подтверждений в моменты, когда отсутствует нагрузка сигнализации. Система ОКС-7 работает со скоростью передачи 64 Кбит/с. Она оптимизирована для работы в цифровых сетях связи с узлами, оснащенными средствами программного управления.

Интеллектуальная сеть. Оснащение сетей связи общего пользования системой ОКС-7 выводит эти сети на качественно новый уровень. Если раньше речь шла о средствах программного управления только отдельными узлами связи, то теперь можно говорить о программном управлении работой всей сети. Действительно, теперь появляется возможность разместить элементы программного управления в разных местах сети, а обмен информацией между отдельными программными средствами осуществлять через сеть ОКС-7. Распределенную систему программных средств, связанных между собой сетью ОКС-7, принято называть *интеллектуальной сетью*. После ввода в эксплуатацию первой интеллектуальной сети в США специалисты отмечали, что раньше телефон был телефоном, а компьютер был компьютером, и любой человек мог объяснить разницу между ними. Однако сегодня стало обычным использование в телефонах компьютерной памяти, компьютерного интеллекта и даже компьютерных экранов, а для вычислительной техники важной потребностью стало построение сетей, давно применявшихся в телефонной связи. Конечная цель всех этих нововведений – доставка нужной информации конкретному человеку в надлежащее время и любое место, что делает наш труд более продуктивным, а нашу жизнь более комфортной. Для претворения этих идей необходимо объединить все полезное, получаемое от телефонной связи, со всем полезным, ожидаемым от вычислительной техники.

Развитие интеллектуальной сети – сложный процесс, состоящий из ряда этапов. На первом этапе предполагается развертывание в сети связи узлов коммутации с программным управлением, включая введение минимального набора дополнительных услуг связи, или, как часто говорят, дополнительных видов обслуживания (ДВО). Следующий этап может включать распространение ДВО на станции и узлы без программного управления. Наконец, наступает этап создания интеллектуальной сети, в которую входят узлы управления услугами и базы данных, с помощью которых расширяется набор ДВО. Первый стандартный набор услуг, получивший название CS-1 (от английских слов Capability Set, т.е. набор возможностей) был описан в рекомендации Q.1211. Он включал установление соединения по кредитной карте, создание виртуальной частной сети, «бесплатное» соединение (имеется в виду соединение, оплачиваемое вызываемым абонентом), доленое участие в оплате услуги, универсальная персональная связь, телеголо-сование и ряд других услуг. Услуги подобного рода могут предоставляться только с помощью интеллек-

туальной сети. Рассмотрим, например, услугу бесплатного соединения, которая уже давно получила широкое распространение в США, где она известна под названием услуги «800». Абонент сети, желающий установить такое соединение, набирает перед национальным телефонным номером код 800. При получении такого кода, телефонная станция, на которую поступил соответствующий вызов, автоматически направляет через сеть ОКС-7 запрос в сетевую базу данных, которая может находиться в любом месте сети. Формирование такой базы данных производится по заявлениям абонентов, которые изъявляют готовность оплачивать входящие к ним соединения. После получения подтверждения о наличии набранного номера в базе данных станция устанавливает соединение обычным путем. В последующие годы в МСС были приняты также стандартные наборы CS-2, CS-3 и CS-4, что позволяет существенно разнообразить услуги сетей связи общего пользования.

Кроме услуг связи, предоставляемых пользователям, интенсивно развиваются применения интеллектуальных технологий к задачам управления и технического обслуживания сетей связи. В этой области также применяются распределенные интеллектуальные системы, которые объединяют различные функциональные элементы. Между ними происходит обмен сообщениями по определенным протоколам. Соответствующая архитектура, предусматривающая возможности управления разнородным оборудованием, получила название сети управления связью TMN (Telecommunication Management Network). Эта сеть также является предметом стандартизации и рассматривается в рекомендации М.3010. Таким образом, можно говорить о двух параллельных интеллектуальных сетях, создаваемых для управления сетями связи. Хотя фактически эти две сети должны обсуждаться не отдельно, а рассматриваться вместе с распределенными средствами вычислительной техники и объектно-ориентированным программным обеспечением. Именно такая идея лежит в основе американской концепции TINA (Telecommunication Information Networking Architecture, т.е. архитектура информационных сетей управления средствами связи). Задача такой архитектуры – создание единых стандартов на распределенное управление сетями связи с использованием средств искусственного интеллекта.

1.6. Широкополосные ЦСИО и технология АТМ

Принцип действия сети АТМ можно уяснить из фрагмента. Ради простоты здесь показана только передача в одном направлении. Четыре маршрута разных типов, установленные в этой сети между абонентами, обозначенными А, В, С, D и Е, показаны ячейками с различной штриховкой. Маршруты могут быть одноадресными (как между абонентами А и В, связь между которыми показана белыми ячейками без штриховки) или многоадресными (как между абонентом А и абонентами С, D и Е, ячейки черного цвета). Кроме того, абонент может участвовать одновременно в нескольких соединениях, причем несколько таких соединений, установленных между конкретной парой абонентов, могут проходить по разным маршрутам (например, два маршрута между абонентами В и Е, показанные ячейками с разной штриховкой). Чтобы понять, почему появилась такая техника и для чего она нужна, нужно проследить за некоторыми этапами истории развития цифровой техники связи.

Ранее обсуждались узкополосные ЦСИО, которые позволяют предоставлять абонентам разнообразные услуги по цифровым линиям передачи с фиксированной скоростью. В этом случае прогресс в деле интеграции услуг на основе цифровых методов передачи налицо, но, как уже говорилось, преодолены далеко не все трудности. Во-первых, узкополосная ЦСИО не даёт возможность абоненту получить коммутируемый канал с любой нужной ему скоростью передачи, хотя выбор здесь и расширился. Например, в У-ЦСИО, кроме упомянутых каналов со скоростями передачи 16 и 64 кбит/с, находят применение каналы со скоростями 384 и 2048 кбит/с, которые получаются путем объединения соответственно 6 и 30 базовых цифровых каналов. Таким образом, для конкретной услуги абонент может выбрать ближайшую из предлагаемых скоростей, но это может быть связано с большим перерасходом ресурсов. Во-вторых, У-ЦСИО обычно не может предоставить абоненту высокоскоростной канал для видео-передачи или для передачи больших массивов компьютерных данных со скоростью, соизмеримой со скоростью переписывания файлов с магнитных дисков в оперативную память внутри ЭВМ. Поэтому узкополосные ЦСИО не получили столь широкого распространения, на которое рассчитывали их создатели. Развитие услуг мультимедиа, требующих одновременной передачи нескольких потоков данных, в том числе видеоизображений, сделали У-ЦСИО недостаточно привлекательной для пользователей.

С появлением высокоскоростных систем передачи (вплоть до скоростей, измеряемых гигабитами в секунду) потребовались аппаратные средства, которые могли бы выделять в этих системах каналы с нужной скоростью и коммутировать их. Именно такие задачи решает *широкополосная ЦСИО (Ш-ЦСИО)*, для реализации которой и была предложена технология АТМ. Пример широкополосной ЦСИО, содержащей три узла доступа, к которым подключаются абонентские линии, и два транзитных узла, выполняющих только функции коммутации. Между узлами проложены линии передачи ЛП-1, ЛП-2, ЛП-3 и

ЛП-4. В рассматриваемой сети сформированы три *виртуальных пути*: первый из них ВП-1 связывает левый узел доступа с правым, а виртуальные пути ВП-2 и ВП-3 связывают верхний узел доступа соответственно с левым и правым узлами доступа. В процессе работы сети в каждом из виртуальных путей могут устанавливаться и закрываться многочисленные *виртуальные каналы*. Из них на рисунке обозначены только виртуальные каналы ВК-1 и ВК-2 между левым и верхним узлами доступа, а также отмечены три виртуальных канала между верхним и правым узлами доступа и четыре виртуальных канала между верхним и левым узлами

Технология АТМ использует ячейки фиксированного размера, состоящие из 5-байтового заголовка и 48-байтового информационного поля. Можно отметить несколько преимуществ использования небольших ячеек фиксированного размера. Во-первых, применение таких ячеек может уменьшить задержку в очереди для высокоприоритетных ячеек. Во-вторых, как показала практика, ячейки фиксированного размера можно коммутировать более эффективным образом, что очень важно при высоких скоростях передачи. Существуют два интерфейса «пользователь-сеть», и интерфейс «сеть-сеть». Основное поле управления потоком ОПУП выполняет местные функции и поэтому внутри сети не поддерживается. Зато внутри сети расширяется поле индикатора виртуального пути ИВП, для которого достаточно 8 разрядов в первом случае и отводится 12 разрядов во втором. Это естественно, так как в сети нужно поддерживать большее число виртуальных путей, чем у конкретного пользователя. Для маршрутизации от оконечного пользователя и к оконечному пользователю применяется индикатор виртуального канала ИВК, содержащий 16 разрядов. На основании приведенных цифр нетрудно подсчитать, какое большое число виртуальных путей и виртуальных каналов может одновременно поддерживаться в сети, основанной на применении технологии АТМ (или, как говорят короче, в сети АТМ).

Большое значение имеет поле типа полезной нагрузки ТПН, которое указывает на характер информации, содержащейся в информационном поле ячейки. Первый разряд этого поля указывает на информацию пользователя (если он установлен в положение 0) или на информацию, относящуюся к управлению или техническому обслуживанию (если он установлен на 1). Остальные разряды этого поля указывают в первом случае на характер услуги и наличие перегрузки в сети, а во втором случае на принадлежность информации к эксплуатации и техническому обслуживанию сети или управлению ресурсами. Поле приоритета сбрасывания ячейки ПСЯ содержит один разряд и используется для управления сетью в случае перегрузки. Значение 0 указывает на ячейку более высокого приоритета, которая по возможности не должна сбрасываться, а значение 1 показывает, что ячейка при перегрузке может быть сброшена. Сеть может установить это поле в положение 1, если обнаружит нарушение абонентом договоренности относительно параметров нагрузки между пользователем и сетью. Дело в том, что процедура установления соединения предусматривает обмен информацией между пользователем и сетью о характере ожидаемой нагрузки, и в сети предусматриваются средства контроля над соблюдением достигнутых договоренностей.

Каждая ячейка содержит также 8-разрядное поле контроля ошибок заголовка КОЗ. Обратим внимание на то, что понятия обнаружения и исправления ошибок в теории кодирования несколько отличаются от наших привычных представлений о подобных понятиях при работе с текстами. Если мы говорим, что в тексте обнаружена ошибка, мы обычно подразумеваем, что найден конкретный ошибочный символ, а исправление ошибки состоит в замене этого символа на правильный. Если же мы находим конкретный ошибочный символ при двоичной передаче, это автоматически означает, что мы его исправили, так как у этого символа могут быть только два возможных значения. Обнаружением же ошибки в технике цифровой передачи называется просто обнаружение факта существования ошибки в двоичной последовательности. Обнаружение основано на алгебраической теории и сводится к следующему. Известно, что степенной многочлен представляет собой общее выражение для числа. Например, запись вида

$$a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0$$

обозначает некоторое число, содержащее $n+1$ разрядов, где x – основание системы счисления, а a - цифры, стоящие в соответствующих разрядах, причем число различных цифр равно основанию системы счисления. При десятичной системе счисления цифра a может означать любую из десяти цифр, и работа с подобным многочленом является довольно громоздкой. Дело существенно упрощается, когда числа записываются в двоичной системе счисления. Если рассматривать последовательность двоичных разрядов как многочлен соответствующей степени и разделить такой многочлен на другой, специально подобранный многочлен, называемый порождающим (в данном случае это многочлен $x^8 + x^2 + x + 1$), то в общем случае получится некоторый остаток. Для записи этого остатка в двоичной системе счисления потребуется не более 8 символов. Именно этот остаток записывается стороной, передающей ячейку, в поле КОЗ и может служить для проверки результата деления принятой последовательности на тот же самый порождающий многочлен, которое выполняется стороной, принимающей ячейку. Несовпадение результата свидетельствует, что последовательность принята неправильно, т.е. в ней обнаружена ошибка. В нашем случае проверке подлежит небольшая фиксированная последовательность из 32 разрядов заголовка ячейки. Тот факт, что эта информация имеет сравнительно небольшой объем, позволяет использовать

КОЗ не только для обнаружения ошибки, но и в некоторых случаях для фактического её исправления. В этом случае по характеру получающегося остатка от деления при появлении одиночной ошибки удаётся определить конкретное местоположение ошибочного символа, что при двоичной системе счисления равноценно его исправлению. При работе системы приёмник по умолчанию находится в режиме исправления ошибки в отдельном разряде. Если ошибка не обнаружена, приёмник остаётся в режиме исправления ошибки. Если обнаружится ошибка, приёмник её исправит (если это одиночная ошибка) или обнаружит, что произошла ошибка в нескольких разрядах. В любом случае приёмник переходит в режим обнаружения ошибки, и будет оставаться в этом режиме, пока принимаются ошибочные символы. Причина такой организации работы состоит в том, что случайные помехи или другие причины могут вызвать серию ошибок, для исправления которой КОЗ недостаточен. Если же при очередной проверке заголовка в нём ошибка не обнаружится, приёмник переходит опять в режим исправления.

Виртуальный канал устанавливается только при наличии соответствующего виртуально пути и возможности обеспечить требуемую пропускную способность. Процесс установления виртуального пути отличается от процесса установления отдельного виртуального канала тем, что механизм установления виртуального пути включает расчеты маршрутов, распределение пропускной способности и накопление информации о состоянии соединений. Поэтому для установления виртуального канала сначала должен существовать виртуальный путь к требуемому узлу назначения с достаточной свободной пропускной способностью.

Сеть АТМ разрабатывалась для того, чтобы одновременно передавать множество разных типов нагрузки, включая потоки в реальном времени (например, речь или изображения), а также потоки данных по протоколу TCP сети Интернет. Несмотря на то, что любой из потоков обрабатывается как поток 53-байтовых ячеек, передаваемых по виртуальному каналу, путь, по которому направляется каждый поток в сети, зависит от характеристик потока и требований конкретного применения. Например, видеопередача в реальном времени должна проходить с минимальными колебаниями задержек. В целях наиболее эффективного использования каналов передачи и сети в целом, Форум АТМ определил следующие категории услуг:

Услуги в реальном времени:

- с постоянной скоростью передачи (CBR – Constant Bit Rate),
- с переменной скоростью передачи (rt-VBR - real time Variable Bit Rate).

Услуги без сохранения реального масштаба времени:

- с переменной скоростью передачи (nrt-VBR - non real time Variable Bit Rate),
- с доступной скоростью передачи (ABR – Available Bit Rate)
- с не оговоренной скоростью передачи (UBR – Unspecified Bit Rate).

Самое важное различие среди применений касается задержек и колебаний задержек, вызываемых джиттером (дрожанием фазы), которые могут быть допущены при передаче. Применения в реальном времени обычно требуют, чтобы поток информации, поступающий к пользователю, правильно воспроизводил тот поток, который исходит от источника. Например, поток аудио и/или видеопередачи должен быть представлен в непрерывном сглаженном виде. Нарушение непрерывности или чрезмерные потери приводят к значительной потере качества. Применения, которые требуют взаимодействия между людьми, связаны с жесткими ограничениями задержки. Обычно становится заметной и раздражает любая задержка свыше нескольких сотен миллисекунд. Поэтому требования к сети АТМ в области передачи и коммутации в реальном времени достаточно высоки. Наиболее простой по определению является постоянная скорость передачи, которая применяется там, где требуется фиксированная скорость передачи, непрерывно доступная в продолжение всего соединения, а также сравнительно жесткая верхняя граница задержки передачи. Типичным примером передачи в реальном масштабе времени с переменной скоростью передачи является цифровая передача изображений по стандарту MPEG, при которой скорость повышается в моменты изменения изображаемых сцен. Услуги без сохранения реального масштаба времени предназначены для применений, характеризующихся пачечной нагрузкой и не предъявляющих жестких требований к задержкам и колебаниям задержек. При этом сеть приобретает большую гибкость при обработке потоков такой нагрузки, так как может в большей степени использовать статистическое мультиплексирование для повышения эффективности работы. В любой момент времени часть пропускной способности сети АТМ расходуется на передачу нагрузки с **постоянной скоростью** и **переменной скоростью** как в реальном времени, так и без соблюдения требований реального времени. Если не все ресурсы сети предоставлены этим двум видам нагрузки или в некоторые моменты времени из-за пачечного характера нагрузки с переменной скоростью передачи используется не вся предоставленная пропускная способность, возникает дополнительная пропускная способность. Вся эта неиспользуемая пропускная способность может быть предоставлена услуге с **неоговоренной скоростью** передачи. Такая услуга пригодна для применений, которые могут допустить изменяющиеся задержки и даже потери некоторых ячеек. При такой услуге ячейки передаются в порядке поступления с использованием пропускной способности, не занимаемой другими услугами. Наряду с этим, для улучшения обслуживания источников

пачечной нагрузки (например, пользователей протокола TCP), которые иначе воспользовались бы услугой с неоговоренной скоростью передачи, была определена услуга с *доступной скоростью* передачи.

Применения, использующие услугу с доступной скоростью передачи, указывают пиковую скорость передачи ячеек, которую они могут использовать, и минимальную скорость, которая требуется для этого применения. Сеть распределяет ресурсы так, что все применения с доступной скоростью передачи получают, по крайней мере, их минимальную пропускную способность. Таким образом, любая неиспользуемая пропускная способность справедливо распределяется между всеми пользователями с доступной скоростью передачи. Любая же пропускная способность, не используемая источниками с доступной скоростью, остается для использования пользователями услуги с неоговоренной скоростью передачи.

1.7. Доступ к информационным услугам по абонентским линиям

На рисунке показана общая схема информационной сети будущего, построенная по принципу взаимодействия «клиент-сервер». Эта сеть обеспечивает взаимосвязь между различными пользователями, которые показаны в левой колонке, и различными приложениями, предусмотренными в серверах сетевых услуг (правая колонка). Логическое разделение сетей и услуг позволит более эффективно реализовать приложения. Такое разделение освободит сети от ограничений физической структуры и позволит сосредоточиться на требованиях к услугам. Нагрузка «клиент-сервер» пропускается через магистральную сеть (третья колонка), которая представляет собой высокоскоростную сеть, использующую оптические средства передачи информации, а в перспективе и фотонную коммутацию. Внедрение волоконно-оптических линий связи привело к фантастическому увеличению пропускной способности современных сетей. За последние 10-15 лет во всем мире скорости передачи информации по сетям связи увеличились в десятки и сотни тысяч раз. Это открывает замечательные перспективы создания и развития самых разнообразных информационных услуг и услуг связи. Но при этом главным узким местом на пути широкого предоставления пользователям новых услуг является абонентский доступ. Абонентская линия рассчитана только на передачу телефонного разговора, т.е. на довольно узкую полосу передаваемых частот. Говорить о замене этой линии оптическим волокном в сколь либо широких масштабах совершенно бессмысленно: это было бы сопряжено с непомерными затратами, не говоря о технических трудностях. Во второй колонке показаны четыре основных способа доступа к информационным услугам, которые вкратце обсуждаются ниже.

Как видно на рисунке, первая такая возможность – применение волоконно-оптической линии. Её использование может быть экономически оправдано для доступа различных сетей предприятий. Вторая возможность – так называемый кабельный доступ. Здесь имеется в виду доступ по сетям кабельного телевидения, которые получили довольно широкое распространение в ряде стран, а особенно в США. Для доступа абонентов таких сетей к информационным услугам за рубежом выпускаются так называемые «кабельные модемы», предназначенные для работы по коаксиальным кабелям и характеризующиеся гораздо более высокими скоростями передачи, чем модемы, работающие по телефонным линиям. Четвертая из возможностей, показанных во второй колонке - беспроводный доступ. Перспективы применения этого способа доступа обсуждаются в гл.6. Однако для самого массового пользователя представляет интерес третья возможность – доступ по коммутируемой телефонной сети общего пользования. Эта возможность существенно расширяется, если вместо работы по аналоговой телефонной линии с применением модема, перейти к работе по цифровым абонентским линиям (ЦАЛ, или по-английски, DSL - Digital Subscriber Line).

Впервые о цифровых абонентских линиях заговорили в 1960-1970-х гг., когда начался переход аналоговых телефонных сетей на цифровую технику с применением ИКМ, о чем обсуждалось выше. Однако вариант линии ЦСИО, который показан в первой строке таблицы 1.2, является далеко не единственной системой цифровой абонентской линии. В англоязычной литературе для классификации ЦАЛ применяется обозначение xDSL, где DSL означает, как уже говорилось, цифровую абонентскую линию, а вместо x может быть подставлена буква английского алфавита, конкретизирующая тип цифровой абонентской линии. Некоторые из таких обозначений приводятся в таблице 1.2, которая содержит также характеристики линий по данным зарубежных источников.

Таблица 1.2. Некоторые типы цифровых абонентских линий

| Тип линии | Скорость передачи по линии | Максимальная длина |
|-----------|----------------------------|--------------------|
| IDSL | 144 кбит/с (2B+D) | 6 – 8 км |

| | | |
|------|-----------------------------|----------|
| HDSL | 1 Мбит/с | 4 – 6 км |
| SDSL | От 128 кбит/с до 1,5 Мбит/с | 4 км |
| ADSL | От 1,5 Мбит/с до 7 Мбит/с | 4 – 6 км |
| VDSL | До 52 Мбит/с к абоненту | 0,3 км |

В первой строке таблицы приводятся характеристики рассмотренной ЦАЛ У-ЦСИО. Как показал зарубежный опыт, эта линия не получила очень широкого распространения. Хотя она предоставляет абоненту одновременно три независимых канала для получения разнообразных информационных услуг, тарифы за пользование такой линией гораздо выше тарифов за пользование традиционной телефонной линией. Это связано с тем, что подключение подобной линии требует замены оборудования телефонных станций (узлов коммутации). Однако скорость передачи по таким линиям недостаточна для получения современных услуг. Поэтому как пользователи и поставщики услуг, так и разработчики новой техники связи, сосредоточили внимание на возможностях повышения скоростей передачи по ЦАЛ. Например, кроме систем базового доступа ЦСИО, исследовались возможности так называемого первичного доступа к полному или частичному тракту передачи ИКМ. Такие возможности отражены во второй и третьей строках таблицы 1.2, где HDSL (High bit-rate Digital Subscriber Line) означает высокоскоростную цифровую абонентскую линию, а SDSL - частичный или полный доступ по цифровым каналам ИКМ-24.

Особый интерес представляют две последние позиции, требующие определенной реконструкции абонентской сети, а именно: асимметричная цифровая абонентская линия (АЦАЛ, или по-английски, ADSL - Asymmetric Digital Subscriber Line) и сверхвысокоскоростная цифровая абонентская линия (СВЦАЛ, или по-английски, VDSL – Very high speed Digital Subscriber Line). Остановимся вкратце на принципах получения таких высоких скоростей передачи. Для асимметричных цифровых абонентских линий широкое распространение получила дискретная многотональная передача DMT (Discrete Multi Tone). В основе этой системы лежит идея использования достижений в области техники модемов. Различие между модемом, предназначенным для работы по аналоговому телефонному каналу, и цифровой абонентской линией состоит в том, что модем предназначен для работы на любое расстояние, а цифровая абонентская линия – только на небольшие расстояния, указанные в таблице 2.2. Это различие связано с тем, что телефонный канал дальней связи проходит через многочисленные устройства многоканальной связи, и его полоса частот строго выдерживается в стандартных пределах (300 - 3400 Гц). Абонентская же линия не имеет никаких ограничений по полосе частот, кроме того, что с ростом частоты и протяженности растет затухание сигнала. Поэтому по такой линии можно организовать целый пучок частотных каналов, имеющих пропускную способность модема. Например, один из американских стандартов предусматривает для работы в сторону абонента 256 частотных полос (называемых «субканалами») шириной по 4312,5 Гц каждая. Подлежащие передаче двоичные разряды записываются в накопителе, откуда направляются в кодер через блок предварительного контроля ошибок ПКО, вносящий некоторую избыточность в передаваемую последовательность с целью защиты разрядов от помех. Затем в кодере данные поступающие разряды распределяются по субканалам по специальной таблице. Другая таблица задает распределение энергии по субканалам с учетом неравномерного затухания сигналов отдельных субканалов. Сформированный таким образом спектр сигнала должен быть передан в приёмник. Однако сигнал обычно передается в виде функции времени, а не в виде частотного спектра. Описание сигнала во времени и его спектр связаны между собой преобразованием Фурье. В цифровой технике подобное преобразование выполняется численно с использованием быстрых алгоритмов. Поэтому перед передачей в линию спектр поступает в блок обратного быстрого преобразования Фурье, после чего полученный цифровой сигнал преобразуется в аналоговую форму в цифро-аналоговом преобразователе ЦАП. В результате по телефонной линии сигнал передается в аналоговой форме как естественная функция времени.

На приёмном конце, поступающий сигнал проходит аналого-цифровой преобразователь ЦАП, блок быстрого преобразования Фурье БПФ и частотный выравнитель ЧВ, после чего поступает на декодер данных, работающий с таблицами. Декодированные данные поступают на блок предварительного контроля ошибок ПКО, а затем в приёмный накопитель, на выходе которого воспроизводятся переданные двоичные разряды. С целью упрощения цифрового фильтра (путем снижения его порядка) несколько субканалов, которые расположены непосредственно возле частотного среза фильтра, могут быть загружены холостыми разрядами. Искажение таких разрядов вследствие недостаточно хорошей характеристики фильтра не отразится на качестве передачи. Описанная система передачи работает в сторону к абоненту и рассчитана на приём видеопрограмм или быстрое считывание больших массивов данных из сети Интернет. При этом предполагается, что в обратном направлении такая высокая скорость передачи абоненту не требуется. По указанной причине в обратном канале АЦАЛ может применяться скорость передачи от 16 до 800 Кбит/с. Для развязки прямого и обратного каналов могут использоваться как фильтры (разделение по частоте), так и эхо заградители (разделение сигналов путем цифровой обработки). Что касается схемы СВЦАЛ, то она является более универсальной и позволяет поддерживать как асиммет-

ричные, так и симметричные услуги. Однако более высокая скорость передачи в такой линии может быть получена только при её небольшой длине. Что касается техники сверхвысокоскоростной передачи, то её реализация связана не только с технико-экономическими, но и с правовыми аспектами, так как поставщикам новых услуг связи потребуется для установки их оборудования реконструкция распределительных шкафов или колодцев, принадлежащих телефонным сетям.

Поскольку в практических условиях телефонные абонентские линии могут иметь довольно значительную протяженность и сильно различаться по длине, для обеспечения надежной работы цифровых абонентских линий устанавливаются оконечные распределительные устройства оптической сети как можно ближе к абонентам. В зависимости от выбора расположения оконечного устройства оптической сети различают несколько схем, обозначаемых в англоязычной литературе FTTx (Fiber To The x, т.е. волокно до точки x, в которой сигналы от волоконно-оптической линии распределяются по абонентским медным парам). Как и в случае обозначения xDSL, при каждой конкретной реализации вместо буквы x указывается английская буква, обозначающая соответствующее распределительное устройство. Например, E (Exchange, т.е. АТС или узел коммутации), D (Distribution terminal, т.е. распределительный шкаф), C (Curb-распределительная коробка) В или H (Building или Home - деловое или жилое здание). Соответственно количество линий от абонентов, между которыми распределяется оптический сигнал, может изменяться от тысяч до десятков.

2. Высокоскоростные магистральные сети и беспроводный доступ к информационным услугам

Уже на протяжении почти двух столетий работы по созданию и совершенствованию сетей связи оказывает огромное влияние на развитие фундаментальных наук. В свою очередь, научные открытия и теоретические разработки очень быстро находят применения при создании новой техники сетей связи. Благодаря научно-техническому прогрессу человечество успешно разрешает противоречия между неуклонно растущими потребностями в средствах передачи информации и ограниченностью сырьевых и материальных ресурсов. Одним из новейших достижений научно-технического прогресса в области информационных сетей является создание средств *волоконно-оптической связи*. В настоящее время многие научно-технические задачи создания световодов, волоконно-оптических кабелей и необходимой элементной базы (прежде всего, надежных и долговечных источников и приёмников оптических сигналов) успешно решены, и волоконно-оптические сети связи получают самое широкое распространение. Это позволяет строить магистральные сети с фантастически высокой пропускной способностью. Другое важное достижение научно-технического прогресса относится к области *надежной передачи сигналов* при наличии помех. Оно позволило создать системы *беспроводного доступа к услугам связи* и решить задачу передачи информации любому пользователю в любое время и в любом месте. В связи с широким распространением ЭВМ и услуг сетей связи часто говорят о новой эре развития средств передачи и обработки информации. Появились новые модные слова: *инфокоммуникации*, информационные сети, *информационные технологии*. Они означают новые замечательные возможности информационного обеспечения не только культурных потребностей людей, но, прежде всего, их производственной деятельности. Одной из важных сфер подобной деятельности является транспорт, который обычно рассматривают как продолжение производства и который в силу своей специфики предъявляет особые требования к информационному обеспечению. Поэтому вопросы, обсуждаемые в этой главе, представляют особый интерес для развития железнодорожного транспорта.

2.1. Принципы передачи информации по оптическому волокну

К настоящему времени оптический диапазон электромагнитных колебаний успешно освоен радиофизиками для использования в технике передачи информации. Однако, в отличие от ряда ранее освоенных диапазонов, применение этого диапазона оказалось наиболее эффективным не при беспроводной передаче сообщений, а при их передаче по специальным проводным линиям – *волоконным световодам*. Волоконный световод представляет собой тонкую нить из кварцевого стекла, которая используется в качестве диэлектрического волновода оптического диапазона. Процессы передачи оптических сигналов по такому волокну упрощенно могут быть описаны методами геометрической оптики (*лучевая теория*), а более подробное их исследование основывается на решении уравнений Максвелла (*волновая теория*).

Геометрическая оптика. Согласно лучевой теории, удержание светового сигнала в волокне (т.е. следование светового луча изгибам волокна) достигается за счет полного внутреннего отражения на границе сердцевинки световода. Для этого, во-первых, должно соблюдаться условие $n_1 > n_2$ (где n_1 – показатель преломления сердцевинки волокна, а n_2 – показатель преломления окружающей сердцевину оболочки), а, во-вторых, угол падения на границу раздела двух названных сред φ должен удовлетворять условию $\varphi \geq \arcsin(n_2/n_1)$. Как показано на рисунке, в случае $\varphi' < \varphi$ происходит преломление света под углом φ'' и его рассеяние в оболочке. Учитывая преломление луча на входе в волокно, и принимая показатель преломления внешней среды $n_0 \approx 1$, второе условие можно преобразовать в виде $\sin \theta \leq \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = NA$, где θ – угол между входящим лучом и осью световода, а NA – характеристика, описывающая конус лучей, входящих в оптическое волокно, и называемая *числовой апертурой*.

Наличие большого числа лучей, входящих в волокно под разными углами к его оси, означает наличие большого числа путей распространения света в волокне, которые имеют разную длину. Например, пути меридиональных лучей, которые пересекают ось световода, могут иметь длину от L до $L/\sin\varphi = Ln_1/n_2$, где L – длина волокна. Поэтому кратковременная вспышка света на входе волокна (световой импульс), распространяющаяся по волокну со скоростью c/n_1 , где c – скорость света в пустоте, достигнет его конца размытой во времени. Иначе говоря, сколь угодно короткий импульс будет растянут до величины, во всяком случае, не меньшей $t = L(n_1 - n_2)n_1/n_2c$. Поэтому дальнейшие работы по совершенствованию оптического волокна были направлены на поиски путей сокращения этого времени. Волокно, показанное на рисунке называют волокном со *ступенчатым изменением профиля показателя преломления*. Технологически такое волокно изготавливали в виде единой кварцевой нити с легирующими элементами, изменяющими коэффициент преломления. Вместе с тем расширение светового импульса можно значительно уменьшить, если передавать его по *самофокусирующему*, или *градиентному*, волокну, показатель преломления которого плавно уменьшается от оси волокна к периферии, например, по параболическому закону. Благодаря такому профилю волокна свет в наружных слоях сердцевинки распространяется быстрее, чем в центральной части, что и приводит к явлению самофокусировки, в результате которой различие во времени распространения лучей с крутыми и пологими углами ввода в волокно оказываются меньшими, чем в волокне со ступенчатым изменением профиля показателя преломления.

Волновая оптика. Что касается описания процессов распространения электромагнитных колебаний в световоде при помощи волновой теории, то оно напоминает описание передачи сигнала в металлическом волноводе, однако в световоде нет токов проводимости, а существуют только токи смещения. В полном металлическом волноводе волны удерживаются в пространстве, ограниченном проводящими стенками, в световоде же таких четко определенных границ нет. Однако в световоде со ступенчатым изменением профиля показателя преломления волны направляются двумя слоями диэлектрика. Для описания граничных условий в световоде, как и в круглом волноводе, удобно воспользоваться цилиндрической системой координат, в которой решение уравнений Максвелла выражается через цилиндрические функции. При этом поля внутри сердцевинки световода напоминают поля в металлическом волноводе тем, что они колеблются по радиусу и по оси. Эти поля описываются при помощи цилиндрических функций первого рода (функций Бесселя), которые являются квазипериодическими. Поля же в оболочке быстро затухают; они описываются цилиндрическими функциями третьего рода (функции Ганкеля), напоминающими экспоненциальные функции. Функции Бесселя соответствуют синусам и косинусам геометрии в прямоугольной системе координат, а функции Ганкеля – синусам и косинусам гиперболическим. Решение волнового уравнения для световода с распределенным профилем показателя преломления имеет более сложный вид, однако важно то, что в общем случае и для волоконного световода, и для металлического волновода уравнение имеет ряд решений, каждому из которых соответствует определенная структура поля, называемая типом волны, или *модой*. Каждая мода характеризуется пространственной конфигурацией колебаний и собственной частотой. Некоторые моды характеризуются тем, что магнитный или электрический вектор лежит в плоскости поперечного сечения световода (соответственно поперечно-магнитные ТМ и поперечно-электрические ТЕ моды). Другие моды имеют составляющие как электрического (E), так и магнитного (H), полей в направлении распространения. Эти моды обозначаются EH или HE, причем на первом месте указывается преобладающая составляющая. Кроме того, при обозначении мод в индексах указывается число изменений поля по диаметру и по периметру волокна. С увеличением диаметра сердцевинки и уменьшением длины волокна число мод резко возрастает. Для определения числа мод в световоде со ступенчатым профилем показателя преломления можно воспользоваться формулой

$$N = \left(\frac{\pi d}{\lambda} \cdot n_1 \right)^2 \cdot \Delta,$$

где $d = 2a$ – диаметр сердцевинки, λ – длина волны, а $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2$ – относительная разность показателей преломления.

Важной характеристикой световода, которая несет много информации о его работе, является нормированная частота, равная произведению номера моды $2\pi a/\lambda$ на числовую апертуру волокна

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

Другой важной характеристикой каждой моды является её частота отсечки, т.е. критическая частота, ниже которой поле больше не распространяется вдоль световода, а вся энергия рассеивается в окружающем пространстве. Существует только одна мода, а именно HE_{11} , частота отсечки которой равна нулю. Выбирая параметры световода таким образом, чтобы следующие моды TE_{01} , TM_{01} и HE_{21} с более высокими частотами отсечки не могли распространяться, можно получить режим, при котором распространяется только одна мода. Такое волокно называется **одномодовым**, и условие его реализации имеет вид

$$2,405 > \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

Отсюда следует, что диаметр сердцевины такого волокна должен быть равен лишь нескольким микронам. В прошлом из-за трудностей с производством и работой с такими световодами отдавалось предпочтение **многомодовым** световодам, в которых канализировались десятки и даже сотни мод. Однако в настоящее время технологические и производственные трудности успешно преодолены, и одномодовое волокно получило самое широкое распространение.

Характеристики световодов. При обсуждении характеристик материала оптического волокна до сих пор упоминался только вещественный показатель преломления, и ничего не говорилось о затухании. Среды, поглощающие излучение, могут быть описаны комплексным показателем преломления, который, как и комплексный коэффициент передачи по металлическому проводу, характеризует как направленную передачу, так и затухание. Многомодовые световоды, работавшие в диапазонах волн до 1 мкм, характеризовались затуханием в пределах 5-10 дБ/км. В настоящее же время освоены диапазоны в пределах длин волн 1,2 – 1,55 мкм, и одномодовые световоды, работающие в этих диапазонах, характеризуются затуханием до 0,2 дБ/км. При этом вследствие физико-химических свойств волокна затухание на разных частотах неодинаково. Поэтому с практической точки зрения представляют интерес так называемые **окна прозрачности**, в которых затухание уменьшается до приемлемого уровня. Для современных одномодовых волокон наибольший интерес представляет окно прозрачности в диапазоне приблизительно 1310 – 1550 мкм.

Волоконно-оптические кабели изготавливаются из пучков волоконных световодов. Каждый световод в пучке имеет собственное защитное пластмассовое покрытие. Для снижения усилий (механической нагрузки) на стекловолокно оптический кабель снабжается армирующими элементами в виде жил из стали или другого прочного материала.

2.2. Волоконно-оптические сети связи общего пользования

Волоконно-оптическими сетями называются сети связи, в которых в качестве среды передачи используется **оптическое волокно**, а в качестве средства передачи информации – **световые импульсы**. Необходимо отметить два этапа развития волоконно-оптических сетей связи.

Два поколения волоконно-оптических сетей. Первое поколение начало развиваться тогда, когда оптическое волокно стали прокладывать для **замены традиционных сред передачи** (прежде всего, кабелей с медными жилами). Необходимость такой замены как раз и была связана с поиском компромисса между необходимостью удовлетворения растущих потребностей в средствах связи и дефицитом традиционных материалов, прежде всего, меди. К преимуществам волоконно-оптических кабелей перед традиционными относятся легкость обращения, небольшой вес, небольшие размеры (возможность прокладки в перегруженной канализации), широкая полоса пропускаемых частот, защищенность (трудность обнаружения кабеля и прослушивания), неподверженность электрическим помехам, отсутствие взаимного влияния между отдельными оптическими волокнами в кабеле, отсутствие электрической проводимости и безопасность, неподверженность коррозии. В сетях этого поколения сигналы, передающие информацию, попеременно преобразуются из электрической формы в оптическую и обратно. Это вызывается тем, что обработка данных в узлах такой сети выполняется электронными средствами. Поэтому даже при более высоких скоростях передачи все равно приходится пользоваться протоколами, разработанными для сетей с медными проводами. В качестве примеров таких сетей можно назвать сеть типа FDDI (Fiber Distributed Data Interface, т.е. интерфейс с распределением данных по волокну) и гигабитную сеть Ethernet. Главный недостаток подобного рода сетей состоит в том, что они используют только небольшую долю пропускной способности оптического волокна. Эта доля не превышает 0,1%, если учесть, что волокно может работать в полосе частот до 50 ТГц (см. задачу 6.1).

Второе поколение волоконно-оптических сетей отражает стремление *более полного использования пропускной способности волокна*. В сетях второго поколения функции коммутации и усиления сигналов, традиционно выполнявшиеся электронными средствами, осуществляются в оптической области с обеспечением прозрачности для сигнала. Главная особенность таких сетей – введение *разделения по длине волны*. В этом случае для поддержания нескольких одновременных передач по волокну применяются различные длины волн, на каждой из которых формируется самостоятельный канал. Передача по такому каналу может вестись с максимальной скоростью, которая может быть достигнута при применении электронных средств. Общая же суммарная скорость передачи может достигать нескольких терабит в секунду. Техника сегодняшнего дня позволяет организовать передачу 320 каналов со скоростью 10 Гбит/с каждый, что позволяет получить в совокупности скорость передачи 3,2 Тбит/с. Такие каналы могут быть организованы в окне прозрачности одномодового волокна при расстоянии между соседними каналами в 1 нм или даже меньше. Для организации подобных систем в узлах сети с разделением по длине волны применяются передатчики и приёмники, типы и количество которых зависят от конкретно решаемых задач. Приёмопередатчики могут иметь фиксированную настройку на конкретную длину волны. Возможно также применение настраиваемых приёмопередатчиков, которые рассчитываются на определенный диапазон оптического спектра. Настраиваемые приёмопередатчики более дорогие и, кроме того, время их настройки достаточно велико по сравнению со скоростями передачи сигналов. Однако техника разделения по длине волны продолжает развиваться, и можно ожидать, что многие практические потребности будут удовлетворяться.

Системы передачи по оптическому волокну. Чрезвычайно высокие скорости передачи по волоконно-оптическим сетям требуют создания ресурса для восстановления работы сети при повреждении в объёме 100% от её пропускной способности. При этом должны предусматриваться средства очень быстрого перевода на резервный путь при повреждении (обычно время такого переключения составляет менее 50 мс).

Первая система передачи по оптическому волокну, получившая название SONET (Synchronous Optical NETwork) была создана в США в 1984 г и зафиксирована в стандарте Американского института стандартизации ANSI. Эта сеть строится по кольцевой схеме и работает со скоростью передачи 51,84 Мбит/с. Расширение сети осуществляется путем соединения колец в объединяющих узлах. Вскоре волоконно-оптические системы передачи появились также в Европе и Японии, и начались работы по стандартизации также в европейском институте ETSI и Международном Союзе связи. Задача состояла в разработке таких стандартов, которые позволили бы объединить в рамках высокоскоростных магистралей цифровые тракты плезихронной цифровой иерархии, принятые в разных странах. В результате были приняты рекомендации Международного Союза Связи G.709 и I.423 для волоконно-оптических линий связи, в которых была установлена *синхронная цифровая иерархия* SDH (Synchronous Digital Hierarchy). Она объединяет ряд уровней, которые определяются *синхронными транспортными модулями STM* (Synchronous Transport Module). Для таких модулей применяются следующие обозначения (и соответствующие скорости передачи): STM-1 (155,52 Мбит/с), STM-4 (622,08 Мбит/с), STM-16 (2,488 Гбит/с), и т.д. Формат сигнала транспортного модуля STM-1 содержит поля полезной и служебной информации. Его передача происходит периодически через каждые 125 мкс. В каждом узле сети, где происходит демодуляция сигнала, информация представляется в побайтной форме, и все операции по её обработке выполняются с частотой следования байтов 19,44 МГц. Аналогичные уровни синхронной иерархии предусматриваются американским стандартом, где они называются уровнями синхронного транспортного сигнала STS (Synchronous Transport Signal) применительно к электрическим сигналам и уровнями оптического сигнала OC (Optical Carrier) в волоконно-оптической сети. Форматы кадров STS и OC совпадают. Данные о скоростях передачи приводятся в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Скорости передачи по стандартам SDH/SONET

| Стандарт SDH | Стандарт SONET | Скорости передачи |
|--------------|----------------|-------------------|
| - | STS-1, OC-1 | 51,84 Мбит/с |
| STM-1 | STS-3, OC-3 | 155,52 Мбит/с |
| STM-3 | STS-9, OC-9 | 466,56 Мбит/с |
| STM-4 | STS-12, OC-12 | 622,08 Мбит/с |
| STM-6 | STS-18, OC-18 | 933,12 Мбит/с |
| STM-8 | STS-24, OC-24 | 1,244 Гбит/с |
| STM-12 | STS-36, OC-36 | 1,866 Гбит/с |
| STM-16 | STS-48, OC-48 | 2,488 Гбит/с |
| | OC-192 | 9,953 Гбит/с |
| | OC-768 | 39,81 Гбит/с |
| | OC-3072 | 159,25 Гбит/с |

Структуры, которыми уплотняются транспортные модули синхронной цифровой иерархии типа STM-1, называются *виртуальными контейнерами*. Они тоже состоят из полезной и служебной информации и формируются в блоки, которые повторяются каждые 125 или 500 мкс. Для обозначения начала блока виртуального контейнера в составе формата сигнала STM-1 применяются специальные указатели. В рекоменда-

циях МСС G.707 определены четыре типа виртуальных контейнеров VC-4 со скоростью передачи 139,264 Мбит/с, VC-3 со скоростью передачи 44,736 или 34,368 Мбит/с, VC-2 (6,312 Мбит/с) и VC-1 в двух версиях - VC-11 (1,544 Мбит/с – стандарт США и Японии) и VC-12 (2,048 Мбит/с – европейский стандарт, принятый также в нашей стране). Виртуальный контейнер VC-4 называется контейнером высшего порядка. Сочетание содержимого этого контейнера с указателем его положения в формате STM-1 и другими служебными байтами называется *эксплуатационным блоком* четвертого уровня AU-4 (Administrative Unit - 4). Аналогичным образом определяются другие виртуальные контейнеры низших порядков. Комбинации таких контейнеров с указателями и некоторыми служебными байтами называются оплачиваемыми блоками. Например, виртуальный контейнер VC-12 входит в состав *оплачиваемого блока* TU-12 (Tributary Unit –12). В публикациях на русском языке можно встретить также название «трибутарный блок». Для формирования входящих сигналов в байты в сети синхронной цифровой иерархии применяются синхронизаторы. После преобразования байты переносятся на соответствующие позиции поля полезной информации. Затем сеть передает их в составе стандартного формата в пункт назначения, где установлены дисинхронизаторы. Они преобразуют поток байтов обратно в поток последовательных разрядов и восстанавливают исходную скорость передачи. Благодаря этому сеть синхронной цифровой иерархии совместима с потоками, поступающими с различными скоростями. Для согласования скоростей поступающих потоков разрядов со стандартной скоростью сети синхронной цифровой иерархии применяются *выравнивающие разряды*. В конкретных условиях работа с выравнивающими разрядами может вносить нежелательные явления в виде низкочастотных и высокочастотных колебаний скорости следования разрядов. В первом случае наблюдаются регулярные отклонения импульсов от точек отсчета во времени, а во втором – фазовые дрожания (джиттер). Важной задачей проектирования аппаратуры волоконно-оптических сетей связи является разработка мер по ослаблению этих нежелательных явлений.

Рассмотрим в качестве примера передачу по сети синхронной цифровой иерархии асинхронного потока со скоростью до 2,048 Мбит/с. Этот поток подается на вход синхронизатора. В нем он преобразуется в плавающую структуру виртуального контейнера VC-12. В эту структуру входят служебные данные о пути передачи POH (Path OverHead), сама асинхронная структура VC-12 из 1024 разрядов, разряды управления выравниванием (в положительную или отрицательную сторону) PNI, сами разряды выравнивания, а также другие служебные разряды. Расположение такой структуры в формате синхронного транспортного модуля STM-1 показано на рисунке. Здесь слева находится участок служебной информации из двух групп, содержащих по 9×9 байтов каждая. При этом вторая группа показана с частичной побайтной расшифровкой. Остальная часть формата отводится под поле полезной информации. В этом поле отдельно показано только место, занимаемое рассматриваемым виртуальным контейнером VC-12. Таким образом, рассмотренный пример отражает методы использования волоконно-оптических линий связи для цифровых сетей интегрального обслуживания (как узкополосных, так и широкополосных), работающих с коммутацией каналов.

2.3. Повышение скоростей передачи в сети Интернет

В последние годы сеть Интернет с маршрутизаторами завоевывает все большую популярность, её нагрузка неуклонно растет, и поэтому применение волоконно-оптических линий передачи в этой сети является актуальным. В эпоху господства режима наибольшего благоприятствования поле протокола IPv4, указывающее тип услуги, обычно в маршрутизаторах игнорируется. Однако в настоящее время требования пользователей меняются, и приходится учитывать различия этих требований.

Интегрирование услуг. В сети Интернет различают так называемую *гибкую нагрузку* и *жесткую нагрузку*. Первая нечувствительна к задержкам и может обрабатываться с произвольной скоростью. Вторая же требует строго оговоренных минимальной производительности канала передачи, задержки, колебания задержки и вероятности потерь пакетов. Для того, чтобы гарантировать перечисленные требования качества обслуживания была разработана архитектура интегрирования услуг *IntServ*. Понятие интеграции услуг уже обсуждалось применительно к сетям связи общего пользования, где обычно применяется термин *интегральные услуги*. В сети же Интернет более распространен термин *интегрированные услуги*. Представляется разумным, вместо того, чтобы поправлять друг друга, узаконить применение обоих терминов. Первый из них говорит о традиционных сетях общего пользования, тогда как второй относится к сети Интернет. Такое разделение понятий оправдано еще и тем, что технические средства интеграции в сетях каждого из упомянутых двух типов существенно различаются.

Сеть с *интегрированными* услугами предоставляет конкретные категории обслуживания потокам или группам потоков. Иначе говоря, дополнительно к наибольшему благоприятствованию в этой сети доступны еще две категории услуг, а именно: *услуга с управлением нагрузкой* и *гарантированная услуга*. При управлении нагрузкой обеспечивается небольшая средняя задержка и минимальные потери. Такой режим можно сравнить с наибольшим благоприятствованием в сети с небольшой нагрузкой. При гарантированных же услугах обеспечивается количественно оговоренная максимальная величина задержки в очереди и отсутствие потерь. Эта категория услуг предназначается для приложений в реальном времени со строгими требованиями к синхронизации. Для того, чтобы установить конкретные характеристики потока, архитектура IntServ назначает ресурсы в маршрутизаторах посредством *протокола резервирования ресурсов RSVP*, который рассматривается ниже. От главной ЭВМ источника по пути назначаемого маршрута передается сообщ-

щение PATH, содержащее спецификацию параметров нагрузки TSpec. Нагрузка определяется на двух уровнях. Во-первых, указывается общая категория услуги (гарантированная, с управлением нагрузкой или с наилучшим благоприятствованием). Во-вторых, в рамках каждой категории описывается требуемый поток сообщений с указанием необходимых параметров. Конкретно, в спецификации TSpec указываются параметры задержки, допустимые колебания задержки и полоса пропускания, включая параметры «дырявого ведра» для сглаживания пиков нагрузки. Путь, устанавливаемый в каждом маршрутизаторе, включает информацию о предыдущем маршрутизаторе. Когда сообщение PATH поступает в главную ЭВМ назначения, в ней создается сообщение RSVP, которое передается обратно по установленному маршруту главной ЭВМ – источнику. В результате этого в каждом маршрутизаторе по пути следования назначаются необходимые ресурсы, если это возможно. Получение сообщения RSVP в главной ЭВМ – источнике говорит о том, что необходимое назначение ресурсов выполнено в каждом маршрутизаторе, и может начаться передача данных.

Общая схема реализации протокола IntServ в маршрутизаторе показана на рисунке. В нижней части этого рисунка выделены функции непосредственной обработки пакетов в маршрутизаторе. Они должны быть тщательно оптимизированы, так как имеют дело с каждым конкретным пакетом. Функции же, показанные в верхней части рисунка, направлены на решение общих задач управления. Например, протокол резервирования решает задачу резервирования ресурсов для каждого нового потока с заданным качеством обслуживания. Этот протокол поддерживает информацию о каждом потоке в оконечных системах и в маршрутизаторах по всему пути и обновляет эту информацию в распределителях пакетов. Функция управления доступом действует при каждом новом запросе передачи и определяет наличие достаточных ресурсов для требуемого качества обслуживания. Агент управления служит для обновления базы данных управления нагрузкой, а также контролирует модуль управления доступом, определяя его стратегию. Протокол же маршрутизации поддерживает базу данных маршрутизации, определяющую очередной участок, по которому направляется каждый поток к пункту назначения. Перечисленные общие функции управления поддерживают упомянутые функции непосредственной обработки пакетов в маршрутизаторе.

Функция классификации и выбора маршрута понятна по её названию. Присваиваемый класс обслуживания может относиться к отдельному потоку или к целому набору потоков с одинаковыми требованиями к качеству обслуживания. Например, все пакеты, относящиеся к видео-передачам или принадлежащие конкретной организации, с точки зрения назначения ресурсов или дисциплины обслуживания могут обрабатываться одинаково. Выбор класса конкретного пакета зависит от соответствующего поля в его заголовке протокола IP. В зависимости от класса, а также от поля адреса пункта назначения, для конкретного пакета определяется следующий участок маршрута. Функция же распределения пакетов состоит в направлении каждого пакета в ту или другую очередь, т.е. в определении порядка передачи пакетов и при необходимости в решении вопроса об их сбрасывании. Такое решение зависит от класса пакета, содержимого базы данных управления нагрузкой, текущей и прошлой загруженности исходящего порта. В задачу распределения пакетов входит также формирование стратегии их обработки в случае, если поток нагрузки превышает запрошенную пропускную способность.

Требования к маршрутизаторам и протокол RSVP. Основные требования к маршрутизаторам могут быть сформулированы следующим образом:

1. Маршрутизатор должен обладать достаточной мощностью обработки информации, чтобы справиться с нагрузкой датаграммных сетей с очень высокими скоростями передачи.
2. Маршрутизатор должен располагать достаточной информацией о структуре сетей, чтобы выбирать маршруты, подходящие для конкретных классов нагрузки, и при необходимости компенсировать перегрузки и повреждения.
3. Маршрутизатор должен пользоваться схемами обмена информацией о маршрутах с другими маршрутизаторами, причем эти схемы должны работать эффективно и вносить не слишком большую вторичную нагрузку.

Первое требование адресуется разработчикам процессоров и операционных систем и здесь не обсуждается. Второе требование, связанное с применением теории графов и методов выбора путей минимальной стоимости (в самом широком смысле этого слова) уже обсуждалось. Здесь же рассмотрим некоторые протоколы, поддерживающие функции маршрутизации. Обратимся сначала к протоколу резервирования ресурсов. Его английское обозначение принято для удобства с нарушением правила сокращений, а именно RSVP (Resource reSerVation Protocol). Работа этого протокола характеризуется следующими особенностями:

- Одноадресная или многоадресная передача. Протокол обеспечивает резервирование ресурсов, как для одноадресной, так и для многоадресной передачи с возможностями динамической адаптации к изменениям состава участников сеанса связи. Предусматривается также адаптация к изменениям маршрутов и выбору ресурсов в соответствии с конкретными требованиями отдельных участников сеанса связи.
- Симплексная работа. Протокол осуществляет резервирование ресурсов только для одного направления передачи. При двусторонней передаче требуется отдельное резервирование для каждого направления передачи.

- Резервирование по инициативе принимающей стороны. Такое решение связано с возможностями многоадресной передачи. Если применяется одноадресная передача, более естественным было бы резервирование по инициативе передающей стороны. Однако в случае многоадресной передачи возможны различные требования отдельных получателей.
- Поддержка гибких состояний в сети Интернет. Резервирование ресурсов в сети Интернет отличается от резервирования ресурсов в традиционных сетях с коммутацией каналов. Главное различие состоит в том, что при коммутации каналов маршрут является фиксированным, т.е. жестко определяется конкретным состоянием сети. Если для некоторого потока пакетов выделен виртуальный канал, его задание также определяется жестким состоянием. Однако в сети Интернет схема резервирования ресурсов должна взаимодействовать со стратегией динамической маршрутизации, позволяя пакету при необходимости изменять маршрут. В связи с этим возникает понятие гибкого состояния сети, в котором допускается обновление маршрута, выбираемого из набора состояний.
- Предоставление различных форм резервирования. При многоадресной передаче отдельные адресаты могут пользоваться ограниченными ресурсами, в частности, из-за различных характеристик их терминалов, и учет этих особенностей позволяет повысить эффективность работы сети.
- Прозрачная работа через маршрутизаторы, которые не поддерживают протокол RSVP. Такого рода маршрутизаторы могут просто обрабатывать нагрузку по принципу наибольшего благоприятствования.
- Поддержка протоколов IPv4 и IPv6. В формате заголовка протокола IPv4 протокол RSVP может использовать поле «Тип услуги», а в формате заголовка протокола IPv6 – поле «Метка потока».

В основе работы протокола RSVP лежат три составляющие: сеанс связи, описание потока и описание фильтрации. Понятие сеанса связи здесь применяется вместо понятия пунктов назначения с учетом возможности гибких состояний. Описание потока содержит две спецификации. Требуемое качество обслуживания указывают параметры резервирования в спецификации Rspec, а параметры потока нагрузки приводятся в спецификации Tspec. Описание фильтрации может обозначать произвольную группу пакетов данного сеанса связи. Например, это могут быть пакеты только от конкретного источника или конкретного протокола, или же пакеты с конкретным содержанием определенных полей заголовка. Чаще всего это бывает адрес источника или принадлежность протоколу UDP/TCP. Отфильтрованные пакеты направляются в очередь, учитывающую качество обслуживания. Остальные пакеты направляются в очередь, обслуживаемую в порядке поступления (по принципу наибольшего благоприятствования).

Дифференцирование услуг. Переходя непосредственно к задачам маршрутизации, нужно, прежде всего, вернуться к сравнению коммутации каналов и коммутации пакетов. С позиций современной техники сетей связи это сравнение приводит к сравнению технологии АТМ, ориентированной на соединения, с технологией сети Интернет, которая исторически была ориентирована на работу без установления соединений. Дальнейшее продолжение этой традиции мы видим в архитектуре дифференцированных услуг *Diff-Serv*. Концепция DiffServ предусматривает объединение нагрузки. В отличие от рассмотренной выше архитектуры IntServ, которая не решает задачи масштабирования, в архитектуре DiffServ эта задача находит свое решение. Концепция DiffServ исходит из предположения, что пользователь получит необходимое ему качество обслуживания, если каждый отдельный пакет будет обрабатываться на каждом участке сети в соответствии с его специфическими требованиями (в этом и состоит дифференцирование услуг). Таким образом, если пакет быстро проходит все участки, его задержка будет небольшой. Тогда нет необходимости контролировать состояние потоков, и сеть может работать в режиме без установления соединения. Иначе говоря, при применении архитектуры DiffServ каждый пакет обрабатывается в маршрутизаторе в соответствии с кодом, записанным в его заголовке и отражающем необходимый уровень обслуживания.

Архитектура DiffServ определяет два класса услуг, которые различаются на каждом участке сети (т.е. в каждом узле коммутации), а именно: услуги срочной передачи и гарантированной передачи. **Срочная передача** (по-английски, EF – Expedited Forwarding) обеспечивает низкие потери, низкую задержку, низкие колебания задержки и гарантированную полосу пропускания. Однако при этом не устанавливаются строгие количественные ограничения этих характеристик. Они просто определяются типом услуги, которая может потребоваться для этого класса. **Гарантированная передача** (по-английски, AF – Assured Forwarding) еще более неопределенна. Она предоставляет различные типы услуг, которые по своим характеристикам лучше характеристик наибольшего благоприятствования, и различаются между собой вероятностями сбрасывания пакетов. Срочная передача предназначается для нагрузки, чувствительной к задержкам, тогда как гарантированная передача более пригодна для гибкой нагрузки, не связанной с реальным временем. Для последней определены несколько подклассов, которые различаются методами обработки пакетов при перегрузке сети. Решение о реализации этих подклассов в узлах лежит на поставщиках сетевых услуг, которые могут не только устанавливать строгие приоритеты одних пакетов перед другими, но и применять более сложные механизмы управления типа взвешенной справедливой постановки в очередь WFQ (Weighted Fair Queuing).

Поскольку нагрузка сети Интернет может пересекать несколько доменов, качество обслуживания в этом случае устанавливается в ходе переговоров между доменами. В результате таких переговоров принимаются соглашения об уровне обслуживания SLA (Service Level Agreement). Конкретные уровни SLA устанавливаются только между равноправными доменами, которые берут обязательства обрабатывать нагрузку друг друга. Подобные соглашения достигаются на основании спецификации уровней услуг SLS (Service Level Specification). Если соглашение между двумя доменами предусматривает передачу услуги третьему домену, оно должно быть подкреплено также соглашением с этим третьим доменом. В случае, когда пункт назначения не определен (например, при гарантированной передаче), принимающий домен должен предусмотреть достаточные ресурсы для доставки каждому возможному пункту назначения. Для ведения переговоров и контроля за распределением нагрузки внутри домена предусматривается устройство, получившее название *брокера ширины полосы* (по-английски, BB – Bandwidth Broker).

Архитектура DiffServ возникла в результате повышения скоростей передачи и обработки информации и снижения стоимости каналов связи. Она предусматривает более простые механизмы управления нагрузкой, чем системы ATM и IntServ. Грубо говоря, при этом уменьшается роль управления нагрузкой в небольших масштабах времени (сложные правила обработки пакетов), тогда как более важной становятся роль управления нагрузкой в больших масштабах времени (выделение полосы частот на основании измерения нагрузки). Однако при этом остается открытым вопрос о том, как поставщики услуг должны фактически реализовать эту архитектуру для гарантии требуемого качества обслуживания.

Коммутация в сети Интернет. Совершенно очевидно, что необходимо найти приемлемый способ объединения достоинств коммутации каналов и коммутации пакетов. Одним из возможных подходов к такому объединению является применение коммутации в сети Интернет. В чистом виде эта идея означает отображение потока пакетов, передаваемых по протоколу IP, в конкретное соединение, называемое виртуальным каналом. Такое решение позволяет обойтись без обработки каждого пакета в маршрутизаторе. Как показывает статистика нагрузки сети Интернет, 64 % всех передаваемых потоков продолжаются менее 1 минуты, причем на эти потоки приходится лишь 16 % всех пакетов. С другой стороны, 84% всех пакетов приходится на потоки продолжительностью более 1 минуты, а доля таких потоков составляет лишь 36 % всех потоков. Половина всех потоков имеет продолжительность менее 30 с, тогда как половина всех пакетов приходится на потоки, длящиеся дольше 260 с. Отсюда возникает естественный интерес к тому, чтобы дифференцировать потоки и коммутировать их с учетом требований качества обслуживания. Таким образом, важное требование к окончательному пользователю состоит в том, чтобы объявлять тип нагрузки и требования к качеству обслуживания для каждого потока. Как видно из описания протоколов межсетевое уровня, в протоколе IPv4 предусматривается лишь поле с указанием типа услуги. Однако в версии IPv6 уже предусматривается специальное поле для метки потока, что открывает новые возможности управления потоками.

Наряду с обсуждавшейся коммутацией пакетов, свою историю имеет в сети Интернет и коммутация каналов. Одно из первых применений этого метода относится как раз к организации управления сетью. Маршрутизаторы, выбирающие маршруты передачи пакетов, должны обмениваться между собой служебной информацией о состоянии всей сети, и в принципе, такая информация также могла бы обмениваться с помощью пакетов. Однако в быстродействующих сетях задержка пакетов может серьезно отразиться на работе сети. В современных сетях маршрутизаторы обрабатывают до 100000 пакетов в секунду, и к таким маршрутизаторам предъявляются очень высокие требования. По этой причине в сетях Интернет начали применять виртуальные каналы по технологии ATM со скоростью передачи 155 Мбит/с. В развитие этой идеи появилась система коммутации IP, впервые разработанная компанией Ipsilon (США). Решение вопроса о целесообразности коммутации зависит от того, насколько коммутация разгружает маршрутизатор и каковы дополнительные затраты на отображение потока пакетов в виртуальный канал ATM. Если поток содержит большое количество пакетов, его выгоднее направлять по виртуальному каналу, отдельные же пакеты или небольшие их группы выгоднее коммутировать в маршрутизаторе.

Дальнейшим усовершенствованием управления сетью Интернет является применение коммутации меток протоколов MPLS (Multi-Protocol Label Switching). Её основная идея состоит в усовершенствовании передачи с помощью протокола Интернет с привлечением некоторых методов гарантии качества обслуживания, заимствованных их технологии ATM. Это, в первую очередь, управление нагрузкой, а также контроль качества обслуживания. Обычный принцип управления нагрузкой в сети Интернет состоит в выборе кратчайшего маршрута, например, при помощи протокола OSPF (Open Shortest Path First, т.е. первым выбирается кратчайший из свободных путей). Для связи некоторой пары узлов сети существует только один такой путь, и этот факт приводит к перегрузке данного кратчайшего пути при недогрузке остальных. Метод коммутации MPLS предполагает более сбалансированный подход. Кроме того, этот метод предусматривает более совершенный контроль качества обслуживания. Выше рассматривались архитектуры IntServ и DiffServ, которые были предложены для решения задач контроля качества обслуживания, но не получили достаточно широкого распространения. Недостаток архитектуры IntServ состоит в проблеме масштабирования, что делает невозможным её применение в магистральной сети, с другой сторо-

ны, архитектура DiffServ снимает проблему масштабирования, но недостаточно гарантирует качество обслуживания.

Коммутация протокольных меток MPLS – это технология, основанная на передаче пакетов по меткам, записанным в их заголовках. Применение меток вместо адресов позволяет ускорить обработку, так как соединительный путь просто находится в таблице по метке. Сеть с коммутацией протокольных меток (далее сеть MPLS) состоит из путей, которые скомутированы по меткам и называются по-английски LSP (Label Switched Path), и маршрутизаторов, коммутирующих метки LSR (Label Switched Router). В маршрутизаторах поддерживаются таблицы, указывающих направления передачи пакетов по меткам. Маршрутизаторы могут быть магистральными или пограничными. Магистральные маршрутизаторы обеспечивают транзит пакетов внутри сети. Пограничные же маршрутизаторы, устанавливаемые на границе сети, обеспечивают сопряжение с другими сетями. Пакеты с одинаковыми метками направляются по одному и тому же скомутированному пути. Подобные пути представляют собой виртуальные каналы одного направления передачи от источника к получателю. Для установления и поддержания таких каналов в магистральной сети применяется расширенный вариант протокола резервирования ресурсов RSVP. Скомутированные пути представляют собой виртуальные каналы, переносящие пакеты, которые могут принадлежать разным потокам. Пакеты подбираются в соответствии с их классификацией, а подбор виртуальных каналов выполняется методами теории телетрафика. Классификация же пакетов выполняется по схеме дифференцирования услуг DiffServ.

В результате описанных процедур пропускная способность каждой линии связи оказывается распределенной по нескольким сетям MPLS. Кроме того, оставляется резервная пропускная способность, которая отводится для нагрузки, обслуживаемой по принципу наибольшего благоприятствования. Описанная схема часто называется в литературе схемой «DiffServ по MPLS». Легко представить себе, что фиксированная полносвязная сеть MPLS, в которой любая пара маршрутизаторов связывается с помощью прямого скомутированного пути, была бы крайне неэффективной. В такой сети стоимость сигнализации растет пропорционально квадрату числа маршрутизаторов. Поэтому при формировании реальных сетей MPLS может быть применен один из двух подходов. Первый подход ориентирован на нагрузку. В этом случае скомутированные пути устанавливаются в соответствии с заявками на резервирование потоков, каналов или ширины полосы. После выполнения заявки скомутированный путь освобождается. Второй подход ориентирован на структуру. В этом случае скомутированные пути устанавливаются заблаговременно в соответствии с информацией, связанной с протоколом маршрутизации. Эти пути сохраняются до тех пор, пока поддерживается такая информация.

Выбор стратегии формирования структуры сетей MPLS является одной из актуальных задач современной теории телетрафика, которые широко исследуются в настоящее время. Цель таких исследований состоит в поиске решений, минимизирующих суммарные затраты на реализацию пропускной способности, коммутации и сигнализации. Рассматриваются, в частности, методы линейного программирования при выборе структуры сети MPLS и методы нелинейного программирования при распределении потоков по конкретным путям. Изложенные идеи непосредственно подводят нас к применению для передачи потоков Интернет волоконно-оптических сетей второго поколения, которые позволяют закреплять коммутируемые оптические каналы между узлами сети за потоками пакетов с определенными метками.

2.4. Концепция универсальной персональной связи

Идея доставки любой информации любому пользователю в любое время и в любое место была сформулирована как концепция универсальной персональной связи и в течение ряда лет прорабатывается в органах стандартизации. Основное направление реализации этой идеи состоит в закреплении номера не за абонентским аппаратом, а за пользователем. При этом такой номер можно сделать единым на весь мир, и по нему идентифицировать абонента: ведь для того, чтобы пронумеровать всех жителей нашей планеты, достаточно всего 10 десятичных цифр. Это можно осуществить с помощью микроэлектронной **идентификационной карточки абонента**, которую часто называют **SIM - картой** (от английских слов Subscriber Identity Module). Вставляя такую карту в абонентский аппарат, пользователь сообщает в сеть о своем местонахождении и может проводить сеансы, как исходящей, так и входящей связи. Таким образом, SIM-карта служит для поддержания **подвижности абонента**. Однако этого недостаточно, если абонент сможет пользоваться только фиксированной сетью связи с фиксированными терминалами. Для полной реализации идеи универсальной персональной связи нужны еще **подвижные терминалы**. Именно необходимость в подвижных терминалах подводит нас к новой крупной проблеме **подвижной, или мобильной, связи**.

Системы спутниковой связи. Если начать обсуждать идею создания системы универсальной персональной связи с распространения таких услуг на безлюдные территории и акватории, где нет фиксированных сетей связи, то в первую очередь возникает мысль о применении спутниковой связи. Спутники

могут запускаться на разные орбиты. Различают низкие, средние и геостационарные орбиты. При применении низких орбит спутник находится на высоте менее 2000 км, и его период обращения составляет 90 минут, а радиус охватываемой зоны земной поверхности (зоны наблюдения) 3000-4000 км. Продолжительность пребывания спутника в пределах конкретного горизонта – около 20 минут, а время распространения сигнала составляет около 25 мс. Для глобального покрытия требуется несколько десятков таких спутников на разных орбитах. При применении средних (круговых) орбит спутник находится на высоте около 10000 км. Период обращения составляет 6 часов, а продолжительность нахождения в пределах конкретного горизонта – несколько часов. Для глобального покрытия достаточно спутников на двух или трех орбитах. Время распространения сигнала для спутника на средней орбите составляет 125 мс. Геостационарная орбита – также круговая. Она располагается в плоскости экватора с высотой 35786 км, и время обращения спутника по такой орбите совпадает с временем вращения Земли. Поэтому геостационарный спутник занимает фиксированное положение по отношению к земной поверхности. Территория, охватываемая геостационарным спутником, составляет около трети земной поверхности (между 75° северной и южной широты). Поэтому полный охват земной поверхности может быть осуществлен с помощью трех спутников, но время распространения сигнала составляет 250 мс.

Спутниковые системы на низких и средних орбитах содержат несколько одинаковых спутников, запущенных на орбиты одинаковой высоты, но в разных плоскостях. Эти спутники вращаются по траекториям синхронно относительно Земли. Набор таких спутников часто называют созвездием. Спутники на низких и средних орбитах связываются между собой межспутниковыми каналами, которые могут находиться внутри плоскости орбиты и связывать спутники, находящиеся в одной плоскости. Применяются также межплоскостные каналы, связывающие спутники соседних плоскостей.

Идея спутниковой связи начала претворяться в жизнь в 1970-1980 гг. Например, широко известна международная система спутниковой связи морского флота *Инмарсат*, созданная в 1979 г. Крупные морские суда, которые фактически являются современными предприятиями с большим числом рабочих мест, требуют постоянной связи с внешним миром. Столь же важна связь и для менее крупных судов, в том числе и для целей безопасности. По этим причинам и была поставлена задача создания системы Инмарсат, в которой работают четыре геостационарных спутника, а соединения с наземными сетями осуществляется через обширную систему береговых станций. С момента её создания сеть Инмарсат значительно расширила свои функции, и теперь предоставляет услуги связи любым подвижным объектам. С расширением клиентуры и номенклатуры услуг, совершенствовалась и техника связи (не только сами спутники, но и наземная и абонентская аппаратура, которая постепенно сокращалась по размерам и весу от крупных установок с большими антеннами до небольших чемоданчиков). Богатейший опыт эксплуатации системы Инмарсат позволил создать и более совершенные системы спутниковой связи, которые одновременно решают задачи ориентирования и навигации. Например, *глобальная система позиционирования GPS* позволяет определить географические координаты в любой точке Земного шара.

В то же время геостационарная система спутниковой связи имеет и существенные недостатки, связанные с большой высотой орбиты спутника, которая необходима для получения синхронного обращения спутника вокруг Земли со скоростью её вращения. Иначе говоря, только при такой орбите можно зафиксировать спутник в неподвижном положении по отношению к заданной точке поверхности Земли. Следствием этого недостатка является сравнительно большая задержка при распространении сигнала и необходимость расхода сравнительно большой мощности. Более сложной является схема организации спутниковой связи через спутники на низких орбитах. Здесь каждый спутник перемещается относительно поверхности Земли и находится в зоне досягаемости радиосвязи для конкретного пункта сравнительно непродолжительное время. Поэтому в таком случае требуется целая система взаимосвязанных спутников, которые в совокупности могут контролировать всю земную поверхность. Такой проект поддерживался специалистами, среди которых бил известный разработчик программных средств ЭВМ и предприниматель Б. Гейтс, и в 1990-х гг. даже было начато его осуществление. Проект получил наименование *Иридий* по названию химического элемента, у атома которого на орбитах вокруг ядра находятся 77 электронов. Именно столько спутников требовалось запустить по первому варианту этого проекта. Однако эта идея себя не оправдала по той причине, что главными источниками большой нагрузки являются густонаселенные районы. А такие районы гораздо проще обслуживать по схемам беспроводного доступа к услугам фиксированных сетей, ресурсы пропускной способности которых, как мы могли видеть выше, неограниченны. Поэтому предпочтительнее пользоваться возобновляемым ресурсом проводных линий, а радиоканалами пользоваться только для доступа подвижных абонентов к проводным ресурсам. На этой идее и основана система мобильной сотовой связи, получившая широкое распространение во всем мире.

Сотовая связь. Сотовая система подвижной связи позволяет эффективно использовать спектр радиочастот за счет многократного использования выделенных частотных ресурсов путем пространственного разнесения приёмопередатчиков с совпадающими рабочими частотами. Первые сотовые системы подвижной телефонной связи появились за рубежом в конце 1970-х гг., и с тех пор увеличение спроса на сотовые системы значительно опережает увеличение спроса на другие услуги связи. К середине 1980-х гг. аналоговые системы сотовой телефонной связи уже получили достаточно широкое распространение в

ряде стран. Однако аналоговым системам присущи серьезные недостатки, в частности, несовместимость различных стандартов, ограниченная область действия, низкое качество связи и её зависимость от удаления подвижного абонента от базовой станции (даже в радиусе установленной зоны связи), отсутствие техники засекречивания передаваемых сообщений и средств согласования с современными цифровыми сетями общего пользования с интеграцией услуг. Поэтому к концу 1980-х гг. стало ясно, что возможности применения аналоговой техники в этой области исчерпаны, и дальнейшее количественное и качественное развитие подвижных систем возможно только на основе цифровой техники. Переход систем сотовой связи на цифровую технику ознаменовал переход ко второму поколению систем мобильной связи и позволил использовать ряд новых эффективных решений, некоторые из которых рассматриваются ниже. Среди них - более эффективные модели повторного использования частот, временное разделение каналов как между собой, так и разделение во времени процессов передачи и приёма при дуплексной связи, эффективные методы борьбы с замираниями и искажениями сигналов, применение эффективных низкоскоростных речевых кодеков с шифрованием передаваемых сообщений для ведения засекреченной передачи, блочное и сверточное кодирование для защиты передачи данных от помех, более эффективные методы модуляции, программное управление процессами формирования логических каналов передачи сигналов связи и управления, современные протоколы связи на основе Эталонной модели ВОС МОС, принципы управления с помощью интеллектуальной сети.

В силу перечисленных причин в 1990-х гг. дальнейшее развитие систем сотовой телефонной связи шло по пути освоения цифровой техники и интеграции передачи речи и данных. Важнейшими элементами подвижной системы сотовой связи являются *мобильный аппарат (МА)*; *базовая станция (БС)*, обслуживающая соту (или ячейку); *контроллер базовой станции (КБС)*, обслуживающий обычно группу базовых станций; узел коммутации услуг подвижной связи, или короче – *узел коммутации мобильных услуг (УКМУ)*; *регистр местных подвижных абонентов (РМА)*; *регистр подвижных абонентов – посетителей (РАП)*; *регистр идентификации оборудования (РИД)* и центр проверки правомочности абонента, или *центр аутентификации (ЦА)*. Наряду с перечисленными крупными элементами, в ряд элементов должна быть поставлена *SIM-карта*, т.е. пластиковая абонентская микроэлектронная телекарточка, по которой производится проверка правомочности абонента и осуществляется тарификация, т.е. начисление платы за услугу связи. Если плата за пользование стационарным телефоном взимается в зависимости от нагрузки, поступающей по фиксированной абонентской линии, то плата за пользование подвижным телефоном взимается не с аппарата, а с используемой телекарточки. Её можно вставить в любой аппарат, и при применении такой карточки должны быть предусмотрены средства защиты от несанкционированного пользования.

Системы подвижной радиосвязи строятся по схеме «точка-многоточие», поскольку абонент может находиться в любой точке зоны, контролируемой базовой станцией. Для обеспечения эффективного доступа подвижных абонентов, прежде всего, необходимо выбрать структуру сети базовых станций. В такой сети за каждой базовой станцией должна быть закреплена определенная ячейка, или сота, а совокупность сот должна надежно перекрывать обслуживаемую территорию, по которой могут свободно перемещаться подвижные абоненты. Два из числа возможных вариантов организации отдельных сот, которые зависят от направленности антенн приёмопередатчиков базовой станции. При применении антенн с круговой диаграммой направленности сота имеет вид круга с центром в точке расположения базовой станции, а при применении направленных антенн сота имеет вид сектора, в вершине которого могут располагаться несколько базовых станций. В частности, три сектора по 120° , однако возможно также применение шести секторов по 60° или других решений. Важнейшим требованием, которое предъявляется к структуре сети базовых станций, является запрет на применение одинаковых частот в соседних ячейках, имеющих границу с рассматриваемой. Поэтому, кроме понятия соты, существует понятие куста (или кластера), объединяющего совокупность сот, не имеющих повторяющихся частот. Важной характеристикой схемы повторения ячеек является число ячеек, входящих в один куст. Оно может равняться 3, 7, 9, 12, 21, и т.д. Для нормальной работы сотовой сети конкретная частота может быть использована в каждом кусте только один раз. Размер ячейки зависит от системы сотовой связи и её абонентской емкости. При рассмотрении подобных задач часто пользуются терминами: макросота, микросота и пикосота. При переходе от макросоты к микросоте с радиусом несколько сотен метров емкость сети может быть увеличена в 5-10 раз.

Второе поколение систем сотовой связи получило широкое распространение во всем мире, хотя в США, Японии и Европе приняты различные стандарты. В европейских странах получила распространение система GSM, которая широко применяется не только в сетях общего пользования, но и в модернизированной версии применяется на железнодорожном транспорте. Сокращение GSM первоначально означало «Группа по разработке мобильной связи», но чаще его переводят как «Глобальная система связи», хотя на самом деле эта система таковой не является. Представление о мощностях, применяемых в системах сотовой связи второго поколения, даёт таблица 2.2, в которой приведены классы станций и абонентских устройств GSM по применяемой мощности.

Таблица 2.2.

| Максимальная мощность | | |
|-----------------------|---------------------|------------------|
| Класс | _____ | |
| | Абонентский аппарат | Базовая станция |
| 1 | 20 Вт (43 дБм) | 320 Вт (55 дБм) |
| 2 | 8 Вт (39 дБм) | 160 Вт (52 дБм) |
| 3 | 5 Вт (37 дБм) | 80 Вт (49 дБм) |
| 4 | 2 Вт (33 дБм) | 40 Вт (46 дБм) |
| 5 | 0,5 Вт (29 дБм) | 20 Вт (43 дБм) |
| 6 | | 10 Вт (40 дБм) |
| 7 | | 5 Вт (37 дБм) |
| 8 | | 2,5 Вт (34 дБм) |

Максимальная мощность излучения подвижного аппарата в зависимости от его назначения (автомобильный – постоянный или переносный, носимый или карманный) может меняться в пределах от 20 до 0,5 Вт (соответственно от 43 до 29 дБм). Указание мощности в децибелах более удобно для расчета бюджета радиолинии, когда значение усиления и затухания в различных звеньях тракта передачи просто суммируются с соответствующими знаками. Как и финансовый бюджет, бюджет радиолинии определяет достаточность выделяемых ресурсов для решения поставленной задачи, в данном случае для получения требуемого качества радиосвязи. При анализе такого бюджета необходимо учитывать как факторы, добавляющие децибелы (например, мощность передатчика, коэффициент усиления антенны), так и факторы, уменьшающие децибелы (например, затухание в линии или замирания). Обычно приёмник требует определенного уровня сигнала в децибелах плюс некоторый запас на замирания, обеспечивающий гарантированное качество связи. В отличие от аналоговых систем, в которых качество связи характеризуется влиянием внутренних и внешних помех, при рассмотрении цифровых каналов все виды помех сводятся к единственному их проявлению – появлению ошибок в отдельных передаваемых символах. Поэтому качество цифровых каналов передачи характеризуется просто частотой ошибок.

Важной особенностью сотовых сетей подвижной связи второго поколения является применение каналов с фиксированной пропускной способностью. Иначе говоря, в системе сотовой связи второго поколения повторяется уже обсуждавшийся недостаток систем с коммутацией каналов. Тем не менее, такая система получила самое широкое распространение. Вместе с тем задача дальнейшего повышения эффективности систем сотовой связи и интеграции услуг беспроводного доступа с подключением портативных персональных ЭВМ заставила конструкторов перейти к созданию третьего поколения систем сотовой связи. Эта система в литературе часто обозначается 3G. Повышение эффективности использования ресурсов в этой системе касается, прежде всего, частотного диапазона. Как уже обсуждалось, теорема Шеннона выводится в предположении о гауссовском законе распределения для сигналов и помех. Практически же о гауссовском распределении сигнала, занимающего узкую полосу частот предоставленного канала, говорить не приходится. Поэтому нельзя говорить и о хорошем приближении к теоретическим возможностям реализации пропускной способности выделенной полосы частот. Однако значительный шаг в направлении повышения пропускной способности может быть сделан, если для каждого сеанса связи предоставлять не отдельный узкий канал, а всю выделенную полосу частот. Тогда все работающие каналы связи займут одну и ту же широкую полосу частот, а их разделение может быть осуществлено с помощью кодов. Работе каждого такого канала будут мешать все другие каналы, работающие в этот момент времени. Однако создаваемые ими помехи обычно не превышают уровня естественных помех. Поэтому такая работа проходит нормально даже, когда число одновременно работающих каналов превышает количество частотных каналов, организуемых в такой же полосе частот в системе второго поколения. Более того, число одновременно работающих каналов может быть даже увеличено, и при этом работа будет продолжаться, но с пониженным качеством связи. В этом случае абонент сам решает, устраивает ли его такое качество связи или лучше перенести сеанс связи на другое время, когда нагрузка сети уменьшится. Описанный подход возвращает нас к возможности построения более гибкой системы организации каналов с разной пропускной способностью. Это позволяет организовать передачу больших файлов для ЭВМ или изображений по линии беспроводного доступа сотовой сети со скоростью до 2 Мбит/с.

6.5. Принципы действия системы сотовой связи GSM

Для лучшего представления о работе современных систем сотовой связи рассмотрим подробнее систему GSM, а именно её версию, работающую в диапазоне 900 МГц. Фактически в этой системе абонентский аппарат передаёт на одной из частот, находящихся в диапазоне 890-915 МГц, а принимает на частоте из диапазона 935-960 МГц.

Физические каналы связи. По аналогии со спутниковыми каналами направление передачи от абонентского аппарата к базовой станции называется восходящим, а направление от базовой станции к абонентскому аппарату – нисходящим. В дуплексном канале, состоящем из восходящего и нисходящего направлений передачи, для каждого из этих направлений применяются частоты, различающиеся точно на 45 МГц. В каждом из вышеуказанных частотных диапазонов создаются по 124 канала шириной по 200 КГц каждый. Этим каналам присвоены номера от 0 до 123, причем эти номера, обозначенные ниже буквой n , называются абсолютными номерами частотных каналов. Таким образом, частоты восходящего F_v и нисходящего F_n направлений передачи каждого из n каналов находятся по формулам:

$$F_v = 890 + 0,2n \text{ МГц}$$

$$F_n = F_v + 45 \text{ МГц.}$$

В распоряжение каждой базовой станции может быть предоставлено от одной до 16 частот, причем конкретное число частот, а также мощность передачи определяются в зависимости от местных условий и нагрузки.

В каждом из частотных каналов, которому присвоен абсолютный номер n и который занимает полосу 200 КГц, организуется по восемь каналов с временным разделением (временные каналы с номерами от 0 до 7), т.е. организуется восемь канальных интервалов. Когда абоненту выделяется канал, он получает не только частотный канал, но и один из конкретных канальных интервалов. Он должен вести передачу строго в определенном временном интервале, не выходя за его пределы. Иначе будут создаваться помехи в других каналах. Таким образом, работа передатчика происходит в виде отдельных вспышек, которые занимают строго определенный канальный интервал. Продолжительность канального интервала составляет 577 мкс, а всего цикла 4,616 мс. Выделение абоненту только одного из восьми канальных интервалов позволяет разделить во времени процесс передачи и приёма путем сдвига канальных интервалов, выделяемых передатчиком подвижного аппарата и базовой станции. Базовая станция всегда передаёт на три канальных интервала раньше подвижного аппарата. Чтобы не определять каждый раз номера используемых каналов для передачи и приёма, установлено общее правило нумерации каналов передачи подвижного аппарата и базовой станции.

Требования к характеристикам стандартной вспышки описываются в виде графика «мощность-время». Как видно из этого графика, процессы включения и выключения вспышки, которые сопровождаются изменением мощности на 70 дБ, должны укладываться в промежуток времени всего 28 мкс, а рабочее время, в течение которого передаются 147 двоичных разрядов, составляет 542,8 мкс. На рисунке показан формат нормальной (информационной) вспышки. Из него видно, что не все разряды несут полезную информацию. Здесь в середине вспышки располагается настроечная (или обучающая) последовательность 26 разрядов для защиты сигнала от помех многолучевого распространения. Это одна из восьми специальных легко распознаваемых последовательностей, по которым принятые сигналы правильно располагаются во времени. Такая последовательность ограждается одноразрядными указателями, обозначенными буквой $У$. С каждой стороны от неё располагается полезная кодированная информация в виде двух блоков по 57 двоичных разрядов. Эти блоки ограждаются граничными разрядами $Г$ (по три разряда с каждой стороны). Таким образом, вспышка переносит 148 разрядов, которые занимают время 546,12 мкс. К этому времени добавляется еще промежуток, равный 30,44 мкс так называемого защитного времени $ЗВ$, в течение которого передатчик «молчит». По продолжительности это время соответствует времени передачи 8,25 разрядов, хотя передачи в это время не происходит. Последовательность вспышек образует физический канал передачи, который характеризуется номером частоты и номером временного канального интервала. На основе этой последовательности вспышек (т.е. на основе этого физического канала) организуется целая серия логических каналов, которые выполняют различные функции. Перед тем, как продолжить рассмотрение других форматов вспышек, рассмотрим, какие логические каналы могут быть организованы на основе описанного физического цифрового канала.

Логические каналы связи. Логические каналы делятся на две группы: *каналы для передачи информации пользователя* (или, как говорят, оплачиваемой информации) и *каналы сигнализации*, по которым передается служебная (управляющая) информация. Пользователя может быть предоставлен один из следующих стандартных каналов:

НРК (нормальный речевой канал) – разговорный канал с полной скоростью передачи; по такому каналу передается цифровой речевой сигнал со скоростью передачи 13 Кбит/с.

ПРК (половинный речевой канал) – разговорный канал с половинной скоростью передачи 6,5 Кбит/с. В момент разработки системы, когда существовал только стандарт передачи с полной скоростью, предусматривалась возможность удвоения пропускной способности системы в результате разработки в будущем более эффективных методов кодирования речи. При этом речь шла не о понижении качества передачи за счет снижения скорости, а о создании новых методов кодирования речи, обеспечивающих такое же нормальное качество передачи, как и по каналу НРК.

НКПД (нормальный канал передачи данных) – канал передачи данных со скоростями 9,6/4,8/2,4 Кбит/с. В этом режиме для работы предоставляется речевой канал с полной скоростью передачи, который в абонентском аппарате переключается на режим передачи данных.

ПКПД (половинный канал передачи данных) – канал передачи данных со скоростями 4,8/2,4 Кбит/с. Для работы используется речевой канал с половинной скоростью передачи.

Что касается каналов сигнализации, то они могут быть, в свою очередь, разделены на каналы контроля радиосвязи, общие каналы управления и специальные каналы управления. **Каналы контроля радиосвязи** служат для передачи информации, необходимой для синхронизации и поддержания связи от базовой станции к подвижному абоненту. Это следующие три канала:

ЦКУ (центральный канал управления), по которому задаются параметры канала связи;

ККЧ (канал контроля частоты), по которому осуществляется контроль частоты передачи, и

КС (канал синхронизации), по которому осуществляется синхронизация.

Общие каналы управления (ОКУ) служат для организации физического канала между подвижным абонентом и базовой станцией, как по требованию подвижного абонента, так и по требованию базовой станции. К этим каналам относятся

КСД (канал случайного доступа); по этому каналу подвижный абонент запрашивает у базовой станции канал для осуществления процедур установления соединения (канал сигнализации) для последующего разговора или передачи данных.

КВ (канал вызова); по этому каналу базовая станция вызывает нужного подвижного абонента.

НКД (назначенный канал доступа); по этому каналу базовая станция назначает подвижному аппарату канал сигнализации.

Специальные каналы управления служат для передачи управляющей информации между подвижным аппаратом и базовой станцией. К таким каналам относятся

СИКУ (специальный индивидуальный канал управления); этот канал устанавливается между конкретным подвижным аппаратом и базовой станцией для установления соединения.

МСКУ (медленный совмещенный канал управления), который прилагается к пользовательскому каналу или каналу сигнализации (т.е. совмещен с ним и работает одновременно с передачей полезной информации или сигналов управления) и служит для обмена информацией о параметрах канала по ходу сеанса связи. В пределах одной соты могут находиться несколько подвижных аппаратов, находящихся на различном расстоянии от базовой станции. Поэтому время распространения сигнала и их затухание для разных подвижных аппаратов оказывается различным. Поскольку для подвижного аппарата важно как можно экономнее расходовать энергию батарейки, со стороны базовой станции осуществляется управление мощностью передачи подвижного аппарата ступенями по 2 дБ в зависимости от уровня сигнала, принимаемого базовой станцией. Одновременно регулируется время начала передачи вспышки с целью компенсации времени распространения сигнала. При значительном удалении подвижного абонента его вспышка может достичь базовой станции с такой задержкой, при которой она будет принята в течение промежутка времени, захватывающего соседний канальный интервал. Таким образом, приёмопередающая аппаратура снабжена средствами измерения характеристики передачи, и вся информация о результатах измерений и необходимые команды передаются именно по каналу МСКУ.

БСКУ (быстрый совмещенный канал управления) передаёт те же самые сообщения, что и канал МСКУ, но может прилагаться только к пользовательскому каналу. По нему могут передаваться сигналы управления во время занятости разговорного канала (одновременно с разговором).

Структуры сигналов. Структура вспышки характеризуется нормальной вспышкой, которая передается при работе виртуальных каналов передачи пользовательской информации (НРК, ПРК, НКПД и ПКПД), а также каналов БСКУ, ЦКУ, КВ, НКД, СИКУ, МСКУ. Виртуальные же каналы КСД, ККЧ и КС в соответствии с их особыми функциями используют видоизмененную структуру вспышки. Как известно, абонент проводного телефона привык к тому, что при снятии трубки он немедленно получает сигнал ответа станции (т.е. сигнал готовности к приёму набора номера). При задержке этого сигнала возникает сомнение в исправности телефона, которое беспокоит абонента и создаёт определенный дискомфорт. По этой

причине в сотовом телефоне также желательно как можно скорее подать сигнал готовности. Однако в этом случае, как будет видно из дальнейшего, подаче сигнала готовности предшествует довольно большой обмен управляющими сигналами между подвижным абонентом и базовой станцией. В целях ускорения начала этого обмена применяется случайный многостанционный доступ, при котором сигнал абонента о его желании установить связь обрабатывается более оперативно. Именно поэтому в логическом канале КСД, по которому подвижный абонент сообщает свое требование об установлении связи, для повышения надежности приёма этого требования независимо от расстояния до базовой станции защитное время и синхронизирующая последовательность увеличены.

На рисунке приводится структура вспышки канала коррекции частоты ККЧ. Этот канал служит для передачи эталона частоты от базовой станции в подвижный аппарат, поэтому для облегчения коррекции частоты на протяжении всего кадра посылается сигнал строго фиксированной частоты. Наконец, на рисунке показана структура вспышки синхронизации. Подвижный аппарат до считывания информации, передаваемой по каналу сигнализации КС, еще не располагает информацией о том, какая именно из восьми настроечных последовательностей передается от базовой станции. Поэтому в канале КС используется удлиненная синхронизирующая последовательность, а кодированные данные содержат информацию о настроечной последовательности, а также о сокращенном номере кадра, о чем говорится ниже. Перечень рассмотренных логических каналов с указанием их направлений приводится в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Направления передачи по логическим каналам

| Логический канал | Направления передачи |
|----------------------|-------------------------|
| НРК, ПРК, НКПД, ПКПД | ПА \leftrightarrow БС |
| БСКУ | ПА \leftrightarrow БС |
| ЦКУ | ПА \leftarrow БС |
| ККЧ | ПА \leftarrow БС |
| КС | ПА \leftarrow БС |
| КСД | ПА \rightarrow БС |
| КВ | ПА \leftarrow БС |
| НКД | ПА \leftarrow БС |
| СИКУ | ПА \leftrightarrow БС |
| МСКУ | ПА \leftrightarrow БС |

Логические каналы работают в определенных сочетаниях друг с другом. Например, при предоставлении абоненту разговорного тракта занимаются каналы КСД, КВ и НКД. Поэтому такую группу каналов, названную выше общими каналами управления, можно просто обозначить ОКУ, и ниже упоминать эти каналы в совокупности. Что касается остальных каналов, то и они применяются в зависимости от режимов работы в стандартных комбинациях. Этим комбинациям присвоены стандартные номера, обозначаемые римскими цифрами. Они перечислены ниже с дополнительными символами в скобках или через дробную черту: их смысл раскрывается в ходе дальнейших пояснений.

- I. НРК + БСКУ (Н) + МСКУ (Н)
- II. ПРК (0,1) + БСКУ (П-0,1) + МСКУ (П-0,1)
- III. ПРК (0) + БСКУ (П-0) + МСКУ (П-0) + ПРК (1) + БСКУ (П-1) + МСКУ (П-1)
- IV. ККЧ + КС + ОКУ + ЦКУ
- V. ККЧ + КС + ОКУ + ЦКУ + СИКУ/4 + МСКУ/4
- VI. ОКУ + ЦКУ
- VII. СИКУ/8 + МСКУ/8.

Иерархия циклов. Приведенного перечня, однако, недостаточно, чтобы понять, когда и как передаются отдельные логические каналы и как они распределяются в физическом канале, которому предоставлен единственный каналный интервал в цикле. Поэтому для рассмотрения принципов распределения каналных интервалов в пределах одного физического канала необходимо обратиться к схемам объединения циклов в сверхциклы, а затем и в более крупные последовательности. Поскольку цикл – это последовательность восьми каналных интервалов, принадлежащих восьми разным физическим каналам, порядок следования каналных интервалов в одном физическом канале удобно по схеме организации сверхцикла. Разговорные каналы и каналы передачи данных организуются с помощью 26-цикловых сверхциклов. По истечении 26 циклов та же самая структура повторяется вновь. При применении полного канала (комбинация I из приведенного выше списка семи комбинаций) первые 12 циклов сверхцикла предоставляются речевому каналу (или каналу передачи данных), затем следует один цикл, отводимый для управляющего канала МСКУ, после

которого вновь следуют 12 циклов речевого канала. Последний, 26-й цикл, остаётся неиспользованным. При передаче же информации пользователя с половинной скоростью (комбинации II и III) в физическом канале фактически организуются два логических канала ПРК (или ПКПД), а именно: ПРК-0 и ПРК-1, каждый из которых занимает по 12 циклов для передачи информации пользователя и по одному циклу для каналов МСКУ-0 и МСКУ-1, которые образуют комбинации со своими каналами ПРК-0 и ПРК-1. В этом случае 26-й цикл используется для управляющего канала при втором из указанных разговорных каналов. При рассмотрении можно заметить, что на нем отсутствует логический канал БСКУ, хотя в перечни логических каналов комбинаций I – III он входит. Фактически логический канал БСКУ в указанных комбинациях применяется, но обычно во время разговора сигнализация не требуется. Если же во время разговора все же возникает потребность послать сигнал управления, логический канал БСКУ просто занимает один из разговорных канальных интервалов. Длительность рассматриваемого сверхцикла составляет 120 мс.

Что же касается каналов сигнализации (т.е. каналов, передающих сигналы управления процессами установления соединений), то для них установлены 51-цикловые сверхциклы. Эти сверхциклы являются более сложными, так как они должны предусматривать возможность упаковки в одном физическом канале до шести различных логических каналов в соответствии с комбинациями IV-VII. Кроме того, специфика управляющих сигналов восходящего (ПА → БС) и нисходящего (БС → ПА) направлений требует различных структур для каждого из этих направлений. 51-цикловый сверхцикл для передачи управляющих сигналов имеет продолжительность 235,38 мс. Например, комбинация IV применяется базовыми станциями при предоставлении подвижным абонентам различных частотных каналов. Эта комбинация передаётся на основной частоте базовой станции в нулевом канальном интервале и может быть использована в каждой соте только один раз. При этом в качестве основной частоты может быть выбрана любая из 124 частот среди тех, которые имеются в распоряжении данной базовой станции, но она должна передаваться непрерывно. Подвижный абонентский аппарат должен найти в эфире эту частоту и принять сигналы коррекции частоты и синхронизации (ККЧ и КС), которые передаются в конкретных канальных интервалах некоторых известных циклов. Кроме того, в канальных интервалах четырех циклов (от 2 до 5) передается циркулярный канал управления ЦКУ. Канальные интервалы остальных циклов этого 51-циклового сверхцикла предоставляются для общих каналов управления. Из этой группы каналов канал вызова КВ и назначенный канал доступа НКД передаются от базовой станции подвижному абоненту, а канал случайного доступа КСД – от подвижного абонента базовой станции.

На базовой станции с небольшой нагрузкой (когда станция располагает только одной или двумя частотами) применяется комбинация V. Она, как и комбинация IV, применяется в канальном интервале 0 и только один раз на базовой станции. Четверка в обозначениях СИКУ/4 и МСКУ/4 указывает на то, что при помощи этой комбинации каналов можно поддерживать до четырех выделенных или приданных сообщений подвижных аппаратов. При этом соответствующие каналы СИКУ 1/2/3/4 и МСКУ 1/2/3/4 появляются парами, и каждая такая пара прилагается к одному соединению. Для восходящей и нисходящей передачи каналы СИКУ и МСКУ находятся в разных позициях сверхцикла, что позволяет одновременно обрабатывать запросы и передавать на них ответы в продолжение одного сверхцикла. Это же замечание относится к комбинации VII, в которой предусматривается восемь каналов СИКУ. Если интенсивность нагрузки в пределах соты достаточно большая, и на базовой станции используется более число частот (которое может достигать 16), то одновременно могут работать много каналов. Соответственно требуется большее количество каналов управления, которые могут быть предоставлены с помощью комбинации VI, которая работает в сочетании с комбинацией IV. Для этого случая и предусмотрена комбинация VII. Более подробно работа системы сотовой радиосвязи рассматривается в учебном пособии [Нейман В.И. Сотовая система подвижной радиосвязи. М.:МИИТ, 1996].

До сих пор процессы передачи и обработки пользовательской и служебной информации рассматривались отдельно, хотя в системе они объединены. Такое объединение происходит на следующем иерархическом уровне цикловой структуры, получившем название суперцикла. Суперцикл содержит 1326 циклов (общее наименьшее кратное чисел 26 и 51). Поэтому в суперцикле могут быть объединены 51 26-цикловый сверхцикл или 26 51-цикловых сверхцикла. Другой уровень иерархии – гиперцикл, который составляет из 2048 суперциклов. В процессе передачи циклы нумеруются, для чего предусмотрены три числа: число T1 по модулю 2048, число T2 по модулю 26 и число T3 по модулю 51. Модуль показывает диапазон чисел, который пробегает каждый из разрядов перед тем, как счет начинается снова. Очевидно, что число T2 вводится для подсчета циклов оплачиваемой информации, тогда как число T3 служит для подсчета циклов управления. Сокращенный номер цикла передаётся из базовой станции подвижному абоненту в канале синхронизации, что помогает поддерживать структуру циклов во времени.

Работа мобильного аппарата и процессы обмена сообщениями. Перейдем к рассмотрению работы подвижного аппарата. В момент включения в нем запускается процедура поиска организационного канала базовой станции. Это – чисто пассивный процесс, при котором на базовую станцию не передаётся никаких сообщений. Для получения максимального спектра мощности в организационном канале (комбинация IV: ККЧ + КС + ОКУ + ЦКУ) предпочтительно вести его передачу на базовой станции во всех канальных интервалах. На других частотах, на которых передаются только разговорные каналы и сигнализация, спектральная мощность оказывается меньшей, так как там сигналы передаются только в своих канальных интервалах. Путем последовательного измерения мощности на всех 124 частотах каналов подвижный аппарат

находит частоту с наибольшей мощностью и проверяет её на наличие канала коррекции частоты ККЧ. После того, как подвижный аппарат настроится на соответствующий стандарт частоты, находится канал синхронизации. Местоположение этого канала известно, так как он следует непосредственно после ККЧ. По этому каналу подвижный аппарат получает информацию о соте, обучающей последовательности и номере кадра (Т1, Т2 и Т3). Пользуясь этими данными, подвижный аппарат определяет параметры соты, которые содержатся в канале НКУ, частоты организационных каналов соседних сот, а также другую необходимую информацию. Теперь мобильный аппарат готов к работе.

Следующим важным этапом подготовки аппарата к установлению соединений является его регистрация, которая служит для поддержания информации о месте его нахождения. Этот процесс необходим для того, чтобы сеть имела точную информацию о включенных абонентских аппаратах. Во-первых, это нужно, чтобы отклонять уже на верхних уровнях иерархии управления вызовы к отсутствующим абонентам. А во-вторых, чтобы сообщать о присутствующих в сети аппаратах в регистр местных абонентов и в регистр абонентов-посетителей. Если в процессе регистрации окажется, что сота, в которой в данный момент находится подвижный абонент, не совпадает с данными регистрации, эта новая информация сообщается соответственно в регистр местных абонентов или абонентов-посетителей. Для регистрации подвижный абонент сначала запрашивает канал по каналу случайного доступа КСД. Базовая станция принимает этот запрос и предоставляет канал, сообщая об этом по каналу НКД, который также является общим каналом управления, и его слышат все подвижные аппараты в соте. После приёма этой информации подвижный абонент переключается на вновь выделенный канал, который устанавливается между данным подвижным абонентом и базовой станцией, а другие подвижные абоненты его не слышат. По этому каналу подвижный абонент вновь представляется сети и сообщает причину требования канала (в данном случае возобновление информации о местонахождении). Перед выполнением этой операции сеть проверяет правомочность абонента (процедура аутентификации). Если счета за переговоры оплачены, а карточка не является краденой, абонент регистрируется. Теперь сеть имеет информацию об этом абоненте, и может направлять к нему входящие вызовы. Последовательность обмена сообщениями при регистрации абонента показана в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Обмен сообщениями при регистрации абонента

| Логич.канал | ПА | БС | Операция |
|-------------|----|----|------------------------------------------------------------|
| КСД | → | | Запрос канала |
| НКД | | ← | Выделение канала |
| СИКУ | → | | Запрос регистрации (по новому каналу) |
| СИКУ | | ← | Требование подтверждения полномочий |
| СИКУ | → | | Подтверждение полномочий |
| СИКУ | | ← | Подтверждение регистрации с назначением временного статуса |
| СИКУ | → | | Подтверждение получения регистрации |
| СИКУ | | ← | Освобождение канала со стороны сети |

Здесь уместно заметить, что процесс регистрации подвижного абонента не ограничивается обменом информацией только между двумя сторонами (подвижным абонентом и базовой станцией). Дело в том, что таблица 2.4 отражает только радиообмен, тогда как его продолжение по проводной сети может быть описано более полной таблицей 2.5, на которой показаны также контроллер базовой станции КБС, узел коммутации подвижной связи УКПС и регистр абонентов-посетителей РАП.

Таблица 2.5. Процесс регистрации подвижного абонента в сети

| ПА | БС | КБС | УКПУ | РАП | Операция |
|----|----|-----|------|-----|-----------------------------------------------------|
| → | → | | | | Запрос канала |
| ← | ← | | | | Выделение канала |
| → | → | → | | | Заявка на входение в связь |
| ← | ← | ← | | | Требование подтверждения полномочий |
| → | → | → | | | Подтверждение полномочий |
| | | | ↔ | | Сравнение параметров |
| ← | ← | ← | ↔ | | Указание нового местоположения и временного статуса |
| → | → | → | | | Подтверждение нового местоположения и статуса |
| | | | ↔ | | Регистрация нового местоположения и статуса |

Рассмотрим теперь последовательность операций по установлению соединения, которая показана в таблице 2.6 опять только на уровне обмена сообщениями по радиоканалу. Здесь операции первых двух этапов совпадают с операциями таблиц 2.4 и 2.5, однако на третьем этапе в качестве причины затребования служебного канала указывается установление соединения. После этого опять происходит аутентификация, за которой может последовать команда на шифрование. После набора номера и выделения разговорного канала, последний используется сначала для сигнализации по каналу БСКУ, а затем происходит разговор. Аналогично происходит обмен сигналами при других рабочих операциях.

Таблица 2.6. Процесс установления соединения

| Логический канал | ПА | БС | Операция |
|------------------|----|----|--------------------------------------|
| КСД | → | | Запрос канала |
| НКД | ← | | Выделение канала |
| СИКУ | → | | Запрос соединения (по новому каналу) |
| СИКУ | ← | | Требование подтверждения полномочий |
| СИКУ | → | | Сообщение о полномочиях |
| СИКУ | ← | | Запрос о необходимости шифрования |
| СИКУ | → | | Сообщение о выбранном режиме связи |
| СИКУ | → | | Информация о вызываемом абоненте |
| СИКУ | ← | | Подтверждение обработки информации |
| СИКУ | ← | | Выделение разговорного канала |
| БСКУ | → | | Подтверждение получения канала |
| БСКУ | ← | | Контроль посылки вызова |
| БСКУ | ← | | Сигнал ответа абонента |
| БСКУ | → | | Подтверждение принятия ответа |
| НРК | ← | | Разговорное соединение |

6.6. Особенности каналов беспроводного доступа

Распространение радиоволн. В простейшем случае круговой передачи мощность радиосигнала в свободном пространстве теоретически уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния. Однако на практике сигнал затухает гораздо быстрее, в лучшем случае пропорционально кубу расстояния, поскольку энергия сигнала может поглощаться или уменьшаться на различных физических препятствиях, причем характер таких процессов сильно зависит от частоты передачи. Например, передача на частоте 1 ГГц почти не зависит от осадков или влияния атмосферы, а при частоте 10 ГГц эта зависимость может оказаться достаточно сильной. Частоты же от 30 ГГц и выше практически уже непригодны для наружного применения. С другой стороны, чем ниже частота, тем меньше затухание и меньше требуемая мощность передачи. Достаточно вспомнить, что во многих странах для телевизионной передачи в диапазоне 50-90 МГц мощность передатчика ограничивается значением 100 кВт, тогда как в диапазоне 500-800 МГц можно встретить телевизионные передатчики мощностью до 5000 кВт. Важнейшими причинами повышенного затухания сигналов являются теневые зоны, создаваемые зданиями или естественными возвышенностями на местности. Исследования условий применения подвижной радиосвязи в городах показали, что даже на очень близких расстояниях теневые зоны дают затухание до 20 дБ. Другой важной причиной затухания является листва деревьев. Исследования на частоте 836 МГц, проведенные в американском штате Нью-Джерси, показали, что в летнее время, когда деревья покрыты листвой, уровень принимаемого сигнала оказывается приблизительно на 10 дБ ниже, чем в том же месте зимой при отсутствии листвы. Замирания сигналов от теневых зон иногда называют медленными с точки зрения условий их приёма в движущемся автомобиле при проезде через такие зоны.

Важным явлением, которое приходится учитывать при создании сотовых систем подвижной радиосвязи, является отражение радиоволн и, как следствие этого явления, их многолучевое распространение. С одной стороны, это явление полезно, так как оно позволяет радиоволнам огибать препятствия и распространяться за зданиями, в подземных гаражах и тоннелях. Но, с другой стороны, многолучевое распространение порождает такие трудные для радиосвязи проблемы, как растягивание задержки сигнала, Релеевские замирания и эффект Доплера. Растягивание задержки сигнала получается из-за того, что сигнал, проходящий по нескольким независимым путям разной протяженности, принимается несколько раз. Поэтому один и тот же импульс повторяется, может выйти за пределы отведенного для него интервала вре-

мени и исказить следующий символ. Мы уже встречались с подобным явлением в гл. I и отмечали, что искажения, возникающие за счет растянутой задержки, называются *межсимвольной интерференцией*. При небольших расстояниях растянутая задержка не опасна, но если зону окружают горы, задержка может растянуться на многие микросекунды. Например, в городе Солт-Лейк-Сити (штат Юта, США), который окружен горами, наблюдали растянутую задержку до 50-100 мкс.

Релеевские замирания, названные по имени изучавшего это явление английского физика Дж. У. Рейли (1842-1919), вызываются случайными фазами, с которыми поступают отраженные сигналы. Если, например, прямой и отраженный сигнал принимаются в противофазе, т.е. со сдвигом фазы на 180° , суммарный сигнал может быть ослаблен почти до нуля. Релеевские замирания для конкретного передатчика и заданной частоты напоминают дырочки в швейцарском сыре, имеющие разную глубину и распределенные случайным образом. В этом случае при стационарном приёмнике избежать замираний можно, просто переставив антенну. При движении же транспортного средства такие «дырочки» проходятся ежедневно тысячами, отчего происходящие при этом замирания называются быстрыми.

Эффект Доплера, названный по имени австрийского физика К. И. Доплера (1803-1853), впервые обратившего внимание на это явление, проявляется при движении приёмника относительно передатчика и состоит в изменении частоты принимаемого колебания. Подобно тому, как тон шума движущегося поезда или автомобиля кажется неподвижному наблюдателю несколько выше при приближении транспортного средства и несколько ниже при его удалении, частота радиопередачи смещается при движении приёмопередатчика. Более того, при многолучевом распространении сигнала отдельные лучи могут давать смещение частоты в ту или другую сторону одновременно. В результате за счет эффекта Доплера получается случайная частотная модуляция передаваемого сигнала подобно тому, как за счет релеевских замираний происходит случайная амплитудная модуляция. Например, при движении автомобиля со скоростью 30 км/час и частоте передатчика 90 МГц среднее доплеровское смещение составляет около 30 Гц, что вполне достаточно для искажения звука. По описанным причинам многолучевое распространение создаёт большие трудности в организации сотовой связи движущихся абонентов. Преодолеть эти трудности удалось только благодаря цифровой технике, которая позволила создать важные новые принципы кодирования, модуляции и выравнивания характеристик каналов.

Кодирование сигналов. Как известно из предыдущего, один из важнейших результатов современной теории передачи информации состоит в рекомендации разделения задач кодирования источника и кодирования канала. Задачей кодирования источника информации является описание передаваемого сообщения в максимально краткой форме, т.е. удаление избыточности. Полученное таким образом сжатое сообщение становится более уязвимым к воздействию помех и скорее может оказаться искаженным при передаче. Поэтому после кодирования источника применяется кодирование канала, в задачу которого входит защита передаваемого сообщения от помех. Кодирование канала сопровождается введением в передаваемое сообщение некоторой избыточности. При этом вместо стихийной избыточности, присутствовавшей в первоначальном сообщении, теперь в него вносится избыточность, которая строго обоснована теоретически и гарантирует оговоренное качество передачи. Поскольку наиболее узким местом в сотовых системах подвижной радиосвязи является полоса частот радиоканала, задачам кодирования, как речевого сигнала, так данных, и последующей их защиты от помех уделяется первостепенное внимание.

Общий принцип цифровой передачи речи показан на рисунке, где ППФ – полосно-пропускающий фильтр, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь и ФНЧ – фильтр низкой частоты. После фильтрации и аналого-цифрового преобразования в точку А поступает цифровой поток со скоростью 104 Кбит/с. В системе GSM для канала с полной скоростью передачи в качестве метода кодирования источника речевого сигнала используется регулярное импульсное возбуждение и долгосрочное предсказание. Основное требование к кодексу состоит в сокращении избыточности в речевом сигнале и обеспечении перерывов передачи во время пауз речи. После этого происходит кодирование канала, задачей которого является защита минимальной передаваемой информации от помех. Для реализации кодирования с краткосрочным линейным предсказанием и регулярным импульсным возбуждением осуществляется запоминание последовательностей по 160 отсчетов, которые занимают промежутки времени по 20 мс (иначе говоря, запоминаются последовательности по $160 \times 13 = 2080$ разрядов). Записанные последовательности подвергаются анализу, в результате которого находятся 8 коэффициентов фильтрации и один возбуждающий сигнал для цифрового фильтра с переменным временем. Такой фильтр напоминает цифровую копию органов речи человека. Этот орган настраивается с помощью восьми параметров, а затем при его возбуждении появляется звук. В конструкции учтены свойства органов речи и слуха человека, в частности, соблюдается логарифмический масштаб громкости. Упомянутые выше 160 отсчетов разбиваются на 4 блока по 40 отсчетов (по 5 мс). Каждый такой блок воспроизводится в отдельных последовательностях (например, один блок занимает отсчеты 1, 5, 9, 13, ..., 37; второй блок – отсчеты 2, 6, 10, 14, ..., 38, и т.д.). Затем выбирается последовательность, обладающая наибольшей энергией, что и позволяет существенно уменьшить скорость передачи за счет устранения избыточности. Описанный анализ распространяется на сравнительно короткие отрезки времени и не может выявить долгие гласные звуки, захватывающие соседние блоки. Для устранения избыточности при произнесении

долгих гласных применяется долгосрочное предсказание. С этой целью в передатчике запоминаются переданные последовательности длительностью по 15 мс, с которыми сравниваются текущие последовательности. Из этих переданных последовательностей выбирается последовательность, которая наиболее коррелирована с текущей (т.е. больше других похожая на текущую), и передается только разность между текущей и выбранной последовательностью. Поскольку записанные в передатчике последовательности известны в приёмнике, нужно передать лишь указание о том, с какой из записанных последовательностей проведено сравнение. В результате достигается дальнейшее сокращение объёма переданной информации.

После описанной обработки в точку Б схемы поступает кадр цифрового речевого сигнала продолжительностью 20 мс, содержащий 260 разрядов и передаваемый со скоростью 13 Кбит/с, т.е. в 8 раз ниже скорости в точке А. Затем осуществляется кодирование канала, в результате которого вводится избыточность, защищающая передаваемую информацию от помех и доводящая общую скорость передачи по каналу до 22,8 Кбит/с (в точках В и Г). После обратного преобразования в точке Е воспроизводится исходный цифровой разговорный сигнал. Поскольку отдельные разряды в цифровом речевом сигнале, полученном в результате кодирования источника, имеют неодинаковую важность, они делятся на три подкласса и при кодировании канала подвергаются разным методам защиты. Наиболее важными являются разряды, которые несут информацию о параметрах фильтрации, об амплитуде сигнала блока и о параметрах долгосрочного предсказания. Эти разряды относятся к подклассу Ia (50 разрядов). Затем идет подкласс Ib (132 разряда, содержащие указатели и импульсы регулярного возбуждения, а также некоторые параметры долгосрочного предсказания). Остальные 78 разрядов относятся к классу II.

В системе GSM применяются два способа кодирования. В первом из них применяется циклический (блоковый) код, служащий для обнаружения неисправляемых ошибок. Этот код добавляет к разрядам подкласса Ia три проверочных разряда, по которым декодер может обнаружить, содержит ли этот подкласс неисправленные ошибки. Если в разрядах подкласса Ia обнаружатся ошибки передачи, весь разговорный кадр из 260 разрядов сбрасывается. Потерянный кадр в этом случае воспроизводится с помощью интерполяции на основе информации о предыдущем кадре. Было установлено, что при таком решении качество передачи оказывается лучше, чем в случае воспроизведения ошибочных разрядов подкласса Ia. Во втором способе кодирования применяется сверточный код, исправляющий ошибки. Действие этого кода распространяется как на разряды подкласса Ia вместе с проверочными разрядами, так и на разряды подкласса Ib. Эти две последовательности объединяются и увеличиваются на четыре разряда, принимающие нулевые значения. Упомянутые четыре разряда после выполнения кодирования возвращают кодер в исходное состояние. Применяемый код характеризуется параметрами $r = \frac{1}{2}$ и $K = 5$. Коэффициент $r = \frac{1}{2}$ говорит о том, что на каждый представленный разряд приходится ровно по 2 разряда, а $K = 5$ обозначает длину связи, на которую распространяется объединение разрядов. Эти характеристики можно уяснить по схеме сверточного кодирования, где приведена также схема сложения по модулю 2 (логическая операция отрицания равнозначности). Таким образом, в результате кодирования из поступающих 189 разрядов получается 378 разрядов, и к ним добавляются незащищенные разряды II класса. В результате общая длина блока оказывается равной 456 разрядов. Это составляет ровно 8 подблоков по 57 разрядов, где подобные подблоки располагаются до и после настроечной последовательности стандартной вспышки. При этом блок из 456 разрядов занимает не четыре последовательные вспышки, а распределяется по восьми вспышкам, чередуясь по определенному правилу с другими блоками. Такое решение принято с целью минимизации ущерба, который может возникнуть при потере вспышки.

Если в процессе передачи кадра цифрового речевого сигнала обнаруживается ошибка, приводящая к сбрасыванию этого кадра, то он замещается путем экстраполяции предыдущим кадром. Важным техническим решением, принятым в системе GSM, является прерывистая передача, которая управляется обнаружителями речи. Это позволяет экономить энергию батарейки подвижного аппарата, так как паузы занимают в разговоре менее 50% времени каждого направления передачи, и на это время передатчик подвижного аппарата может выключаться. Другое преимущество такого решения – уменьшение создаваемых помех. Таким образом, у речевого кодека появляются дополнительные функции, а именно: обнаружение пауз в разговоре, в том числе в условиях внешних помех (например, шума в автомобиле), создание комфортного шума и передача его параметров. По поводу двух последних функций отметим лишь, что при регистрации обнаружителем речи паузы через 480 мс посылаются специальные кадры «описания тишины» SID (Silence Description), содержащие информацию о фоновых шумах. Получая такие кадры, приёмник воспроизводит шум, создающий у говорящего иллюзию наличия обратного канала. На рисунке показана схема сопряжения радиоканала системы GSM с подвижным аппаратом и стационарным оборудованием базовой станции, работающей с цифровой сетью, в которой применяется передача с ИКМ. Наряду с описанными выше элементами, здесь показаны обнаружители речи ОР, блоки экстраполяции, блоки обработки комфортного шума и компандер, преобразующий 13-разрядный линейный код цифрового разговорного сигнала в 8-разрядный логарифмический код (компрессия), а также выполняющий обратное преобразование (экспандирование),

Выше рассматривались задачи кодирования информации, передаваемой по разговорному каналу. Несколько иначе происходит кодирование информации, передаваемой по каналу передачи данных. Здесь блоки данных могут иметь произвольное число разрядов N_0 , но и эти разряды должны быть защищены и распределены по вспышкам. Сводная схема кодирования информации в системе GSM показана на рисунке. Кроме непосредственного кодирования, здесь показаны также этапы перемешивания и транспонирования подблоков и их распределение по вспышкам с добавлением настроечных последовательностей и окончных разрядов. После этого, сформированная последовательность цифровых символов, несущая кодированную информацию, поступает в радиоканал, который начинается с модулятора. Модулятор управляет синусоидальными колебаниями высокой частоты с помощью поступающей на его вход цифровой последовательности. В результате этого и происходит передача цифровой последовательности в приёмник, где осуществляется его выделение в демодуляторе, а затем декодирование и воспроизведение переданной информации.

2.7.Packetная радиосвязь

В двух первых поколениях систем сотовой телефонной связи был реализован традиционный подход, связанный с применением техники коммутации каналов. В частности, второе поколение представлено несколькими современными системами с разделением каналов по частоте и по времени. Однако кроме телефонных аппаратов существует другое массовое абонентское устройство – персональный компьютер, пользователи которого также требуют доступа к сети связи (в данном случае, Интернет) независимо от наличия проводных линий. Но для беспроводного доступа персональной ЭВМ к сети Интернет система GSM мало пригодна. Максимальная скорость передачи данных по каналу системы GSM составляет всего 9,6 Кбит/с, что совершенно недостаточно для связи ЭВМ. Кроме того, система сотовой связи второго поколения позволяет решить проблему оптимизации расхода электроэнергии, но не оптимизации канальных ресурсов. Телефонный канал в системе GSM продолжает заниматься независимо от того, ведется ли фактический разговор. Поэтому при решении проблем третьего поколения систем сотовой связи естественно обратиться к пакетной передаче.

Развитие третьего поколения систем беспроводного доступа происходит с двух сторон. С одной стороны, в США развитие связи сети Интернет с беспроводными абонентами началось с внедрения протокола беспроводных приложений WAP (Wireless Application Protocol). Благодаря этому протокол IP становится платформой выбора любой цифровой сети. Одновременно снимаются многие препятствия на пути внедрения беспроводного доступа, и сотовые сети становятся сетями доступа к сети Интернет. С другой стороны, в Европе (компания Л.М. Эрикссон, Швеция) была разработана концепция Общей услуги пакетной радиосвязи GPRS (General Packet Radio Service). Эта услуга фактически превращает сеть Интернет в мобильную сеть. Она позволяет пользователям получать доступ как к корпоративным сетям пакетной передачи (сетям *Интернет*), так и к поставщикам услуг сети Интернет с мобильных персональных ЭВМ. Основу разработки обсуждаемой концепции составляет узел поддержки услуг пакетной радиосвязи, получивший название GSN (GPRS Support Node). Это – узел магистральной сети, обеспечивающий возможность взаимодействия пакетной передачи с сотовой сетью любого вида. В зависимости от положения в магистральной сети, узел GSN может быть реализован в виде узла обслуживания или узла шлюза. В первом случае узел обрабатывает пакеты соответствующей географической зоны, взаимодействуя с базовыми станциями через контроллеры базовых станций. Во втором случае узел взаимодействует с внешними наземными сетями общего пользования с коммутацией каналов или коммутацией пакетов. В таком узле применяется новая аппаратура коммутации пакетов, получившая название беспроводной пакетной платформы. Важной особенностью этой аппаратуры является возможность работы в режиме удержания канала пакетной передачи при отсутствии пакетов. Такая возможность поддерживается одновременно с эффективным мультиплексированием сообщений, поступающих из разных терминалов.

Дальнейшее расширение обсуждаемая технология получила в системе Packet GSM, разработанной в США. Это расширение позволяет дополнить технологию пакетной передачи данных приложениями, которые могут работать как в режиме реального времени (включая передачу речи), так и с промежуточными накопителями. Эту систему называют поколением 2,5G, которое позволяет плавно перейти от существующих сетей GSM к сетям третьего поколения. Для достижения приемлемого качества передачи речи при её маршрутизации через сети с коммутацией пакетов разрабатываются новые схемы кодирования информации, методы пакетизации и алгоритмы эффективного управления ресурсами. Привлекательность такой перспективы объясняется возможностью увеличения пропускной способности за счет мультиплексирования источников речевых сигналов, которые характеризуются чередованием периодов передачи речи и пауз. Как показывают расчеты, увеличение емкости сети при пакетной передаче речи может достичь 40% по сравнению с емкостью традиционной сети с коммутацией каналов.

КАРТА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ КАДРАМИ ПРОФЕССОР- СКО-ПРЕПОДАВАТЕЛЬСКОГО СОСТАВА

| № п/ п | Наименование дисциплины в соответствии с учебным планом | Обеспеченность преподавательским составом | | | | | | | | |
|--------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| | | ФИО должно быть по штатному расписанию | Какое образовательное учреждение профессионального образования окончил, специальность по диплому | Ученая степень и ученое звание | Стаж научно педагогической работы | | | Основное место работы, должность | Условия привлечения к трудовой деятельности (Штатный, совместитель; внутренний или внешний, с указанием доли ставки) | Кол-во часов |
| | | | | | Все го | В т.ч. педагогический | | | | |
| | | | | | | Все го | В том числе по преподаваемой дисциплине | | | |
| | Программирование в интернет | Шагжиев А.С., Ассистент кафедры ИУС | Амурский государственный университет, инженер по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления» | - | | | | Кафедра ИУС, ассистент | Совместитель, 0,25 ст | |