

**Государственный комитет связи и информатизации Украины**

**Украинская государственная академия связи им. А.С. Попова**

---

**Л.А. Никитюк**

# **ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ СЕТЕЙ**

**Учебное пособие**

Под редакцией докт. техн. наук Н.В. ЗАХАРЧЕНКО

**УТВЕРЖДЕНО**  
методическим советом  
академии связи  
Протокол № 4  
от 24.12.1999 г.

**Одесса 2000**

УДК 621.39  
681.324

**Никитюк Л.А.** Телекоммуникационные технологии цифровых сетей: Учеб. пособие /Под редакцией Н.В. Захарченко. – Одесса: изд. УГАС им. А.С. Попова, 2000. – 64 с.

**Рецензент** докт. физ.-мат. наук Ш.Д. КУРМАШЕВ

В пособии изложены базовые принципы и технологии транспортировки информации, применяемые в цифровых сетях. Подробно рассмотрены технологии как синхронного, так и асинхронного режимов переноса информации. Изложение методов мультиплексирования передачи и коммутации осуществляется в аспектах реализации конкретных режимов. Представлены наиболее продвинутые технологии, обеспечивающие передачу высокоскоростных цифровых потоков в синхронных, асинхронных и полностью оптических сетях.

Пособие предназначено для студентов старших курсов, аспирантов, а также специалистов в области телекоммуникационных технологий.

**ОДОБРЕНО**

на заседании  
кафедры  
сетей связи  
Протокол № 16  
от 6.07.99

## ВВЕДЕНИЕ

Понятие “**технология**” в области телекоммуникаций означает совокупность методов, определяющих *способ реализации режима переноса информации в сети с некоторым гарантированным уровнем качества обслуживания, который удовлетворяет ее пользователей.*

Термин “**режим переноса**” определяет *совокупность методов передачи и коммутации, с помощью которых в телекоммуникационной сети обеспечивается транспортировка информации от источника до получателя.* Термин введен секцией стандартизации Международного Союза Электросвязи (ITU-T) сравнительно недавно, по-видимому, в связи с тем, что в цифровых сетях границы между техникой коммутации и передачи существенно сдвигаются, а также по-новому перераспределяются задачи конечных систем и телекоммуникационной сети. Следует также отметить, что между процессами передачи и коммутации имеется достаточно сильная взаимосвязь, так как возможность применения того или иного метода коммутации в значительной степени определяется методом мультиплексирования (разделения) линии связи. Очевидно, что существует и обратная зависимость.

В общем случае все методы передачи можно разделить на детерминированные и статистические. Взаимозависимость методов передачи и коммутации приведена в таблице В.1.

Т а б л и ц а В.1 – Взаимозависимость методов передачи и коммутации

Принцип мультиплексирования (разделения линии)	Метод передачи	
	детерминированный	статистический
Пространственный	Пространственное разделение и коммутация каналов	-
Частотный	Частотное мультиплексирование	-
Временной	Синхронное временное мультиплексирование и коммутация временных каналов	Передача сообщений при пакетной коммутации. Асинхронное временное мультиплексирование и быстрая коммутация пакетов

Режим переноса информации в сети можно организовать **синхронным** способом либо **асинхронным**, используя для этого соответствующие ему телекоммуникационные технологии. Соответственно и технологии можно классифицировать как технологии синхронных и асинхронных режимов переноса. Именно такой подход используется в данной работе.

Технологический уровень реализации в сети того или иного режима переноса определяется двумя факторами: уровнем развития научно-технического

прогресса общества и потребностью человечества в услугах связи различного вида и качества.

До недавнего времени развитие телекоммуникационных сетей определялось, в основном, потребностями человечества в телефонной связи. Технической и технологической платформой их создания была электротехника, в связи с чем и сети получили название сетей электросвязи.

Данные статистики последних лет свидетельствуют, что среднегодовые темпы прироста емкости телефонных сетей составляют всего лишь 4-5 %, сетей передачи данных – 20-25 %, факсимиле – 40-50 %, локальных сетей – 50 % и более. Рекордсменом является глобальная компьютерная сеть Internet, трафик которой увеличивается на 20-25 % ежемесячно. Общее количество компьютеров в деловом и домашнем секторах в 2005 году достигнет 2,5 миллиардов. Таким образом, потребность в обмене компьютерной информацией стала определяющей в развитии современных телекоммуникаций.

Известно, что рост быстродействия персональных компьютеров происходит по экспоненте, достигая 175 % каждые два года. Необходимость упреждающего, относительно быстродействия ЭВМ, роста пропускной способности телекоммуникационных сетей явилась причиной такого быстрого развития коммуникационной индустрии.

Стратегия противодействия растущим объемам передаваемой информации сегодня строится на привлечении оптического волокна. Применение медных линий в качестве среды передачи практически исключено при строительстве новых магистралей, а при реконструкции и укреплении существующих - крайне ограничено.

Оптическое волокно в настоящее время считается самой современной физической средой передачи информации, а также самой перспективной средой для передачи больших потоков на значительные расстояния. Оно с успехом используется как для построения протяженных телекоммуникаций (сетей WAN, MAN), так и для локальных сетей LAN. Волоконная оптика находит применение практически во всех задачах, связанных с передачей и обработкой информации. Подключение персонального компьютера к информационной сети стало возможным с использованием волоконно-оптического миникабеля. Это дало толчок к развитию новых концепций построения сетей абонентского доступа. Экономический аспект оптического волокна также говорит в его пользу - оно изготавливается из кварца, т. е., по существу, из песка, запасы которого еще очень велики (в сравнении с медью).

Конечно, современная экономическая ситуация не позволяет сбрасывать со счетов огромное количество электрического кабеля, проложенного в эпоху безраздельного господства аналоговой телефонии. Ограниченная пропускная способность в сочетании с загруженностью кабельной канализации в городах, высокие эксплуатационные расходы на поддержание рабочего состояния кабеля заставляют искать пути решения задач, стоящих перед телекоммуникационными сетями, основанные на интенсификации существующих кабельных линий. Здесь на помощь приходят телекоммуникационные технологии. Это преж-

де всего цифровизация сетей связи на основе общего использования цифровых систем передачи и коммутации, а также разработка новых режимов переноса информации в цифровых соединительных трактах передачи.

Цифровизация телекоммуникационных сетей, в частности телефонной, явилась основой создания цифровой сети интегрального обслуживания ISDN. Такая сеть на основании унифицированных средств передачи, распределения, обработки, хранения и доставки информации обеспечила возможность предоставления пользователям широкого спектра информационных услуг.

С переходом к цифровой сети появляются технологии, специально разработанные для организации высокоскоростной цифровой связи по существующим медным линиям, например, технология DSL (Digital Subscriber Loop), начавшая свое развитие созданием устройств базового доступа BRA ISDN. Однако состояние телефонной сети не полностью удовлетворяет потребностям, которые предъявляются к ней как к транспортной среде телекоммуникационной системы. Телефонная сеть в общем-то не предназначена для передачи дискретных сообщений. Такие характеристики сети, как неравномерность амплитудно-частотной характеристики затухания и группового времени задержки, кратковременные перерывы связи, импульсные помехи, дрожание фазы, существенно влияют на верность передачи цифровых потоков. Коэффициент ошибок при трансляции сообщений через АТС электромеханических систем в отдельных случаях может достигать сотых долей, что является недопустимым. Резкое снижение скорости передачи наблюдается при прохождении участков городских телефонных сетей (ГТС) с аналоговыми системами передачи.

Сети документальной связи (телеграфной, низкоскоростной ПД) могут использоваться только по своему прямому назначению.

Узкая специализация сетей по видам связи (отдельным службам): телефонная, телеграфная, ПД и т. д. является следствием реализации концепции ЕАСС (Единой автоматизированной сети связи), определявшей развитие связи на территории бывшего Советского Союза. Результатом такой специализации является наличие большого количества выделенных сетей, которые являются вторичными по отношению к первичной сети линейных трактов, сетевых узлов кроссовых соединений линейных трактов и сетевых станций, где осуществлялось выделение каналов для организации сетей, транспортирующих информацию конкретных служб. Все построенные таким образом сети связи, с точки зрения рассмотрения их в качестве транспортных подсистем, страдают целым рядом недостатков, важнейшими из которых являются:

- зависимость от вида информации, которую они транспортируют;
- отсутствие гибкости к изменению объемов передаваемой информации, скорости передачи, времени доставки и верности;
- низкая эффективность использования ресурсов.

Многие из этих недостатков сохраняются при переходе к узкополосной ISDN.

С системных позиций концепция построения телекоммуникационной сети должна основываться на построении единой транспортной системы, способной

единым способом транспортировать все виды информации, распределяя свои сетевые ресурсы оптимальным образом на динамической основе.

В традиционных сетях электросвязи, построенных на базе существующих кабельных, коаксиальных линий связи, узким местом, с точки зрения пропускной способности, является соединительный тракт от абонента до абонента, обеспечивающий передачу цифрового потока со скоростью 64 кбит/с (с применением сетевых технологий - до 2 Мбит/с).

Достижения в области волоконно-оптических систем, сверхбольших интегральных схем, а также развитие новых сетевых технологий, которые позволяют сегодня создавать транспортные системы, обеспечивающие скорости передачи цифровых потоков 155 Мбит/с, 622 Мбит/с, 2,5 Гбит/с и больше при очень низкой вероятности ошибок, выдвигают на первый план создание высокопроизводительных систем коммутации. Все это, в свою очередь, стимулирует разработки как синхронных так и асинхронных режимов переноса информации с применением продвинутых технологий.

Используемая технология и режим переноса являются определяющим и фактором и при оценке пригодности той или иной телекоммуникационной сети в качестве транспортной среды при построении современных информационных сетей.

## 1 ТЕХНОЛОГИИ СИНХРОННЫХ РЕЖИМОВ ПЕРЕНОСА

### 1.1 Синхронное временное мультиплексирование

Режим коммутации временных каналов, базирующийся на принципе синхронного временного мультиплексирования при транспортировании информации от одного узла коммутации к другому, известен как **синхронный режим переноса STM** (Synchronous Transfer Mode).

Под **мультиплексированием** в цифровых сетях понимается объединение  $n$  низкоскоростных цифровых потоков в один высокоскоростной поток. Мультиплексирование применяется с целью более эффективного использования пропускной способности линии связи, в связи с чем в связистской терминологии существуют еще понятия “уплотнение”, “разделение” линии связи.

Исходные цифровые потоки, формируемые в результате работы различных сетевых приложений (от различных служб), могут существенно отличаться по природе. Это и передача постоянного битового потока, передача файлов данных, речевых и видеосигналов в цифровой форме. Таким образом, мультиплексирование обеспечивает еще и адаптацию среды передачи линии связи сразу под множество разнородных сетевых приложений.

Цифровой поток каждого приложения представляет собой сигнал, соответствующий передаваемому информационному сообщению. Временное синхронное мультиплексирование заключается в том, что вся полоса среды распространения линии связи на короткий промежуток времени, длительностью  $T$ , поочередно предоставляется сигналам  $n$  приложений. Указанный промежуток

времени называется “**тайм-слотом**”. Интервал  $T_{ц} = nr$ , соответствующий  $n$  тайм-слотам, называется **циклом передачи**.

Характерной особенностью *синхронного временного мультиплексирования* является тот факт, что в мультиплексном сигнале каждому исходному сигналу соответствует тайм-слот со строго фиксированным порядковым номером в пределах цикла передачи  $T_{ц}$ . Следует отметить, что при мультиплексировании для сигнала приложения мультимедиа (голос + видео + данные) выделяется подряд сразу несколько тайм-слотов.

Устройство, принимающее несколько потоков (разных сигналов) и передающее их в линию в виде мультиплексного сигнала, называется **мультиплексором MUX**, а устройство, выполняющее обратную функцию на другом конце линии, - **демультиплексором DEMUX**. MUX и DEMUX должны работать синхронно и синфазно, так как тайм-слоты относительно  $T_{ц}$  на входе и на выходе линии связи должны совпадать. С этой целью используются устройства с высоким стандартом частоты, называемые **таймерами**. Обычно в системах двунаправленной (дуплексной) связи функции мультиплексирования и демультиплексирования объединяются в одном устройстве, которое также называется мультиплексором.

Современные мультиплексоры разделения времени являются каналообразующим оборудованием. Их основное отличие от традиционных систем уплотнения с импульсно-кодовой модуляцией состоит в следующем:

- мультиплексоры позволяют передавать в линию цифровые потоки различных скоростей (они называются гибкими мультиплексорами);
- мультиплексоры, обладающие свойством “добавления/выделения” (drop & insert), позволяют выделять из общего потока часть сигналов либо добавлять сигналы к общему линейному потоку. Это дает возможность строить сети сложной топологии.

## 1.2 Мультиплексирование речевых сигналов

Речевой сигнал по природе является аналоговым и для передачи в информационной сети преобразуется в цифровую форму.

Известно, что основная полоса частот речевого сигнала была оптимизирована по индексу артикуляции (принятому 0,7), что соответствует уровню разборчивости слов 85-90 % и составляет 3100 Гц. Эта полоса размещается в диапазоне 0,3-3,4 кГц и соответствует стандартизированной полосе канала тональной частоты (ТЧ). Учитывая, что указанная полоса должна фильтроваться реальным аналоговым полосовым фильтром, имеющим конечную крутизну спада частотной характеристики в переходной полосе, предложено использовать полосу 4 кГц в качестве расчетной ширины полосы стандартного канала тональной частоты, что обеспечивает защитную полосу между двумя соседними каналами 900 Гц.

Преобразование речевого сигнала в цифровую форму осуществляется на основании импульсно-кодовой модуляции (ИКМ).

Схема этого преобразования включает следующие шаги (рис. 1.1).

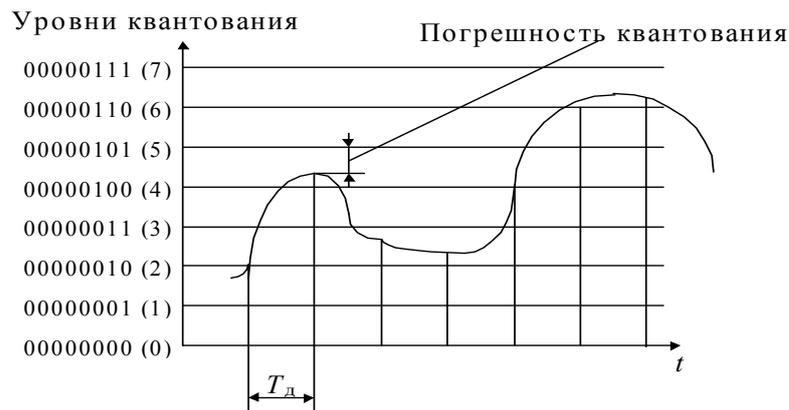


Рисунок 1.1 - Преобразование непрерывного сигнала в ИКМ сигнал

1 **Дискретизация** аналогового сигнала. В соответствии с теоремой Котельникова, частота дискретизации аналогового сигнала, обеспечивающая его восстановление без искажения, равна удвоенной максимальной частоте спектра сигнала. Исходя из верхней границы диапазона речевого сигнала частота дискретизации  $F_d = 2 \times 4 \text{ кГц} = 8 \text{ кГц}$ , что соответствует периоду дискретизации  $T_d = 1/8 = 125 \text{ мкс}$ .

2 **Квантование** амплитуд дискретных отсчетов сигнала по уровню, т. е. деление мгновенной амплитуды на некоторое число уровней (уровней квантования). Для качественной передачи речи принимается 256 уровней квантования. В качестве величины амплитуды дискретного отсчета речевого сигнала выбирается ближайший к ее значению уровень квантования. Разница между значениями амплитуды сигнала и ближайшим уровнем квантования определяет погрешность преобразования речевого сигнала в цифровую форму и называется *ошибкой квантования*  $\Delta$ .

3 **Кодирование** квантованных амплитуд дискретных отсчетов речевого сигнала. Если номера уровней квантования представить в двоичном коде, то процесс кодирования сводится к выбору номера ближайшего к значению дискретной амплитуды сигнала уровня квантования. Номер уровня квантования в двоичном коде и передается в линию. Количество позиций двоичного кода цифрового номера уровня квантования равно 8 (один байт), что обеспечивает возможность закодировать номер самого верхнего уровня квантования  $255 \rightarrow 11111111$ .

Кодовая комбинация, соответствующая одному дискретному отсчету амплитуды речевого сигнала, называется **выборкой**. Учитывая, что выборки речевого сигнала поступают в линию с частотой 8 кГц, последовательно одна за другой, получаем цифровой поток со скоростью  $C = 8 \text{ бит} \times 8 \text{ кГц} = 64 \text{ кбит/с}$ . Скорость 64 кбит/с определена Международным Союзом Электросвязи (ITU-T, секция телекоммуникации Т) в качестве скорости основного цифрового канала, который еще называется потоком нулевого уровня DSO (Digital Service/Signal of Level 0).

Импульсно-кодовая модуляция является основой построения цифровых систем передачи (ЦСП). Существует несколько реализаций цифровых систем, признанных в качестве стандартных:

- ИКМ-30/32 (СНГ) - 30-канальная;
- СЕРТ (Европа) - 30-канальная;
- Bell D1 (США) - 24-канальная;
- D2 (Bell, США) - 24-канальная;
- U.K. (Англия) - 24 канальная.

Принцип построения ЦСП показан на рис. 1.2.

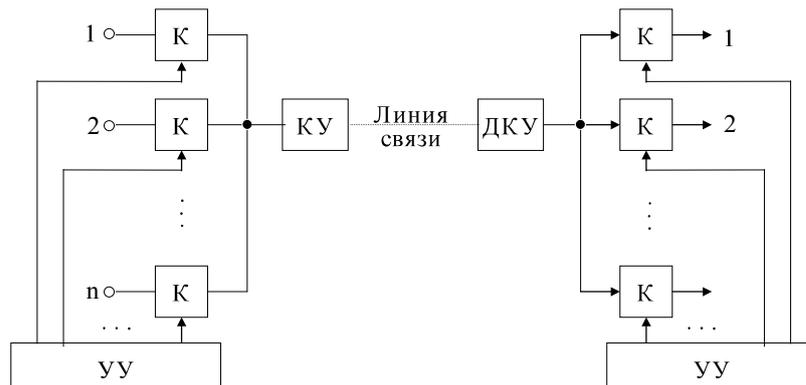


Рисунок 1.2 - Структурная схема ЦСП:

К - электронные ключи, обеспечивающие дискретизацию непрерывных информационных сигналов; УУ - управляющие устройства, управляющие состоянием (замкнуто, разомкнуто) ключей; КУ - кодирующее устройство, в котором групповой сигнал подвергается квантованию и кодированию; ДКУ - декодирующее устройство, превращающее ИКМ сигнал обратно в групповой амплитудно-импульсный сигнал (АИМ сигнал)

Функционирование такой системы связано с разбиением времени передачи на повторяющиеся циклы, длительностью  $T_d$ . Каждый цикл, в свою очередь, разбивается на тайм-слоты, число которых равно количеству организуемых в линии каналов.

Рассмотрим структуру (формат) многоканального сигнала, получаемого на выходе 30-канальной ЦСП.

Аппаратура ИКМ-30/32 образует в линии 32 цифровых канала, из которых 30 предназначены для передачи информационных сигналов, один - для синхронизации и один - для сигнализации (передачи служебных сигналов перед сеансом связи).

Время цикла  $T_{ц}$  в ИКМ-30/32 соответствует периоду дискретизации  $T_d = 125$  мкс. Для того чтобы в течение этого времени передать 32 цифровых потока со скоростями 64 кбит/с каждый, в линии связи необходимо обеспечить скорость

$$C_{л} = 64 \text{ кбит/с} \times 32 = 2048 \text{ кбит/с.}$$

Длительность тайм-слота при этом

$$\tau = 125 \text{ мкс} / 32 = 3,90625 \text{ мкс.}$$

В течение этого времени последовательно в каждом из 32-х временных каналов передается 1 байт. В течение цикла  $T_{\text{ц}}$  передается соответственно: 8 бит  $\times$  32 = 256 байт. Формат сигнала в 256 байт показан на рис. 1.3. Он называется **кадром**, или **фреймом**.

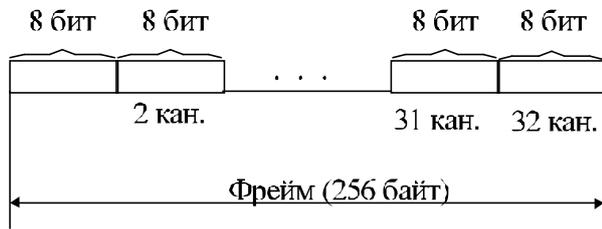


Рисунок 1.3 - Формат линейного сигнала ИКМ-30/32

Количество бит, соответствующее конкретному временному каналу (тайм-слоту) в общем формате фрейма, носит название **поле**, или **нибл** (nibble). Положение каждого поля строго фиксировано в структуре фрейма. Это достигается применением в ЦСП синхронизации.

Синхронизация осуществляется передачей специального синхросигнала (например, 1111111) по каналу синхронизации (например, 31-му). Так как сигнал синхронизации в данном случае передается по внешнему (по отношению к информационным) каналу, говорят, что выполняется идеальное мультиплексирование.

### 1.3 Мультиплексирование потоков данных

При временном мультиплексировании потоков данных на входы мультиплексора подаются  $n$  двоичных потоков данных, происхождение которых не связано с формированием выборок для отсчетов амплитуд непрерывных сигналов. Поэтому из входных каналов можно выбрать любую логически осмысленную последовательность бит в качестве выборок сигналов при формировании фрейма. Такой процесс формирования выборок называется **интерливингом** (interleaving).

Различают следующие виды интерливинга:

- **бит-интерливинг** (чередование битов, по одному из каждого канала);
- **байт-интерливинг** (чередование байтов, по одному из каждого канала);
- **символьный интерливинг** (чередование количеств битов, необходимых для кодирования одного символа передаваемого текста, из каждого канала. Так, например, при передаче файла, представленного компьютерным алфавитом ASCII международной версии, длина поля кода одного символа составляет 8 бит, американской версии - 7 бит);
- **блок-интерливинг** (чередование блоков по несколько байт с каждого канала).

Сигналы синхронизации и сигнализации при формировании фрейма могут передаваться как по отдельным выделенным временным каналам (идеальное мультиплексирование), так и по информационным каналам.

В общем случае при мультиплексировании потоков данных различают следующие виды синхронизации:

- **по отдельным полям (временным каналам);**
- **по фрейму в целом;**

- **по каждому биту** в пределах каждого поля.

Для синхронизации в структуру фрейма после любой из перечисленных групп вставляется по одному или несколько дополнительных битов. Можно сформировать и более сложную повторяющуюся структуру, состоящую из  $m$  фреймов и  $k$  полей синхронизации, так называемый **мультифрейм**.

Без учета синхронизации мультиплексор создает регулярный поток фреймов. Синхронизация эту регулярность нарушает.

Сигнализация также может быть выполнена в отдельном канале либо размещением битов сигнализации в полях выборок с уменьшением при этом разрядной сетки поля, например, на 1 бит.

При всем возможном разнообразии, получаемая структура фрейма (его формат) для конкретной системы передачи является фиксированной.

По аналогии с длительностью цикла передачи  $T_{\text{ц}}$  в идеальном мультиплексировании, здесь можно говорить о *периоде повторения фрейма* - времени, затрачиваемом на один полный цикл, плюс времени передачи вставляемых битовых групп синхронизации и сигнализации.

#### 1.4 Коммутация временных каналов SC (Switching Circuits)

Предоставление связи корреспондирующим абонентам на основании метода коммутации каналов (КК) включает три фазы:

**1 Установление дуплексного канала.** Для этого в сеть передается служебная информация, содержащая в кодовом виде адрес вызываемого абонента. На основе этой информации устанавливается маршрут передачи сообщения, соединяющий опорные станции через цепь промежуточных узлов коммутации. Служебная информация формируется самим абонентом (набором номера вызываемого абонента) или его терминалом и передается по каналам сигнализации или по информационным каналам.

**2 Осуществление сеанса связи.** После установления канала абоненты могут начинать процесс обмена информационными сообщениями. При этом ресурсы сети, обеспечивающие данный сеанс связи, полностью закреплены за установленным каналом связи и, в случае пауз при передаче информации, не могут быть предоставлены для организации других соединений.

**3 Отсоединение канала.** После соответствующей команды о прекращении сеанса связи от одной из опорных станций по каналу сигнализации проходит сигнал разъединения, в результате чего занимаемые ресурсы высвобождаются в сеть.

Для установления канала коммутационная система УК должна обеспечить взаимные соединения любых каналов. Для коммутации каждого входящего временного канала с каждым исходящим необходимо иметь возможность переадресации выборки, определяющей амплитуду речевого сигнала (байта информации) из одного временного интервала в любой другой.

В настоящее время используются два принципа построения коммутационных блоков (КБ): *пространственный* и *временной*.

**Пространственный принцип построения КБ.** Соединение осуществляется в одной и той же временной позиции каналов входящей уплотненной линии (ВУЛ) с каналами исходящей уплотненной линии (ИУЛ). В этом случае 8-разрядная выборка поступает из канала  $i$  ВУЛ в канал  $i$  ИУЛ. Структурная схема пространственного однокаскадного КБ показана на рис. 1.4.

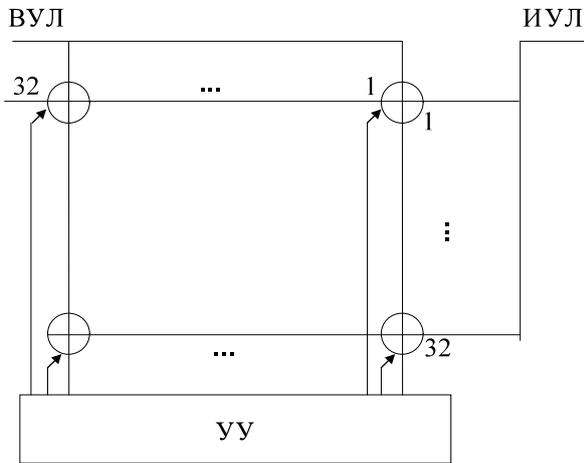


Рисунок 1.4 - Пространственный однокаскадный КБ

В определенные моменты времени с управляющего устройства (УУ) подаются сигналы для замыкания соответствующих точек коммутации. Эти точки могут быть реализованы на электронных элементах (электронных ключах).

Очевидно, что при таком построении КБ коммутируются цифровые каналы ВУЛ с цифровыми каналами ИУЛ только в одной и той же временной позиции (в одноименных тайм-слотах), т.е. в процессе коммутации нет возможности изменить временную позицию. Осуществить такую возможность позволяет *временной* принцип построения КБ.

Осуществить такую возможность позволяет *временной* принцип построения КБ.

**Временной принцип построения КБ** основан на установлении связи входа с выходом через буферное запоминающее устройство (БЗУ) (рис. 1.5).

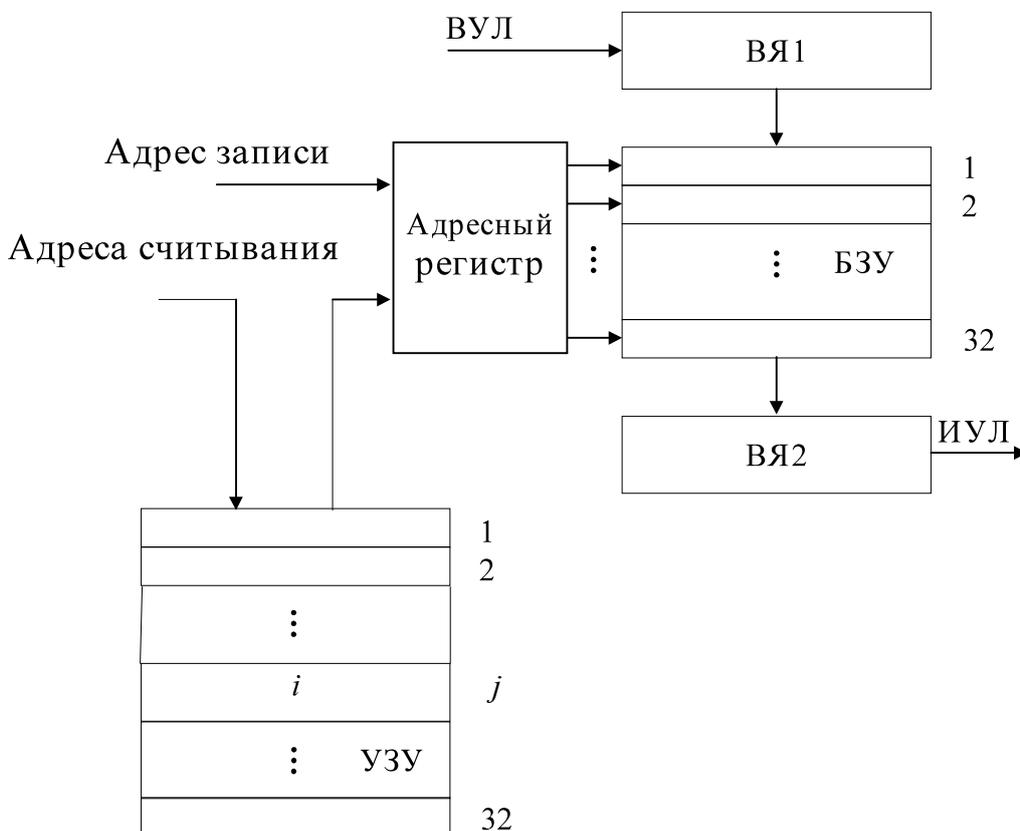


Рисунок 1.5 - Коммутационный блок с временной коммутацией

Канальные выборки, последовательно поступающие с ВУЛ в результате демультимплексирования, через вспомогательную ячейку ВЯ1, куда накапливается 8-разрядная кодовая комбинация при побитовом ее поступлении, размещаются в БЗУ в ячейку с адресом, соответствующим номеру временного канала. В течение времени одного тайм-слота производится одна запись в БЗУ канальной выборки, поступающей из ВУЛ, и одно считывание канальной выборки из БЗУ, направляемой в ИУЛ. В связи с этим канальный интервал (тайм-слот) разделен на две фазы. В первой производится запись, во второй - чтение. Считывание выборок осуществляется с помощью управляющего запоминающего устройства (УЗУ). В нем на этапе установления связи с помощью служебных сигналов записывается информация в номерах выходных временных каналов, с которыми должны быть скоммутированы последовательно входные временные каналы. Так, если входной канал  $i$  коммутируется с выходным каналом  $j$ , то в  $j$ -ю ячейку УЗУ записывается число  $i$ . Во второй фазе тайм-слота с номером  $j$  подается сигнал "адреса считывания" и из ячейки  $j$  УЗУ выбирается число  $i$ . Оно помещается в адресный регистр, в результате чего содержимое ячейки с номером  $i$  из БЗУ считывается во вспомогательную ячейку ВЯ2. Из ВЯ2 кодовая комбинация побитово передается в канал ИУЛ.

К достоинствам метода КК относятся возможность организации сеанса связи в режиме диалога и отсутствие задержек в передаче сообщений. Это определяет приоритет применения метода КК для передачи речевых сообщений.

К недостаткам метода КК следует относить неэффективное использование ресурсов сети (простои в паузах) и возникновение повторных вызовов в случае отказа в установлении соединения. Отказ в установлении соединения возникает не только при занятости вызываемого абонента, но и в случае занятости одного из промежуточных участков соединительного тракта под другой соединительный тракт. Повторные вызовы, в свою очередь, создают дополнительную нагрузку на сеть.

### 1.5 Технологии высокоскоростной передачи цифровых потоков

Эффективное использование широкополосных линий связи, например ВОЛС, требует увеличения скорости передачи цифровых потоков до нескольких тысяч, сотен и более килобитов в секунду. Используя каскадное включение мультиплексоров, можно формировать различные уровни скоростей: DS0, DS1, DS2, DS3, DS4 и т. д. (рис. 1.6).

Все они объединяются общим понятием **цифровой иерархии**. Цифровая иерархия позволяет довести процесс мультиплексирования до необходимого уровня, дающего требуемое число каналов уровня DS0 (со скоростью 64 кбит/с), выбирая разнообразные коэффициенты мультиплексирования  $n$ ,  $m$ ,  $k$ ,  $l$ .

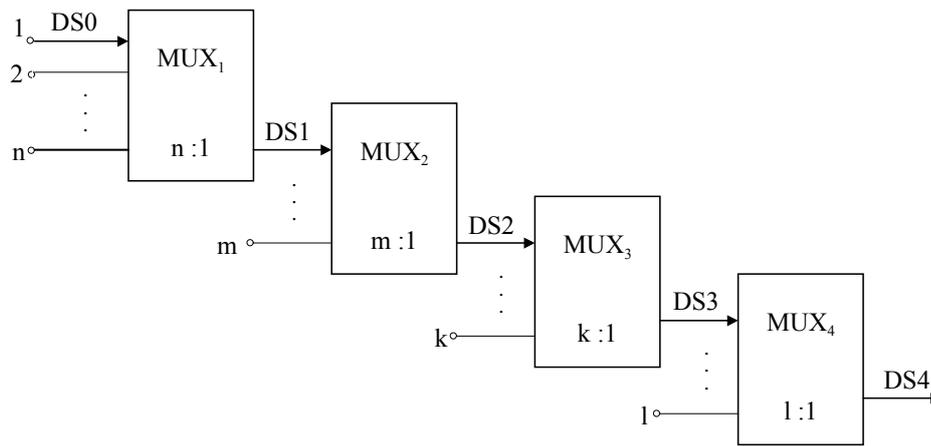


Рисунок 1.6 - Цифровая иерархия скоростей

В начале 80-х годов в мире были реализованы три цифровых иерархии.

**Первая иерархия**, принятая в США и Канаде, на выходе мультиплексора MUX<sub>1</sub> обеспечивает поток DS1 с коэффициентом мультиплексирования  $n = 24$  и скоростью

$$T1 = 64 \times 24 = 1544 \text{ кбит/с (1,5 Мбит/с).}$$

На следующих уровнях используются коэффициенты мультиплексирования  $m = 4$ ;  $k = 7$ ;  $l = 6$ , что обеспечивает получение последовательности скоростей:

$$T2 = T1 \times 4 = 6 \text{ Мбит/с (для уровня DS2);}$$

$$T3 = T2 \times 7 = 45 \text{ Мбит/с (для уровня DS3);}$$

$$T4 = T3 \times 6 = 274 \text{ Мбит/с (для уровня DS4).}$$

**Вторая иерархия**, принятая в Японии, с учетом скорости DS0 и ряда коэффициентов мультиплексирования  $n=24$ ;  $m=4$ ;  $k=5$ ;  $l=3$  обеспечивает получение следующих скоростей:

$$T1 = 64 \times 24 = 1,5 \text{ Мбит/с (для уровня DS1);}$$

$$T2 = T1 \times 4 = 6 \text{ Мбит/с (для уровня DS2);}$$

$$T3 = T2 \times 5 = 32 \text{ Мбит/с (для уровня DS3);}$$

$$T4 = T3 \times 3 = 98 \text{ Мбит/с (для уровня DS4).}$$

**Третья иерархия**, принятая в Европе и Южной Америке, с учетом скорости DS0 и коэффициентов мультиплексирования  $n = 30$  (32);  $m = 4$ ;  $k = 4$ ;  $l = 4$ , обеспечивает скорости соответственно:

$$E1 = 64 \times 30 = 2 \text{ Мбит/с (для уровня DS1);}$$

$$E2 = E1 \times 4 = 8 \text{ Мбит/с (для уровня DS2);}$$

$$E3 = E2 \times 4 = 34 \text{ Мбит/с (для уровня DS3);}$$

$$E4 = E3 \times 4 = 140 \text{ Мбит/с (для уровня DS4).}$$

Европейская иерархия позволяет организовывать соответственно 30, 120, 480 и 1920 каналов уровня DS0 в линии, что нашло отражение в названии систем передачи, таких, как ИКМ-30, ИКМ-120, ИКМ-480 и т. п.

Параллельное развитие различных иерархий тормозило развитие мировых глобальных телекоммуникаций и Международный Союз Электросвязи (ITU-T) предпринял меры по их унификации и возможному объединению. В результате

были стандартизованы в качестве основных уровни DS1, DS2 и DS3 - первой иерархии и уровни DS1, DS2, DS3 и DS4 - второй и третьей иерархий, а также указаны коэффициенты перекрестного мультиплексирования:

$$T2_{\text{второй иерархии}} = E1 \times 3;$$

$$E4 = (T3_{\text{первой иерархии}} \times 3) \text{ или } (T3_{\text{второй иерархии}} \times 4).$$

Стандартизованные уровни иерархий получили общее название **плезиохронная цифровая иерархия PDH** (Plesiochronous Digital Hierarchy).

### 1.5.1 Технология PDH

“Плезио” означает “псевдо-”, отсюда “плезиохронная” - “как бы синхронная”. Характерной особенностью плезиохронных сетей является отсутствие общего эталонного источника синхронизации на сети. Наличие местных синхронизирующих таймеров обеспечивает синхронизацию лишь при приеме/передаче на уровне DS1 (рис. 1.7).

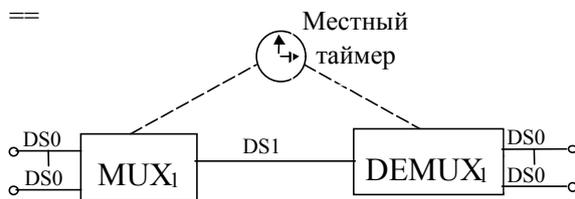


Рисунок 1.7 - Работа мультиплексов в режиме прием/передача

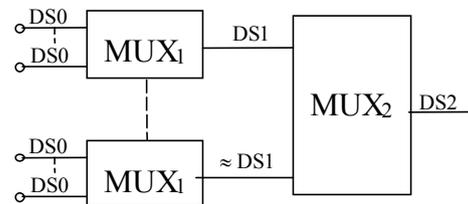


Рисунок 1.8 - Каскадное включение мультиплексов

Однако при каскадном включении (рис. 1.8) синхронная работа мультиплексов  $MUX_1$  в плезиохронных сетях не обеспечивается. Для выравнивания скоростей передачи цифровых потоков в PDH-технологии при формировании потоков уровня DS2 и выше используется бит-интерливинг с побитовой синхронизацией. При этом мультиплексор  $MUX_2$  сам выравнивает скорости входных потоков от мультиплексов  $MUX_1$  путем добавления нужного количества выравнивающих битов в каналах с относительно низкими скоростями передачи или удаления битов в каналах с высокими скоростями. Информация об изъятых или вставленных битах передается по служебным каналам, формируемым отдельными битами в структуре фрейма. Эта же схема повторяется на следующих уровнях мультиплексирования.

На приемном конце при демультимплексировании указанные биты соответственно удаляются или добавляются на основе поступившей служебной информации.

Возникает вопрос: “Для чего следует выравнивать скорости выходных потоков?” Выравнивание скоростей важно для точного определения границ фрейма на приемном конце и положения битов служебной информации в его структуре.

PDH-технология получила распространение при организации большого количества речевых цифровых каналов в волоконно-оптических линиях связи.

Так, один канал уровня DS4 со скоростью  $E4$  (140 Мбит/с) эквивалентен 1920 каналам со скоростью 64 кбит/с. Это удобно при организации высокоскоростных цифровых потоков, проходящих транзитом через УК, при организации в них кроссовой коммутации линий связи. Однако добавление (удаление) битов при выравнивании скоростей делает невозможным отвод канала со скоростью 64 кбит/с или 2 Мбит/с из общего потока в транзитном узле без полного демultipлексирования. Общая схема канала передачи с использованием технологии PDH на скорости 140 Мбит/с должна включать три уровня мultipлексирования на передающем конце и три уровня демultipлексирования на приемном конце. Это является существенным недостатком PDH-технологии, ограничивающим ее применение, например, в банковских сетях передачи данных, где часто возникает необходимость ввода/вывода каналов по 64 кбит/с и 2 Мбит/с. Применение большого количества мultipлексоров и демultipлексоров значительно удорожает телекоммуникационную сеть и делает ее эксплуатацию экономически невыгодной.

Из-за своей негибкости PDH сети уступают синхронным сетям.

### 1.5.2 Технология SDH

Желание преодолеть недостатки PDH-технологии привело к разработке в 1984-1986 годах в США иерархии синхронной оптической сети SONET (Synchronous Optical Network), а в Европе - **синхронной цифровой иерархии SDH** (Synchronous Digital Hierarchy). Обе иерархии ориентированы на использование ВОЛС.

Цифровые сети, использующие синхронные телекоммуникационные технологии, имеют общесетевую синхронизацию от центрального опорного источника (центрального таймера), точность которого не хуже  $10^{-9}$ .

Необходимость выравнивания скоростей выходных потоков здесь практически отпадает, и это обеспечивает возможность формирования фреймов фиксированного формата с использованием *байт-интерливинга* на всех уровнях мultipлексирования. Фиксированный формат позволяет четко позиционировать в структуре фрейма расположение полей, соответствующих каналам со скоростями 64 кбит/с, 2 Мбит/с и т. д.

В качестве основного формата выходного синхронного потока принят так называемый **синхронный транспортный модуль STM-1**, обеспечивающий скорость передачи 155,52 Мбит/с и позволяющий инкапсулировать (вставлять) в него все фреймы европейской PDH иерархии (E1, E2, E3 и E4).

В структуру STM введены специальные указатели начала любого инкапсулированного фрагмента. Эти указатели помещаются в поле заголовка фрейма STM. Использование указателей значительно упрощает процедуру выделения потоков, различных скоростей из общего цифрового потока и позволяет гибко компоновать внутренний формат STM.

Построение иерархии скоростей SDH основано также на использовании коэффициентов мultipлексирования. В SDH эти коэффициенты принимают

постоянное значение, которое равно 4, и фигурируют в названии транспортного модуля в виде множителя: STM-1 (155,52 Мбит/с); STM-4 (622 Мбит/с); STM-16 (2,5 Гбит/с); STM-64 и т. д.

Таким образом, разработчикам технологии SDH удалось не только обеспечить наращивание скоростей передачи, но и учесть наличие стандартов существующей технологии PDH, используя уже известную к тому времени технологию инкапсуляции данных (технология инкапсуляции использована в протоколе TCP/IP сети Internet для транспортировки IP-пакетов через сети с различными архитектурами). В SDH-технологии принцип инкапсуляции получил развитие в виде технологии **виртуальных контейнеров**.

**Контейнерами** называются фреймы стандартных размеров с присоединенными к ним заголовками. В полях заголовка помещается информация, необходимая для маршрутизации, и указатели начала размещения потоков различных скоростей, поступающих из каналов доступа. Эти потоки называются **трибами**.

Цифровые потоки каналов доступа со скоростями передачи, соответствующими стандартному ряду PDH, называются **трибами PDH**, а потоки каналов доступа со скоростями передачи, соответствующими стандартному ряду SDH, - **трибами SDH**.

Каждый триб инкапсулируется в соответствующий ему по размеру контейнер, снабженный своим заголовком. Так, например, формируемый при инкапсуляции триба 140 Мбит/с контейнер определил размер поля полезной нагрузки синхронного транспортного модуля STM-1 в 2349 байт, а добавление к нему полей заголовков – размер самого STM-1: 2430 байт или  $2430 \times 8 = 19440$  бит, что при частоте повторения 8000 Гц определяет скорость порождающего члена ряда для иерархии SDH:  $19440 \times 8000 = 155,52$  Мбит/с.

Контейнеры меньших размеров, в свою очередь, могут помещаться в контейнеры с большей емкостью полезной нагрузки, которые также снабжены своим заголовком, и т. д., по принципу матрешки. Это и есть технология виртуальных контейнеров, основанная на принципах инкапсуляции. Поскольку контейнеры являются не физическими объектами, а логическими, они называются **виртуальными контейнерами**.

Виртуальные контейнеры могут группироваться по несколько штук для размещения в полях полезной нагрузки контейнеров верхних уровней (большого размера). На каждый вложенный контейнер заводится свой указатель в поле заголовка внешнего контейнера. Согласно основной схеме мультиплексирования для иерархии SDH, модули STM-1 далее могут мультиплексироваться с коэффициентом  $n$ , кратным 4 (как уже указывалось выше), и затем передаваться по линии связи.

Для реализации технологии SDH разработаны специальные терминальные мультиплексоры ввода/вывода, через которые осуществляются доступ в сеть и выход из сети, т. е. реализуется функция ответвления трибных потоков.

Синхронные сети имеют ряд преимуществ перед плезиохронными, основные из них следующие:

- *упрощение сети* - в синхронной сети один мультиплексор ввода/вывода позволяет непосредственно ввести или вывести, например, поток E1 (2 Мбит/с) из фрейма STM-1 (155 Мбит/с), заменяя тем самым “гирлянду” мультиплексоров PDH;

- *прозрачность для передачи любого трафика* - это обусловлено использованием виртуальных контейнеров для передачи трафика, сформированного с использованием других технологий: Frame Relay, ISDN, ATM;

- *универсальность применения* - технология может быть использована для создания отдельных высокоскоростных магистралей, глобальных сетей WAN, а также для местных MAN и корпоративных сетей кольцевой структуры.

С появлением SDH-технологии в отношении телекоммуникационных сетей стали использоваться понятия “упаковка данных”, “транспортировка данных”, а за высокоскоростными цифровыми синхронными сетями закрепилось название “транспортные сети”.

## 2 ТЕХНОЛОГИИ АСИНХРОННЫХ РЕЖИМОВ ПЕРЕНОСА

Отличительной особенностью асинхронных режимов переноса по отношению к синхронным является тот факт, что в этих режимах не требуется осуществлять синхронизацию на протяжении всего тракта передачи, от его начального пункта до конечного.

При асинхронном режиме достаточно обеспечить синхронную передачу последовательности битов только между соседними объектами: смежными узлами коммутации или оконечной системой и узлом коммутации, т. е. пунктами сети, непосредственно соединенными линиями связи.

В узле коммутации (УК) принятые биты в виде блоков хранятся некоторое время в запоминающем устройстве (ЗУ) УК, а затем побитово передаются по исходящему каналу в следующий УК. При этом *скорости во входящем и исходящем каналах могут вовсе не совпадать*.

При реализации асинхронных режимов переноса в современных цифровых сетях используются метод передачи и коммутации пакетов и его модификации, включая технологию ATM.

### 2.1 Передача и коммутация пакетов. Технология X.25

Телекоммуникационные сети с коммутацией каналов разрабатывались и оптимизировались для достижения наивысшего качества передачи речевых сообщений. Даже то, что дуплексный канал при этом используется только на 50 %, считается вполне допустимым. Низкая эффективность использования каналов в сети с КК объясняется тем, что после установления соединения между оконечными устройствами емкость скоммутированного канала и его составных частей недоступна для других приложений во время сеанса связи, даже если данные не передаются. При использовании таких телекоммуникационных

сетей для передачи данных между компьютерами выявляются по крайней мере два недостатка.

1 При соединении типа *терминал-хост* (например, при взаимодействии ПК пользователя с сетевым компьютером) значительную часть времени канал может быть свободен, но телекоммуникационная сеть не может использовать его в это время для другого приложения.

2 Сеть с КК обеспечивает передачу данных на постоянной скорости. Это значит, что любой паре терминал-хост будет предоставлена одна и та же фиксированная скорость, что ограничивает возможности сети при подключении хостов и терминалов различной производительности.

Телекоммуникационная сеть с коммутацией пакетов способна устранить эти недостатки.

Суть метода передачи пакетов состоит в следующем.

Сообщение (данные) разбиваются на небольшие блоки (сегменты) (рис. 2.1) Каждому блоку присваивается заголовок  $Z_n$ , содержащий адреса источника и потребителя информации, а также номер блока в сообщении и указание на его принадлежность данному сообщению, проверяющий или исправляющий код и т. д.

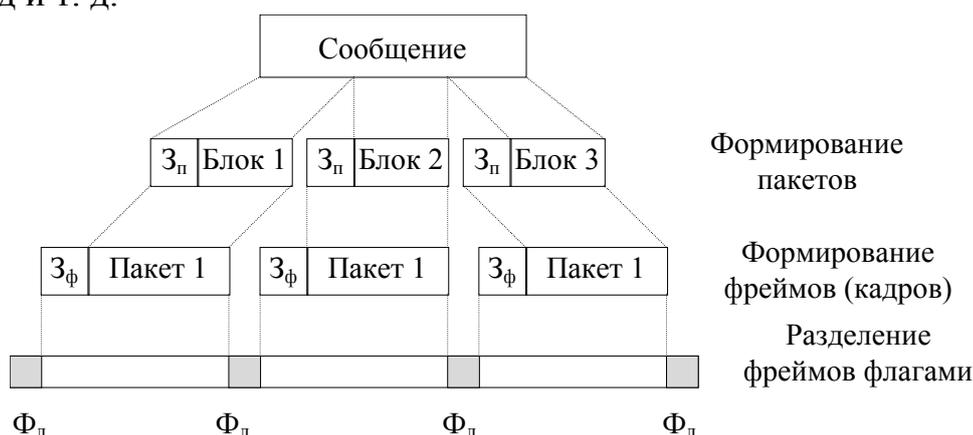


Рисунок 2.1 - передача сообщения пакетами

Блок сообщения вместе с заголовком называется **пакетом**.

Перед отправлением в линию пакеты оформляются в виде фрейма (кадра), имеющего свой заголовок  $Z_ф$ , содержащий информацию, используемую для маршрутизации пакетов.

Для того, чтобы на приемном конце линии связи отделить один фрейм от другого при побитовой передаче их по каналу, между фреймами вставляются разделительные флаги  $\Phi_l$ . Флаг - это поле, содержащее 8 бит, например, 01111110. На соседнем УК принятая последовательность битов группируется во фрейм, флаги удаляются и из фрейма извлекается пакет. Он помещается в ЗУ и подвергается обработке - проверке на отсутствие ошибок, искажений. В случае обнаружения ошибок и невозможности их исправления, УК запрашивает повтор передачи. Через некоторое время оформленный в виде фрейма пакет поступает в исходящий канал.

На входящем УК пакеты накапливаются и из них собирается сообщение. Таким образом, функция разбиения сообщения на пакеты осуществляется только на исходящем УК, а сборка - на входящем УК.

Разбиение сообщения на пакеты и сборку сообщения из пакетов принято называть функцией **разбиения/сборки** PAD (Packet Assembler and Disassembler). Функция PAD может выполняться в любом сетевом устройстве или узле, обеспечивающем доступ в сеть с коммутацией пакетов. Следует отметить, что если источником сообщения является ЭВМ (рабочая станция), функция PAD может выполняться непосредственно в ней.

## 2.2 Особенности формирования пакетов речевых сообщений

Речевое сообщение, представленное в цифровой форме (ИКМ сигнал), является последовательностью байтов (выборок дискретных отсчетов амплитуд), следующих во временном канале один за другим через 125 мкс. Особенность реализации функции PAD при этом состоит в том, что при формировании блока, длина которого больше одного байта, необходимо накопить нужное количество байтов. В этом случае происходит задержка всех байтов, входящих в пакет, кроме последнего (рис. 2.2), на время  $\tau = 125 (n-1)$  мкс, где  $n$  - число байтов в блоке. Переход к пакету и фрейму остается тем же.

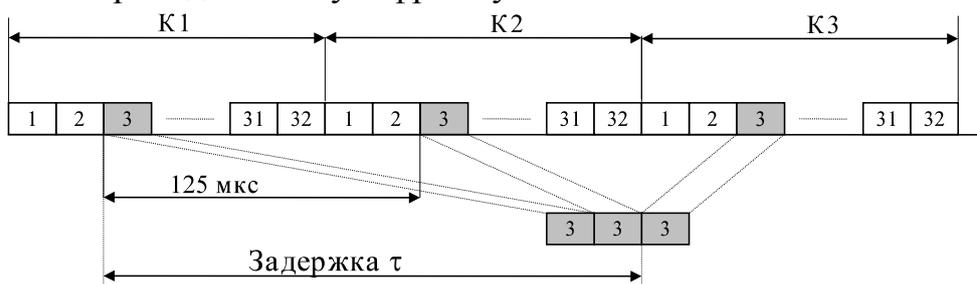


Рисунок 2.2 - Формирование пакета речевого сигнала:  
K1, K2, K3 - кадры

На приемном конце (входящего УК) для правильного восстановления сообщения вновь восстанавливается ИКМ сигнал с соответствующим разнесением во времени отдельных байтов. Кроме того, осуществляется согласование во времени байтов различных блоков.

Очевидно, что наличие задержек во времени при передаче и приеме пакетов может внести существенное искажение в речевое сообщение. В связи с этим, для передачи речи пакетами необходимо использовать высокоскоростные каналы, в которых речевые пакеты должны передаваться с приоритетом перед пакетами данных.

## 2.3 Коммутация пакетов PS (Packet Switching)

Коммутация пакетов (КП) может быть реализована в УК телекоммуникационной сети с использованием таких режимов как:

- датаграммный режим;
- режим виртуального вызова;
- режим виртуального канала;
- режим виртуального соединения.

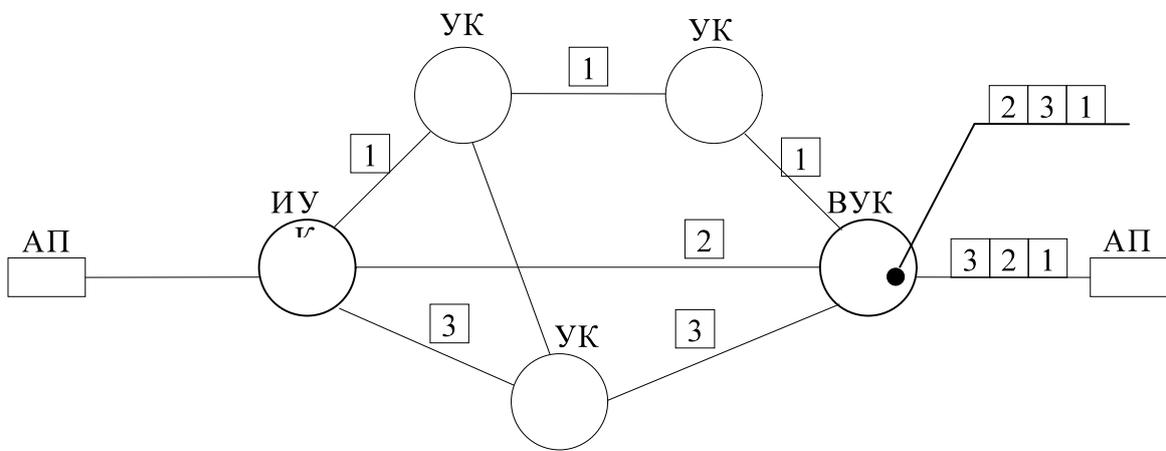
**Датаграммный режим.** При датаграммном режиме каждый пакет движется по сети самостоятельно, без учета того, как продвигаются пакеты, идущие до или после него. Каждый УК на основании адресной информации полей заголовка пакета и собственных сведений о наличии незанятых исходящих каналов к соседним УК выбирает следующий УК, на который перенаправляется пакет. В результате пакеты одного и того же сообщения с одним и тем же адресом могут следовать от места отправления к месту назначения разными маршрутами и прийти в перепутанном порядке (рис. 2.3, а). Входящий УК (конечный узел маршрута) восстанавливает правильную последовательность пакетов и уже в этой последовательности передает их в пункт назначения.

**Режим виртуального вызова.** Отличительной особенностью является тот факт, что датаграммный режим дополняется виртуальным вызовом. При этом фазе передачи пакетов сообщения предшествует фаза посылки служебного пакета в АП получателя с указанием полного объема сообщения с целью резервирования достаточного буфера памяти для его приема. После резервирования достаточной области памяти в АП в обратную сторону посылается служебный пакет с подтверждением готовности приема сообщения. Сеанс передачи пакетов начинается лишь после получения пакета подтверждения приема.

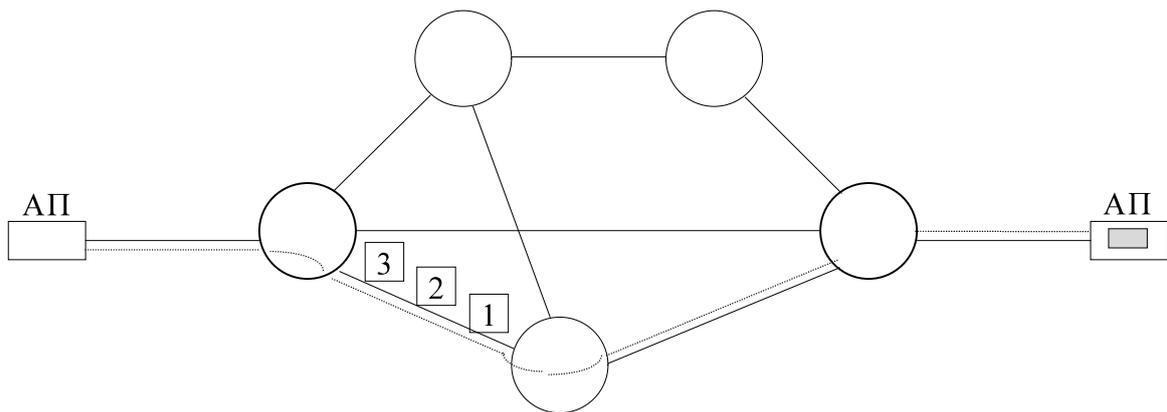
Обмен служебными пакетами перед сеансом передачи сообщения называется **посылкой виртуального вызова**. Режим виртуального вызова уменьшает вероятность блокировки работы отдельных УК и, следовательно, вероятность возникновения тупиковых ситуаций на сети, тормозящих прохождение датаграмм, но в то же время появляются дополнительные затраты времени на посылку виртуального вызова.

**Режим виртуального канала.** Этот режим характеризуется тем, что фазе передачи пакетов сообщения предшествует фаза установления логического соединения между корреспондирующими АП, которое называется **виртуальным каналом** (рис. 2.3, б). Фаза установления виртуального канала включает обмен служебными пакетами, при котором, как и в предыдущем режиме, осуществляется резервирование памяти для приема сообщения в АП получателя, а также определяется фиксированный маршрут следования в сети пакетов передаваемого сообщения. Каждый пакет снабжается идентификатором виртуального канала, помещаемым в поле заголовка. Все промежуточные УК, через которые проходит маршрут виртуального канала, теперь не принимают самостоятельных решений по маршрутизации пакетов, а направляют пакеты в соответствии с идентификаторами виртуального канала. Поскольку пакеты движутся по фиксированному маршруту, то, в случае занятости исходящего направления, они задерживаются в УК и накапливаются в выходных буферах. Если выходной буфер переполняется, возникает блокировка УК. Блокировки могут вызвать недопустимые задержки пакетов в сети, а также тупиковую ситуацию, блоки-

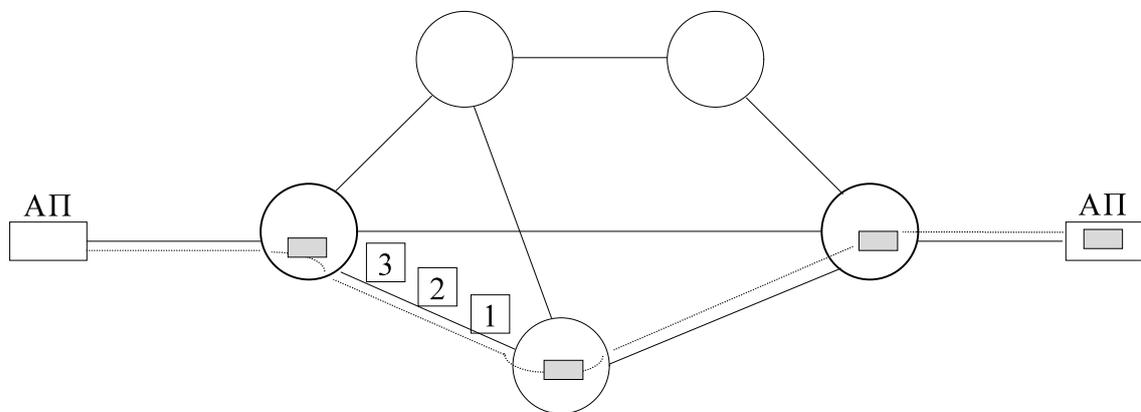
рующую работу всей сети. Этот недостаток устраняется в режиме виртуального соединения, в котором обеспечивается резервирование ресурсов памяти во всех промежуточных УК по маршруту следования пакетов передаваемого сообщения.



а )



б )



в )

Рисунок 2.3 - Режимы коммутации пакетов:  
а - датаграммный; б - виртуального канала; в - виртуального соединения

**Режим виртуального соединения.** Режим характеризуется тем, что в фазе установления виртуального канала осуществляется резервирование буферов в ЗУ УК, входящих в маршрут передачи пакетов, достаточных для прохождения пакетов без задержек (рис. 2.3, в). Этот режим близок по принципу установления связи к методу КК. Если при установлении связи будут зарезервированы и тайм-слоты в транзитных линиях, то отличие от КК будет лишь в размере пакета и способе коррекции ошибок (при КК это делается на входящем УК, а при КП - на всех УК, входящих в маршрут виртуального канала).

Коммутация пакетов имеет несколько преимуществ перед коммутацией временных каналов:

- эффективность использования линий при КП намного выше, поскольку ресурсы линий и узлов сети могут динамически распределяться между многими пакетами от различных приложений;
- в сети с коммутацией пакетов может осуществляться преобразование скорости передачи данных. Это обеспечивает возможность обмена сообщениями АП, подключенных к сети каналами разной пропускной способности (полосы пропускания);
- пользователям не может быть отказано в соединении даже, если сеть перегружена. При этом лишь могут возникнуть задержки с доставкой пакетов или уменьшена скорость передачи;
- в сетях с КП можно использовать систему приоритетов. Пакеты с высоким приоритетом будут доставляться с меньшими задержками.

Первая сеть передачи пакетов ARPA была введена в эксплуатацию в конце 60-х гг. в США. Финансирование проекта осуществлялось Управлением перспективных научных исследований (Advance Research Project Agency) США. Аббревиатура, составленная из первых букв названия этого управления, определила название сети. Максимальный размер пакета составлял в сети ARPA 1024 бит (128 байт). Сеть могла передавать и принимать сообщения длиной, не превышающей 8 пакетов.

Международная организация по стандартизации (ISO) и МСЭ (ITU-T) утвердили метод передачи и коммутации пакетов в виде Рекомендаций X.25. Кроме пакета размером 128 байт, который принимается по умолчанию, допускаются также и другие размеры пакета: 16, 32, 256, 512, 1024, 2048, 4096 байт. Кроме длин пакетов, рекомендованы также форматы пакетов и кадров (фреймов), а также протокол их передачи и приема.

Протокол передачи данных с коммутацией пакетов (технология X.25) становится одним из наиболее широко распространенных и популярных протоколов, позволяющих решать проблемы “плохих” каналов связи с большим уровнем помех, каковыми, например, являются аналоговые телефонные линии.

Для обеспечения требуемой достоверности передачи информации в технологии X.25 используется многоуровневая система обнаружения и коррекции ошибок. Каждый УК сети X.25 на пути движения пакета проверяет целостность пакета, читает контрольную сумму, содержащуюся в заголовке пакета, вычисляет ее новое значение и сравнивает их. При небольшом количестве ошибок УК

способен восстановить пакет и передать его дальше. При этом узел посылает подтверждение предыдущему узлу о корректном приеме пакета. Если же восстановить пакет невозможно, делается запрос на его повторную передачу.

Высокий уровень помех на линиях приводит к падению скорости передачи, и по этой причине предельная скорость передачи в сетях X.25 составляет 64 кбит/с. Кроме того, эта скорость не остается постоянной величиной и зависит от уровня помех и вызванных ими ошибок.

Метод передачи и коммутации пакетов реализован не только в протоколе X.25, но и, например, в протоколе TCP/IP, который также впервые был введен на сети ARPANET, после чего она стала именоваться Internet. Широкое распространение этого протокола обеспечено большой популярностью сети Internet, охватывающей многие страны мира.

## 2.4 Передача и коммутация кадров. Технология Frame Relay

В современных скоростных телекоммуникационных сетях, использующих волоконно-оптическую среду для передачи данных, уровень ошибок резко снизился по сравнению с каналами аналоговой телефонии. В результате большая избыточность кодировки (применение сложных кодов, обнаруживающих и исправляющих ошибки) пакетов становится ненужной, упрощается система заголовков, которая была перенасыщена содержанием информации для восстановления пакетов.

В 90-х гг. Международный Союз Электросвязи (ITU-T) утверждает новый протокол из семейства протоколов X.25, получивший название протокола **передачи и коммутации кадров (фреймов) - Frame Relay**. В этом протоколе нет той избыточности, которая характерна для X.25, во-первых, потому, что он специально разрабатывался для использования на линиях связи с низким уровнем помех, во-вторых, в нем устранена система контроля ошибок всего фрейма. Вместо этого лишь проверяется целостность полученного фрейма и только для адресного поля осуществляется контроль ошибок. Благодаря всему этому Frame Relay обеспечивает подключение пользователей телекоммуникационной сети на скорости 2 Мбит/с. Главным достоинством технологии Frame Relay стала низкая избыточность служебной информации в пакете, что заметно увеличило производительность передачи данных в сети (в четыре раза по отношению к сети X.25). В остальном протокол Frame Relay во многом совпадает с протоколом X.25. Размеры фреймов могут иметь переменную длину, так как сами пакеты допускают использование различных длин и, как следствие, вариации задержек при передаче фреймов. Это не совсем приемлемо для передачи речевых и видеосообщений, которые требуют регулярных скоростей передачи.

Областью более эффективного применения технологии Frame Relay является взаимодействие локальных сетей LAN через глобальные телекоммуникационные сети, а также обеспечение высокоскоростных пользовательских интерфейсов, что гораздо выгоднее арендованных каналов.

Являясь разновидностью протоколов семейства X.25, Frame Relay хорошо сочетается с сетями X.25. Возможно создание гибридных сетей, включающих УК с FR и УК с КП, а также УК-шлюзы, обеспечивающие преобразование протоколов (рис. 2.4). Передача фреймов по сети осуществляется с использованием режимов виртуального канала и виртуального соединения, а также датаграммного режима.

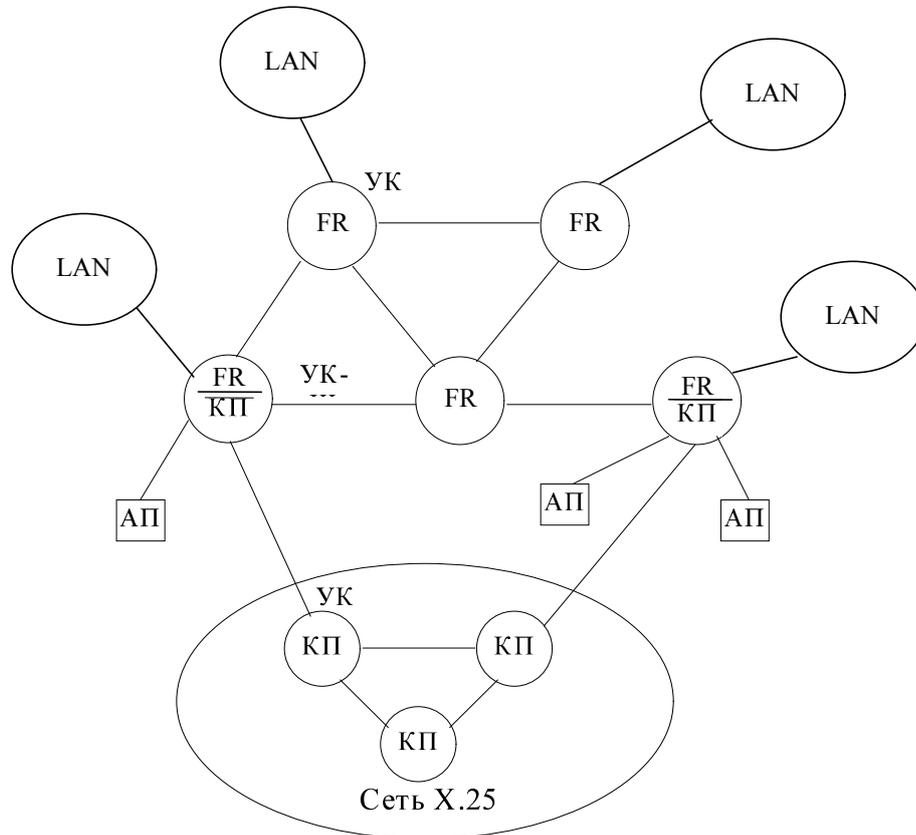


Рисунок 2.4 - Гибридная сеть, использующая технологию X.25 и технологию FR

К недостаткам технологии Frame Relay относится невозможность управления потоками фреймов при перегрузках сети. В связи с этим на сетях FR применяется система "кредитов". Кредит CIR (Committed Information Rate) выдается пользователю в виде разрешения на передачу данных со скоростью, не превышающей заданную таким кредитом. При этом CIR, измеряемый килобитами в секунду, определяется в терминах разрешенного объема данных  $B$ , который может быть послан пользователем в сеть за время  $T$ :  $CIR = B/T$ .

Значение CIR является средним гарантированным сетью значением скорости передачи данных при отсутствии перегрузок на сети. Кредит CIR, выдаваемый администрацией сети, может быть одинаковым для всех пользователей либо учитывающим запрос пользователя.

В настоящее время рынок сетей FR в Европе соизмерим с рынком сетей X.25.

## 2.5 Технология ISDN

Технология ISDN известна еще как *коммутация каналов на разных скоростях*, или *совместная коммутация каналов и пакетов*.

Традиционная коммутация при временном разделении представляет собой очень негибкую процедуру, так как продолжительность тайм-слота однозначно определяет скорость передачи в канале связи.

Цифровая сеть интегрального обслуживания ISDN (Integrated Services Digital Network) представляет собой систему связи с комплексом услуг по передаче как данных, так речи и видео. Требования различных служб к скорости передачи здесь могут быть очень различными - от очень низких (1 кбит/с для телеметрии) до очень высоких (140 Мбит/с - TV высокой четкости). Для удовлетворения этих требований был разработан вариант объединения коммутации каналов с мультиплексированием, обеспечивающий широкий диапазон скоростей передачи данных.

Система передачи с многоскоростной коммутацией каналов использует тот же метод временного мультиплексирования, что и системы с обычной коммутацией каналов. Однако в одном соединении (широкополосном канале) может использоваться  $n$  ( $n > 1$ ) цифровых каналов DS0 (64 кбит/с). Таким образом, каждое соединение может быть кратным скорости 64 кбит/с.

Системы коммутации, обеспечивающие многоскоростную коммутацию каналов, являются более сложными по сравнению с системами с обычной коммутацией каналов CS, так как все каналы отдельных звеньев, образующих соединение, является синхронными.

Важной проблемой для систем с многоскоростной коммутацией каналов является выбор базовой скорости передачи. Международный Союз Электросвязи (ITU-T) определил в качестве основных два интерфейса доступа к ISDN:

- базовый доступ (Basic Rate Access) 144 кбит/с, обеспечивающий два речевых канала типа В со скоростью 64 кбит/с и один сигнальный канал типа D со скоростью передачи 16 кбит/с ( $2B + D$ );
- первичный доступ PRA (Primary Rate Access), позволяющий работать с каналами T1 (1,5 Мбит/с) и E1 (2 Мбит/с), которые разделены на 23 и 30 каналов типа В соответственно, и, кроме этого, имеют один сигнальный D канал со скоростью 64 кбит/с ( $23B + D$  или  $30B + D$ ). Выделенная линия может использовать как отдельный канал В, так и их комбинацию для достижения большей скорости. Как установление, так и разъединение связи между абонентами осуществляются через сигнальный канал и происходят почти мгновенно.

Выбранная скорость канала должна быть равной или превышать пиковую скорость передачи источника во время всего сеанса связи, хотя средняя скорость передачи может быть очень низкой. Это характерно для передачи речи и видео, так называемого **изохронного потока**, характеризующегося изменением скорости передачи - “взрывным” (пачечным) режимом работы источника, на-

пример, когда медленно меняющаяся видекартинка вдруг сменяется новым кадром. Аналогичная картина наблюдается при передаче речи.

Таким образом, при “взрывном” трафике не обеспечивается эффективное использование пропускной способности канала даже при многоскоростной коммутации каналов.

Данная техническая проблема решается использованием *совместной коммутации* каналов и пакетов. Передача потоков разнородной информации (данные, речь) является отличительной особенностью сетей ISDN. В зависимости от требований, предъявляемых к качеству обслуживания различных потоков, для их передачи можно выбирать тот или иной способ коммутации.

В настоящее время известны три варианта совмещения КК с КП: гибридная, адаптивная и смешанная коммутация.

**Гибридная коммутация.** Основная идея состоит в том, что пропускная способность линии связи, т. е. кадр (фрейм) делится на две области (рис. 2.5). При этом  $m$  тайм-слотов в каждом кадре отводится для временных каналов, а оставшаяся часть - для передачи пакетов (в данном примере трех сообщений:  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$ ). В свободной от временных каналов части кадра 1 передаются пакеты  $\Pi_1(C_1)$ ,  $\Pi_1(C_2)$  и часть пакета  $\Pi_1(C_3)$ . В следующем, кадре 2, аналогично после  $m$  временных каналов заканчивается передача первого пакета  $\Pi_1(C_3)$  сообщения  $C_3$ , затем следует второй пакет  $\Pi_2(C_1)$  сообщения  $C_1$  и часть второго пакета  $\Pi_2(C_2)$  сообщения  $C_2$  и т. д.

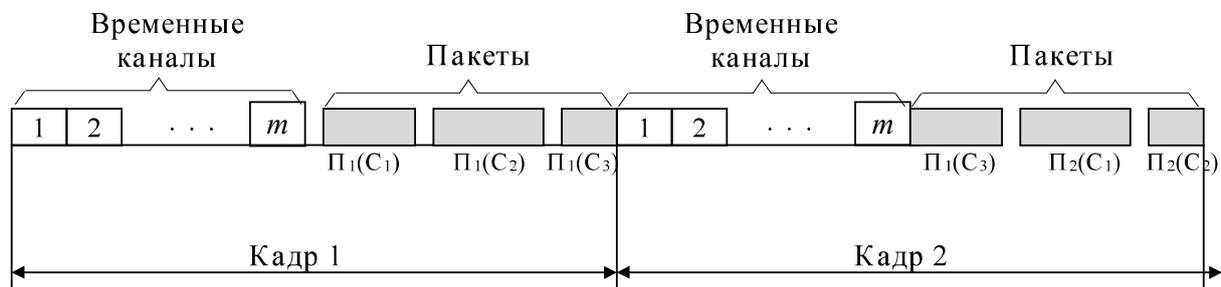


Рисунок 2.5 - Структура кадра при гибридной коммутации

**Адаптивная коммутация.** Основана на принципе статистического уплотнения занятого соединения в режиме КК пакетами в паузах при передаче речи или между передачей данных. При этом может быть значительно повышена пропускная способность линии связи. Известно, что доля пауз при передаче речи составляет около 60 %, а при диалоговой связи человека с ЭВМ она может превышать 90 %. Кроме того, пакеты могут передаваться и по незанятым каналам.

**Смешанная коммутация каналов и пакетов.** На УК происходит установление канала при передаче информации как методом КК, так и методом КП. Поэтому этот метод можно было бы рассматривать как метод КК. Однако, в отличие от метода КК, здесь установление канала в УК от входа к выходу происходит не на все время сеанса связи, а лишь на время передачи пакета. На время же всего сеанса для передачи пакетов устанавливается виртуальный канал, как

и на сети коммутации пакетов, т. е. фактически фиксируется лишь путь передачи пакетов.

После установления виртуального канала для каждого поступившего пакета в УК устанавливается временный канал, как при установлении соединения при коммутации каналов, т. е. временный канал существует только в течение времени прохождения пакета через УК. Как только пакет поступает в выходное буферное запоминающее устройство, временный канал может быть использован для передачи другого пакета или установления временного канала для сеанса связи других абонентов.

Цифровые сети ISDN в настоящее время широко распространены как альтернатива традиционным аналоговым сетям с применением модемов, выделенным линиям, отдельным службам глобальных сетей. При значительно большей гибкости по сравнению с простой коммутацией каналов, в технологии ISDN все же сохраняется фундаментальное ограничение: хотя пользователь имеет возможность выбора скорости передачи, сам набор скоростей остается вполне определенным (фиксированным).

Системы коммутации, разработанные для многоскоростной коммутации каналов, содержат набор отдельных коммутаторов, каждый из которых производит коммутацию каналов с определенной скоростью. Информация, поступающая из абонентской линии (АЛ), перед поступлением на различные коммутаторы демультиплексируется, а информация, поступающая от коммутатора в АЛ, наоборот, мультиплексируется.

Несмотря на все достоинства технологии ISDN, сетевые ресурсы продолжают использоваться неэффективно. Так, например, если низкоскоростные коммутаторы все заняты, то дополнительное низкоскоростное соединение образовано быть не может, несмотря на то, что могут быть не задействованы высокоскоростные коммутаторы.

## 2.6 Технология АТМ

**Технология АТМ** (Asynchronous Transfer Mode) является настоящей альтернативой всем существующим сетевым технологиям. В отношении ее укоренилось также наименование **асинхронный режим переноса**, рекомендованное МСЭ (ITU-T). На сегодняшний день АТМ является единственной продвинутой технологией, позволяющей полноценно передавать интегральный трафик (голос, видео, данные) при одновременном удовлетворении совершенно несовместимых требований к условиям передачи.

Сущность технологии АТМ состоит в транспортировании всех видов информации пакетами фиксированной длины в 53 байта, из которых 48 байт определяют размер информационного поля и 5 байт отводится для заголовка. Такой пакет получил название *ячейка* (cell). Ячейки передаются без дополнительного оформления в кадр (фрейм), и для их обработки используются более простые протоколы по сравнению с передачей пакетами по протоколу X.25. Кроме того, фиксированная длина и регулярность создаваемого ими потока не требу-

ют включения флага между ними для отделения одной ячейки от другой. Ячейки фиксированной длины передаются по каналу непрерывно. В том случае, когда информационные ячейки отсутствуют, по каналу передаются "пустые" ячейки стандартной величины, т. е. ячейки, не содержащие данных в поле информации, на что указывается в заголовке. Пустые ячейки необходимо передавать для того, чтобы не нарушить *поячеистую дискретизацию* в канале. Поячеистая дискретизация напоминает временную дискретизацию в синхронном режиме передачи. Однако, если при синхронном режиме длительность тайм-слота (временного канала) зависела от скорости передачи импульсов (битов) по каналу, то при асинхронном режиме длительность интервала времени, затрачиваемого на передачу ячейки, зависит только от числа импульсов (битов), необходимых для передачи ячейки, но не от скорости их передачи. Таким образом, с помощью ячеек осуществляется как бы временная дискретизация в канале, в связи с чем асинхронный режим передачи еще называют **асинхронным временным мультиплексированием**.

Отличие асинхронного временного мультиплексирования (АВМ) от синхронного временного мультиплексирования (СВМ) состоит в том, что ячейки, принадлежащие различным информационным сообщениям, могут следовать в произвольном порядке, тогда как тайм-слоты при СВМ, отведенные для передачи различных сообщений, располагаются на оси времени (в структуре кадра) в строго фиксированном порядке по отношению к началу цикла дискретизации (началу кадра) (рис. 2.6).

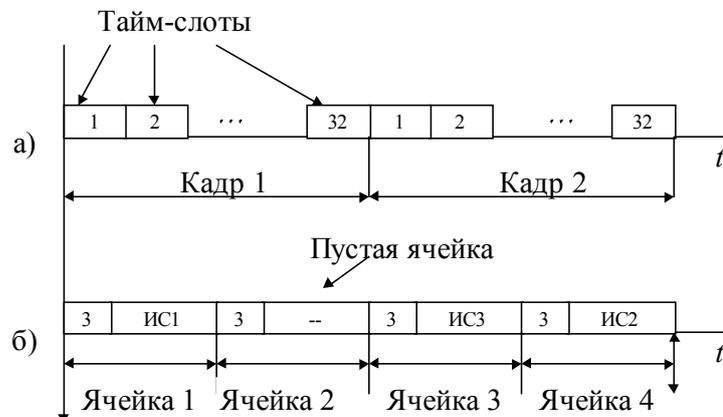


Рисунок 2.6 - Принцип асинхронного мультиплексирования:

а - синхронное мультиплексирование; б - асинхронное мультиплексирование  
ИС1, ИС2, ИС3 - информационные сообщения.

Передача ячеек по сети осуществляется в режиме виртуального соединения, в связи с чем фазе передачи предшествует фаза установления виртуального соединения, во время которой осуществляется проверка достаточности объема сетевых ресурсов как для качественного обслуживания уже установленных виртуальных соединений, так и для вновь создаваемого. Если сетевых ресурсов недостаточно, то окончательному устройству выдается отказ в установлении соединения. Таким образом, в сети АТМ реализуется функция контроля и защиты от перегрузок.

В целях уменьшения временных задержек ячеек в узлах коммутации функции заголовка пакета АТМ ограничиваются. Основной функцией заголовка является идентификация виртуального соединения и обеспечение гарантии правильной маршрутизации. Заголовок также дает возможность мультиплексирования различных виртуальных соединений в одном цифровом тракте. Поскольку ошибка в заголовке может привести к неправильной маршрутизации, предусмотрено обнаружение и исправление ошибок в заголовке пакета АТМ.

Из-за ограничения функций, выполняемых заголовком пакета АТМ, его обработка считается относительно простой процедурой и может осуществляться на очень высоких скоростях, что обеспечивает малую задержку ячеек в очередях буферных устройств коммутаторов АТМ. Производительность коммутаторов АТМ уже сегодня достигает 10 Гбит/с.

Коммутаторы АТМ являются основными устройствами сети АТМ. В их функции входит не только установление виртуального соединения между оконечными устройствами пользователей, но и обеспечение так называемого **режима качественного обслуживания** QoS (Quality of Service) для этого соединения. Параметры режима QoS задаются пользователем при заявке на установление связи в фазе формирования виртуального соединения.

В рекомендациях ITU-T предусмотрены следующие типы QoS:

- CBR (Constant Bit Rate) - выделение канала с фиксированной пропускной способностью, предельно допустимой задержкой и другими характеристиками, заказанными пользователем. Такой вид QoS в основном используется при передаче речи.
- RT-VBR (Real Time Variable Bit Rate) - выделение канала с пропускной способностью в заданных пределах (min-max) с жесткими требованиями к задержке и другими параметрами, запрошенными пользователем. RT-VBR идеально подходит для передачи видео и речи.
- NRT-VBR (Not Real Time Variable Bit Rate) - VBR с ослабленными требованиями к задержке передачи. Может применяться для передачи видео и речи, не требующих режима реального времени.
- ABR (Available Bit Rate) - предоставление пользователю оставшейся невостребованной части физического канала. При установлении соединения пользователь задает лишь пределы допустимых изменений скорости передачи. Величина задержек передачи не контролируется. Режим применяется при передаче данных.
- UBR (Unspecified Bit Rate) - самый низкоприоритетный режим передачи. Заключается в предоставлении пользователю занятия какого-нибудь канала без каких-либо гарантий качества передачи.
- UBR+ - модифицированный UBR, предусматривающий приостановку передачи ячеек передаваемого сообщения при возникновении перегрузки в сети. Применение UBR+ позволяет разгрузить физические каналы.

Обеспечение режима QoS является коренным отличием технологии АТМ от всех существующих сетевых технологий. Это имеет принципиальное значе-

ние при интеграции передачи данных с передачей видео и речи, чрезвычайно чувствительных к задержке.

Единственным протоколом, обеспечивающим QoS, является протокол PNNI Phase 1.0 (Private Network - to - Network Interface). Протокол достаточно сложный, для его работы требуется в десять раз больше процессорного времени, чем для известного протокола OSPF, используемого в маршрутизаторах.

## 2.7 Быстрая коммутация пакетов

В сетях с коммутацией пакетов функции коммутации выполняются специальными коммутационными ЭВМ, образующими в сети узлы (центры) коммутации пакетов. В УК традиционных сетей пакетной коммутации (сетей X.25) пакеты обрабатываются в многопрограммном режиме в основном одним процессором.

**Быстрая коммутация пакетов (БКП)** характеризует следующее поколение сетей с коммутацией пакетов - сетей АТМ и отличается тем, что за счет использования в УК многопроцессорных коммутационных систем (коммутаторов АТМ) с многочисленными входами и выходами в них обеспечивается параллельная обработка большого количества одновременно коммутируемых пакетов (ячеек АТМ).

Метод БКП является наиболее совершенным методом коммутации пакетов, обеспечивающим за счет параллельной обработки ячеек высокую производительность УК.

Метод БКП может использоваться в коммутационных системах УК как с электронными, так и с оптическими коммутаторами.

Коммутационные системы БКП делятся на три типа:

- коммутаторы с коллективной памятью;
- коммутаторы с общей средой;
- коммутаторы с пространственным разделением.

Независимо от типа коммутатора на его входах и выходах устанавливаются контроллеры. В функции входных контроллеров (ВхК) входят демультимплексирование входных потоков ячеек, поступающих по входящим линиям связи, и введение в каждую ячейку некоторого заголовка, определяющего маршрут ее движения внутри коммутатора. Ячейка, дополненная таким заголовком, называется **быстрым пакетом (БП)**. Выходной контроллер (ВыхК) пересылает БП с выхода коммутационной системы в исходящую линию связи, осуществляя мультиплексирование. При этом в БП удаляется дополнительный заголовок - и БП превращается опять в ячейку. Для избежания потери БП в случае возникновения конфликта (две и более ячеек направляются к одному и тому же выходу) контроллеры могут содержать входные и выходные буферные запоминающие устройства (БЗУ).

**Коммутаторы с коллективной памятью.** Высокоскоростные коммутаторы с коллективной памятью являются наиболее простым типом коммутаторов

АТМ. Принципы их построения во многом сходны с построением традиционных коммутаторов пакетов сетей X.25.

Структура коммутатора с коллективной памятью приведена на рис. 2.7.

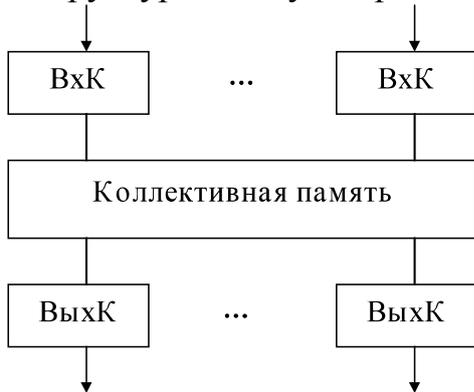


Рисунок 2.7 - Коммутатор с коллективной памятью

Все входные и выходные контроллеры непосредственно соединены с общим запоминающим устройством, доступным для записи со всех входных контроллеров и чтения для всех выходных контроллеров. В памяти можно реализовать как входные, так и выходные БЗУ. Скорость записи/чтения для коллективной памяти должна быть достаточно велика, чтобы можно было обслужить одновременно входной и выходной трафики. Скорость записи/чтения определяется

как  $2NV$ , где  $2N$  - количество портов (входов и выходов),  $V$  - скорость обмена через один порт. Так, для 32-канального коммутатора с канальной скоростью 150 Мбит/с скорость записи/чтения должна составлять не менее 9,6 Гбит/с.

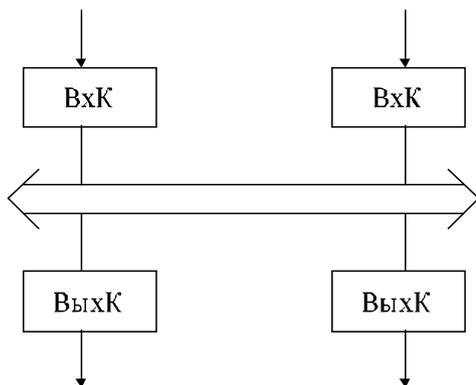


Рисунок 2.8 - Шинная структура коммутатора

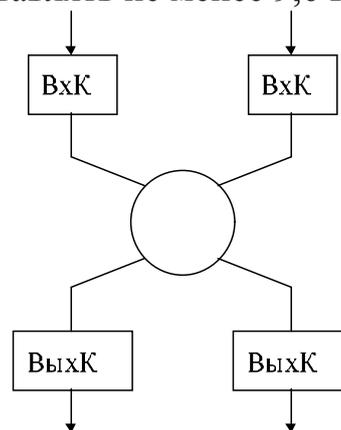


Рисунок 2.9 Кольцевая структура коммутатора

**Коммутаторы с общей средой.** В коммутаторе с общей средой все БП, поступающие по входным каналам, синхронно мультиплексируются в общую среду с высокой скоростью передачи, в качестве которой может выступать общая шина (рис. 2.8) с разделением по времени или кольцо (рис. 2.9).

Отличие коммутаторов с общей средой от коммутаторов с коллективной памятью состоит в том, что в них осуществляется полностью раздельное использование памяти выходными очередями, реализуемое в виде БЗУ выходных контроллеров. Это приводит к независимому формированию выходных очередей БП с дисциплиной обслуживания "первым пришел - первым обслужен" (FIFO).

**Коммутаторы с пространственным разделением.** В противоположность вариантам архитектуры с общей памятью и общей средой, для которых характерно мультиплексирование входного трафика всех входных каналов в единый скоростной поток с последующим распределением его по выходам, в коммута-

торе с пространственным разделением от входов к выходам устанавливается несколько соединений внутри коммутационной системы, скорость передачи по каждому из которых может быть равна скорости передачи по одному входному каналу.

Передача быстрых пакетов внутри коммутационной системы происходит по виртуальным каналам, аналогично тому, как ячейки движутся в сети АТМ. Коммутация быстрых пакетов осуществляется в коммутаторе на основе анализа управляющей информации, содержащейся в заголовке БП.

Управление коммутатора может быть как централизованным, так и распределенным.

Коммутаторам с данным типом архитектуры присущи недостатки. В зависимости от конкретного вида внутренней структуры может оказаться невозможным установление всех требуемых соединений. Эта особенность получила название *внутренней блокировки*. Она ограничивает пропускную способность коммутатора и представляет серьезную проблему при создании коммутаторов АТМ с пространственным разделением.

Коммутаторы с пространственным разделением могут быть разбиты на две группы: *матричные* и *типа баньян*. Рассмотрим принципы реализации каждой из них.

**Матричные коммутаторы.** В основе коммутационной структуры матричного типа лежит квадратный массив из  $N^2$  элементов коммутации (ЭК), по одному на каждую пару "вход-выход" (рис. 2.10). Замыкание ЭК, находящегося в точке переключения, образует физическое соединение  $i$ -го входа с  $j$ -м выходом. ЭК может находиться в двух состояниях: *сквозном* или *перекрестном*. Допустим, что вначале все ЭК находятся в сквозном состоянии. Для соединения  $i$ -го входа с  $j$ -м выходом достаточно привести  $(i, j)$ -й ЭК в перекрестное состояние, а остальные ключи оставить в сквозном состоянии. Требуемое переключение ЭК в перекрестное состояние может быть осуществлено самым быстрым пакетом индивидуально, если в нем содержится номер требуемого выхода. Глобальной информации относительно всех БП и требуемых для них выходов при этом не требуется. Это свойство именуется *самомаршрутизацией*. Оно позволяет существенно упростить управление коммутационной структурой за счет распределения управляющих функций по всем ЭК.

Увеличение  $N$  (свыше двух десятков) значительно усложняет работу коммутатора матричного типа.

**Коммутаторы типа баньян.** Коммутаторы этого типа являются альтернативой матричным коммутаторам и основываются на многокаскадных сетях. Основными структурными компонентами многокаскадных сетей являются *разветвители* и *концентраторы*, реализуемые с помощью элементарных  $(2 \times 2)$  переключателей, которые могут находиться в двух состояниях - сквозном и перекрестном.

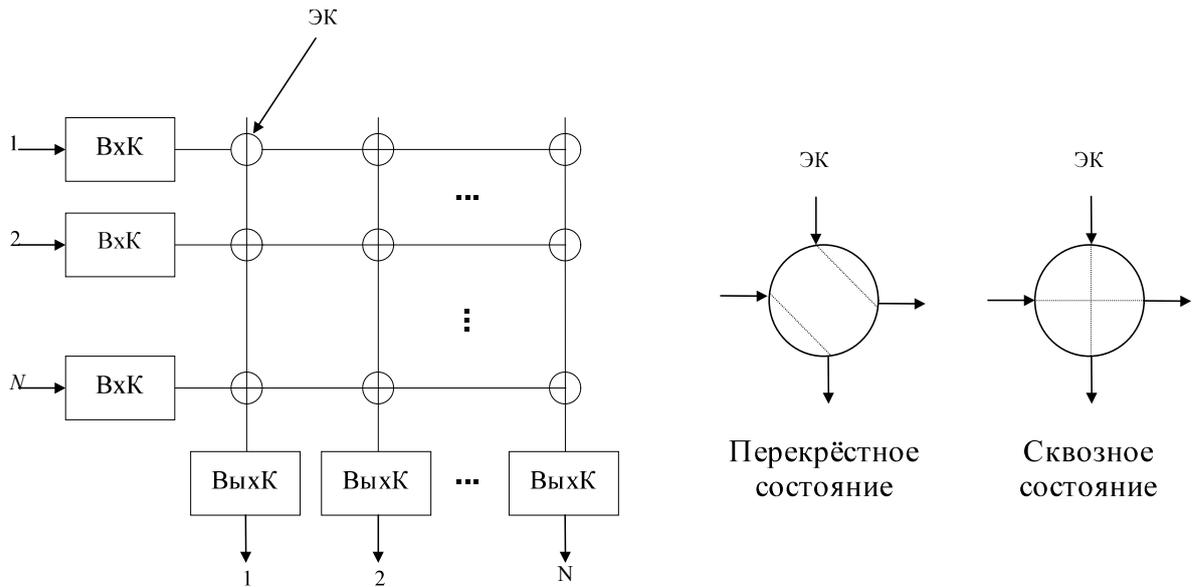


Рисунок 2.10 - Коммутаторы матричной структуры

Разветвитель (рис. 2.11 на  $N = 2^k$  выходов может быть построен в виде двоичного дерева с  $k$  разветвлениями на  $N-1$  переключателе. В этом дереве существует единственный путь от корня (входа) до каждого из листьев (выходов). Очевидно, что такой разветвитель обладает свойством самомаршрутизации.

Конструкция концентратора точно такая же, как и разветвителя, только в качестве корня выступает выходной канал и установка переключателей осуществляется начиная с корня (выходного канала).

Возможно совместное использование переключателей несколькими разветвителями и концентраторами. Путем добавления пар входных каналов к уже имеющейся структуре можно соединить между собой  $N$  входов и  $N$  выходов, используя всего лишь  $(N/2)\log_2 N$  переключателей (рис. 2.12).

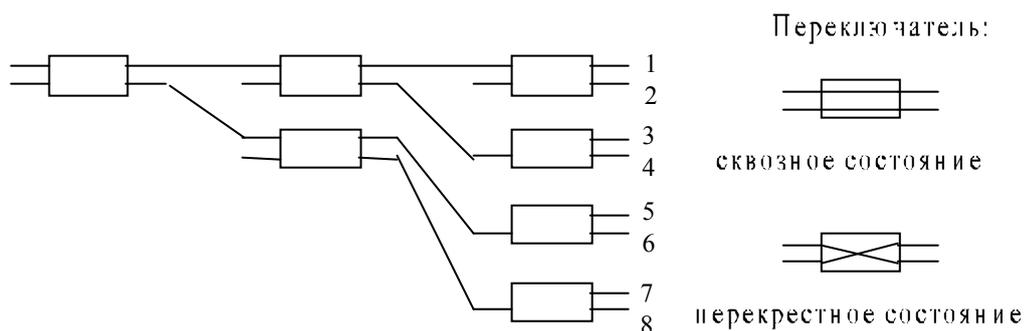


Рисунок 2.11 - Двоичное дерево, соединяющее входной канал с выходными с помощью переключателей

Существует очень большое количество разнообразных многокаскадных структур. За последние два десятка лет специалисты разных стран проводили исследования многокаскадных КС и наработали комплекс типовых решений, реализуемых ведущими фирмами-изготовителями оборудования АТМ сетей.

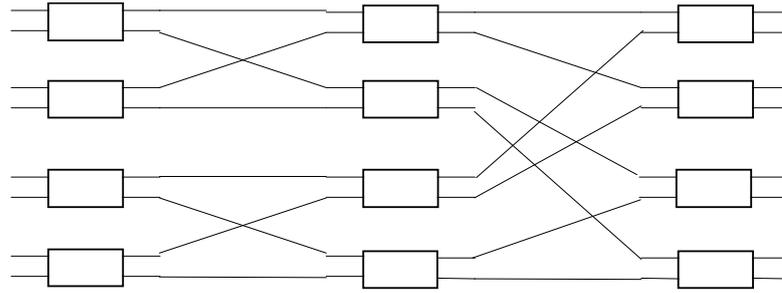


Рис. 2.12 - Коммутатор типа баньян на 8 входов и 8 выходов

Однако независимо от конкретной разновидности, все  $N \times N$  многокаскадные КС обладают следующими основными свойствами:

- существует единственный путь в КС, соединяющий входной канал с выходным;
- установление соединения может осуществляться децентрализованно с использованием процедуры самомаршрутизации;
- во всех структурах возможно одновременное установление не более  $N$  соединений;
- структура КС является регулярной, что обеспечивает удобство ее реализации на СБИС;
- структура КС является модульной, что позволяет наращивать ее без необходимости модификации физической компоновки или алгоритмов.

Основными способами преодоления внутренних блокировок и повышения пропускной способности коммутаторов типа баньян являются:

- размещение в местах возникновения конфликтов буферов (использование буферизованной баньяновидной структуры КС);
- использование входной буферизации ячеек на входе с помощью управляющих сигналов, формируемых при обнаружении конфликта;
- параллельное или тандемное использование группы баньяновидных соединительных сетей, что увеличивает число возможных путей между входами и выходами.

Использование баньяновидных КС позволило свести к минимуму количество точек коммутации в коммутаторных АТМ.

В заключение следует отметить, что использование технологии АТМ дает возможность создавать мультисервисные сети, работающие в асинхронном режиме, что позволяет решать многие телекоммуникационные проблемы практически сразу, не дожидаясь реализации до конца целого ряда таких важных аспектов, как сигнализация, маршрутизация, адресация и т. п.

Технологию АТМ по праву называют технологией сетей XXI века.

### 3 ТЕХНОЛОГИИ ПОЛНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Передача информации по волоконно-оптическим линиям связи имеет целый ряд достоинств по сравнению с передачей по медному кабелю. Стремительное внедрение в информационные сети оптических линий является следствием следующих преимуществ, вытекающих из особенностей распространения сигнала в оптическом волокне:

- *широкая полоса пропускания*, обусловленная чрезвычайно высокой частотой несущей ( $10^{14}$  Гц), что обеспечивает возможность передачи по одному оптическому волокну информации в несколько терабитов в секунду. Большая полоса пропускания - одно из важнейших преимуществ оптического волокна над медной и любой другой средой передачи информации;
- *высокая помехозащищенность* - невосприимчивость к электромагнитным помехам со стороны окружающих медных кабельных систем и электрического оборудования, индуцирующего электромагнитное излучение, поскольку волокно изготавливается из диэлектрического материала. В многоволоконном кабеле также не возникает проблемы перекрестного влияния электромагнитного излучения, присущей многопарным медным кабелям;
- *малое затухание светового сигнала* в волокне порядка 0,2...0,3 дБ на длине волны 1,55 мкм в расчете на 1 км, а также небольшая дисперсия, что позволяет строить участки линий без ретрансляции протяженностью до 100 км и более;
- *высокая защищенность от несанкционированного доступа* благодаря тому, что ВОК практически не излучает в радиодиапазоне, вследствие чего трудно “подслушать” передаваемую по нему информацию, не нарушая приема/передачи;
- *гальваническая развязка элементов сети*, обусловленная изолирующим свойством волокна. Это исключает возникновение электрических “земельных” петель (например, когда два сетевых устройства неизолированной сети, связанные медным кабелем, имеют заземление в разных точках здания. Возникающая при этом разность потенциалов способна повредить сетевое оборудование);
- *пожаробезопасность* из-за отсутствия искрообразования, что особенно важно при обслуживании технологических процессов повышенного риска (на химических, нефтеперерабатывающих предприятиях);
- *малый вес и объем* по сравнению с медным кабелем в расчете на одну и ту же пропускную способность.

**Полностью оптические сети AON (All-optical Network)** представляют класс сетей, в функционировании которых главную роль при коммутации, мультиплексировании, ретрансляции играют не электронные (оптоэлектронные), а чисто оптические технологии.

Полностью оптические сети АОН претендуют на роль главенствующей сетевой технологии, способной обеспечить гигантские скорости передачи цифровых потоков, как для сегодняшних, так и для завтрашних сетевых информационных приложений.

Большинство оптических коммутационных устройств и элементов, применяемых в АОН, используют *цифровую передачу сигнала с модуляцией интенсивности светового луча*, при которой бинарной единице соответствует передача света большой интенсивности, а бинарному нулю - передача света малой интенсивности.

### 3.1 Элементы полностью оптических сетей

На протяжении последних нескольких лет в области создания полностью оптических сетей АОН ведутся интенсивные исследования, направленные на создание более совершенного оборудования и разработку стандартов. Среди фирм, которые наиболее активно ведут такие исследования, следует выделить: Lucent, Alcatel, Ericsson, Technologies, Newleft Packard, NEC, Siemens.

На рис. 3.1 приведена типовая схема связи с использованием волоконно-оптической линии связи, реализующая топологию “точка-точка”.



Рисунок 3.1 - Типовая схема ВОЛС

**Оптический передатчик** обеспечивает преобразование входного электрического цифрового сигнала в выходной световой (цифровой) сигнал. Оптический излучатель “включается” и “выключается” в соответствии с поступающим на него битовым потоком электрического сигнала. Для этих целей используются инфракрасные светоизлучающие диоды или лазеры (лазерные диоды). Светодиоды рассчитаны на большой диаметр сердцевины волокна (многомодовые волокна), а лазеры лучше подходят для передачи сигнала по одномодовому волокну. Типичные значения спектральной полосы излучения составляют для светодиодов от 20 до 100 нм, для одномодовых лазерных диодов - 0,1 нм. Потребляемая мощность для светодиодов - около 10 мВт, для лазерных диодов - порядка 1 мВт.

**Оптический приемник** обеспечивает обратное преобразование входных оптических импульсов в выходные импульсы электрического тока. В качестве основного элемента оптического приемника используются так называемые лавинные фотодиоды, имеющие очень малую инерционность.

**Повторитель** состоит из оптического приемника, электронного усилителя и оптического передатчика. Повторители предназначены для усиления осла-

бывшего в процессе распространения на большое расстояние оптического сигнала, а также для восстановления фронтов импульсов.

Повторитель в зависимости от стандарта передачи может работать в синхронном или асинхронном режимах.

При *синхронном режиме* приемное устройство повторителя регулярно принимает синхроимпульсы, на основании которых настраивает свой таймер, задающий частоту для последующей передачи. В линии при этом поддерживается непрерывный битовый поток. В передаваемую последовательность повторитель добавляет синхроимпульсы для синхронизации следующего участка.

При *асинхронном режиме* передаваемая информация организуется в пакеты данных. Каждому пакету предшествует служебная группа битов - преамбула, которая обеспечивает синхронизацию приемного устройства. До приема преамбулы приемное устройство находится в режиме ожидания.

Повторитель, который полностью восстанавливает первоначальную форму оптического сигнала, называется *регенератором*.

**Оптический усилитель** не осуществляет оптоэлектронного преобразования, как это делают повторители или регенераторы. Он, используя специальные активные среды и лазеры накачки, непосредственно усиливает проходящий оптический сигнал, благодаря индуцированному излучению. Таким образом, усилитель не наделен функциями восстановления скважности импульсов. Однако есть две причины, которые делают применение усилителей более предпочтительными:

- качество сигнала, передаваемого по оптическому волокну, остается очень высоким из-за малой дисперсии и затухания;
- усилитель является более универсальным устройством, поскольку он (в отличие от повторителя) не привязан к стандарту передачи сигнала.

По последней причине, в отличие от регенераторов, усилители обеспечивают "прозрачное" усиление, что позволяет передавать информацию на более высоких скоростях и наращивать пропускную способность линии до тех пор, пока не вступят в силу другие ограничивающие факторы (например, поляризованная модовая дисперсия). Использование же в линиях регенераторов не позволяет наращивать их пропускные способности.

В отличие от регенераторов, усилители все же вносят дополнительный шум, который необходимо учитывать.

В АОН широкое распространение получили эрбиевые усилители EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), использующие лазер накачки с длиной волны 980 или 1480 нм. Работая в диапазоне от 1535 до 1560 нм, они могут обеспечить усиление входного сигнала на 30...35 дБ. Усилители также обеспечивают усиление многоканальных (мультиплексных) сигналов, сокращая тем самым число электронных дорогостоящих регенераторов на протяженной оптической линии связи.

**Волоконно-оптический кабель (ВОК)** характеризуется строительной длиной (длиной непрерывного участка, поставляемого на одном барабане), варьируемой в зависимости от типа кабеля в пределах 2...10 км. Отдельные ка-

бели сращиваются сваркой оптических волокон. На каждом участке ВОК концы защищаются специальной герметичной проходной муфтой.

Все оптические волокна делятся на две группы: многомодовые MMF (Multi Mode Fiber) и одномодовые SMF (Single Mode Fiber). Модами называются различные типы световых лучей.

Использование многомодового волокна ограничено локальными сетями с характерными длинами сегментов до 2 км.

Одномодовое волокно имеет более высокую пропускную способность и используется исключительно на протяженных магистралях. Однако оно требует использования более дорогих лазерных передатчиков.

**Оптические разветвители (Coupler)** являются устройствами, относящимися к пассивным компонентам ВОЛС. Широко используются при построении распределенных волоконно-коаксиальных сетей кабельного телевидения, а также в межгосударственных проектах полностью оптических сетей. Оптические разветвители представляют собой в общем случае многополосное устройство, в котором излучение, подаваемое на часть входных полюсов, распределяется между его остальными полюсами.

Оптические разветвители классифицируются по следующим типам:

- *древовидный разветвитель (tree coupler)* - осуществляет расщепление одного входного оптического сигнала на несколько выходных или выполняет обратную функцию;
- *звездообразный разветвитель (star coupler)* - обычно имеет одинаковое число входных и выходных полюсов. Оптический сигнал приходит на один из входных полюсов и равномерно распределяется между всеми выходными полюсами;
- *ответвитель (tap)* - это обобщение древовидного разветвителя, когда выходная мощность распределяется необязательно в равной пропорции между выходными полюсами.

**Волновые конвертеры** предназначены для преобразования одной длины волны в другую, с обеспечением прозрачной связи между устройствами в разных подсетях.

**Фильтры** предназначены для выделения одного нужного канала из множества мультиплексных каналов в волокне. Функции фильтра может выполнять оптический демультиплексор.

**Оптические коммутаторы** выполняют в АОН ту же функцию, что и обычные электронные коммутаторы в традиционных сетях, а именно обеспечивают коммутацию каналов или пакетов (принцип работы оптических коммутаторов рассмотрен в п. 2.7).

**Пассивные оптические мультиплексоры** обеспечивают функцию сборки нескольких простых сигналов различных длин волн из нескольких волокон в мультиплексный сигнал, распространяющийся по одному волокну. **Демультиплексоры** выполняют обратную функцию.

**Волновое уплотнение WDM (Wavelength Division Multiplexing)** может осуществляться с помощью WDM-фильтра.

### 3.2 Плотное волновое мультиплексирование DWDM

Самым важным параметром в технологии *плотного волнового мультиплексирования* DWDM (Dence Wavelength Division Multiplexing) является малое расстояние между соседними каналами 3,2...0,4 нм.

Мультиплексоры DWDM рассчитаны на работу с большим числом каналов (32 и более). Типовая схема DWDM мультиплексора/демультиплексора приведена на рис. 3.2.

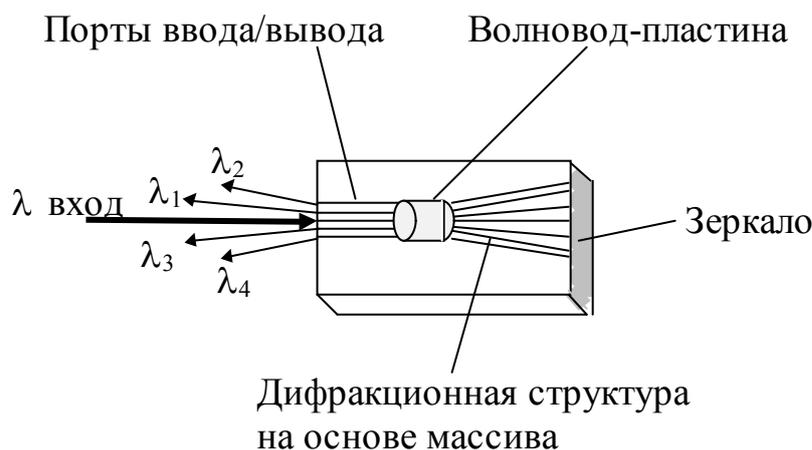


Рисунок 3.2 - DWDM мультиплексор

Рассмотрим работу DWDM мультиплексора в режиме демультиплексирования. Приходящий мультиплексный сигнал попадает на входной порт. Затем проходит через волновод-пластину и распределяется по множеству волноводов, представляющих дифракционную структуру. В каждом из волноводов дифракционной структуры сигнал по-прежнему остается мультиплексным. Далее происходит отражение сигналов от зеркальной поверхности и, в итоге, световые потоки вновь собираются в волноводе-пластине, где происходит их фокусировка и интерференция, - образуются пространственно разнесенные интерференционные максимумы интенсивности, соответствующие разным каналам. Геометрия волновода-пластины, в частности расположение выходных полюсов, и длины волноводов дифракционной структуры рассчитываются таким образом, чтобы интерференционные максимумы совпадали с выходными полюсами. Мультиплексирование происходит обратным путем.

Наряду с устройствами DWDM, в которых мультиплексируются/ демультиплексируются сразу все каналы, появляются также новые устройства, не имеющие аналогов в системах WDM и работающие в режиме добавления или вывода одного и более каналов основного мультиплексного потока. Так как выходные порты демультиплексора закреплены за определенными длинами волн, говорят, что такое устройство осуществляет *пассивную маршрутизацию* по длинам волн.

DWDM мультиплексоры, являясь чисто пассивными устройствами, вносят большое затухание в сигнал. При этом возникает необходимость установления оптического усилителя EDFA перед и/или после DWDM мультиплексора.

Для проведения тестов на взаимную совместимость оборудования различных производителей необходима стандартизация пространственного расположения каналов в волокне.

Сектор по стандартизации телекоммуникаций ITU-T утвердил частотный план DWDM с расстоянием между соседними каналами 100 ГГц ( $\Delta\lambda \approx 0,8$  нм). Равномерное распределение каналов позволяет оптимизировать работу волновых конвертеров, перестраиваемых лазеров и других устройств AON.

Сетка 100 ГГц обеспечивает возможность организации эффективной передачи цифровых потоков в каналах на скоростях 2,4 Гбит/с (STM-16) (рис. 3.3,а) и 10 Гбит/с (STM-64) (рис. 3.3,б).

В настоящее время ITU-T обсуждается вопрос о принятии частотного плана с еще меньшим расстоянием между каналами - 50 ГГц ( $\Delta\lambda \approx 0,4$  нм). Эта сетка пока не стандартизована. Как видно из рис. 3.3, б, мультиплексирование каналов STM-64 с интервалом 50 ГГц недопустимо, поскольку возникает перекрытие спектров соседних каналов.

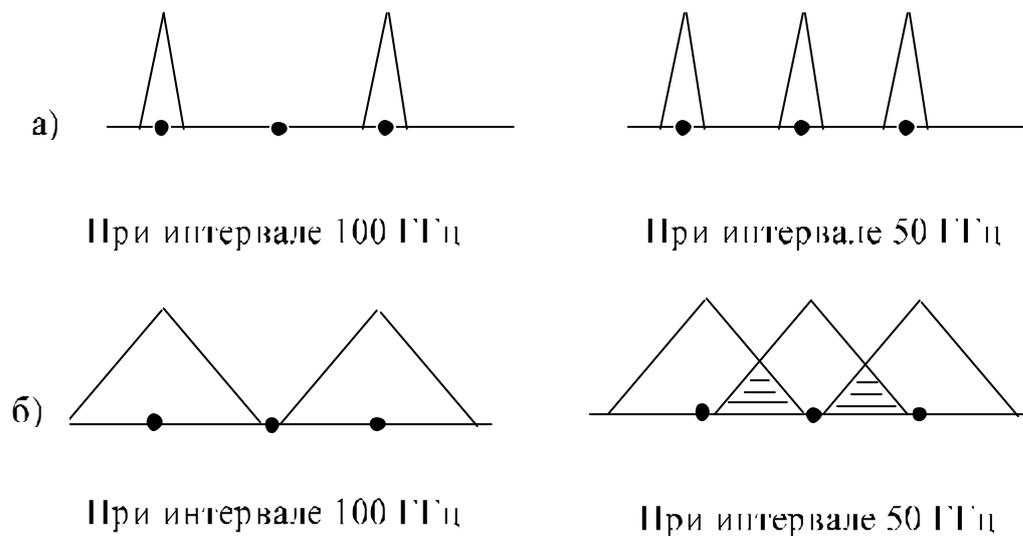


Рисунок 3.3 - Спектральное размещение каналов в волокне

В настоящее время, как известно, налаживается производство мультиплексорных систем с синхронной цифровой иерархией SDH со скоростями передачи на канал 2,5 и 10 Гбит/с. Хотя волокно обеспечивает огромную полосу пропускания, каналы сетей доступа остаются рассчитанными на меньшую скорость. Терминалы, обеспечивающие доступ STM-64, разработаны для создания опорных магистралей и допускают подключение менее скоростных потоков SDH только двух типов: STM-4 и STM-16. В случае необходимости организа-

ции доступа по менее скоростным каналам, например на основе STM-1 или на основе трибных интерфейсов плезиохронной иерархии E1, E2, E3 и т. д., наряду с терминалом STM-64, потребуется дополнительное сетевое устройство, которое будет связываться с терминалом доступа STM-4 или STM-16. Сетевые устройства, предназначенные для каналов STM-16 и более низкоскоростные, допускают реализацию непосредственного доступа.

Поскольку трудно предсказать потребности в распространении полосы пропускания в сетях, то, по-видимому, преимущества будут иметь те архитектуры, которые допускают более плавное наращивание своих ресурсов в более широких пределах. Например, если сравнить два способа наращивания системы до обеспечения скорости потока 800 Гбит/с: 8 x STM-64 и 32 x STM-16, то можно отметить следующее. В первом варианте мы имеем больший шаг наращивания (10 Гбит/с), в то время как во втором варианте при шаге 2,5 Гбит/с наращивание можно осуществлять более плавно. Кроме того, WDM - мультиплексирование при большом числе волновых каналов, последующая их полностью оптическая кросс-коммутация, а также ввод/вывод представляются более простым решением, чем предварительное электронное агрегирование потоков STM-16 в меньшее число потоков STM-64 на терминале SDH.

### 3.3 Классификация полностью оптических сетей

С ростом объема передаваемой информации в сети рано или поздно возникает задача наращивания ее емкости. Эта задача может быть решена при помощи замены коммутационного электронного оборудования в центральных узлах на более мощное (рассчитанное на скорости передачи 1; 2,5 или до 10 Гбит/с и имеющее возможность варьировать механизмами коммутации (ATM/SDH)), а также при помощи привлечения резервных (ранее не использованных) волокон в проложенных кабелях. Если все резервные волокна исчерпаны, выход один - прокладка нового кабеля по возможности в существующие каналы, но такое решение может оказаться негибким и не всегда быстрым. Другой путь - привлечение оптических технологий и построение новых магистралей исключительно на основе технологий полностью оптических сетей AON, что позволяет значительно повысить пропускную способность сети, ее гибкость и надежность, не прибегая к переоборудованию существующей части сети.

Все AON можно разбить на три категории:

- AON, использующие простые многоволновые линии SMWL (Simple Multi - Wavelength Link);
- AON с коммутацией каналов;
- AON с коммутацией пакетов.

Первые две категории сетей имеют одну важную характеристику - *прозрачность сети* по отношению к используемому приложению. Оптическая прозрачность (передача оптического сигнала в формате приложения - кода, частоты модуляции и т. п.) обеспечивается по любому из оптических WDM каналов от узла-источника до узла-назначения без использования промежуточных уст-

роиств преобразования сигнала. Прозрачные AON, кроме чисто пассивных компонентов (мультиплексоров, ответвителей), могут содержать активные элементы, такие, как конфигурируемые волновые маршрутизаторы, коммутаторы, конвертеры. Даже если управление этими устройствами электронное, весь путь распространения сигнала остается оптическим. Электронное управление и контроль требуют меньшей полосы пропускания и используются, в основном, для управления конфигурацией узлов, WDM каналов при удовлетворении различных требований пользователей.

Оптическое терминальное оборудование в прозрачной AON в общем случае представляют: перестраиваемые лазерные передатчики, перестраиваемые фильтры. Две оконечные системы сети могут установить канал связи через такую сеть посредством настройки на определенные две волны (приема и передачи), которые им предоставляет сетевой контроллер оптического терминала (доступа в AON), обработав соответствующий предварительный запрос. После установления соединения магистральный канал становится прозрачным по отношению к используемому приложению.

Допускается и более интересная возможность, когда целая группа пользователей может получить соответствующий набор длин волн от прозрачной AON и организовать свою виртуальную сеть. Таким образом, прозрачная AON обладает неограниченными возможностями объединения пользователей.

### 3.3.1 Простая многоволновая линия связи SMWL

Этот тип AON представляет собой простейший способ организации сети, обеспечивающий множество соединений "точка-точка" между однотипными оконечными системами, которые взаимодействуют на определенных, предназначенных исключительно для них, длинах волн.

Преимуществами такой сети являются:

- большая полоса пропускания, отводимая на каждую пару взаимодействующих пользователей;
- высокая надежность связи вследствие гарантированной полосы пропускания (под каждый канал отводится отдельная длина волны);
- прозрачность каждого канала сети по отношению к выбору сетевого приложения между оконечными устройствами.

Недостатком является наличие жестко фиксированных соединений по каналам.

Многоволновая линия SMWL не является полноценной сетью, поскольку не позволяет осуществить соединения пользователей по принципу "каждый с каждым". Она выполняет исключительно функции *транспортной магистрали* высокой емкости и подобно магистралям SDH, обеспечивает статическое соединение "точка-точка". Многоволновые линии SMWL могут входить в состав более сложных архитектур полностью оптических сетей.

### 3.3.2 AON с коммутацией каналов

AON с коммутацией каналов подразделяется на *пассивные оптические сети* PON (Passive Optical Network) и AON с *активной волновой маршрутизацией*.

PON - это полностью оптические сети, использующие только пассивные оптические компоненты: направленные ответвители, волновые мультиплексоры и фильтры. Особенностью PON является низкая цена и малые затраты на эксплуатацию. Основная сфера приложения - "волокно - в - дом". При использовании PON не исключается частичная возможность (при больших расстояниях) использования оптических усилителей EDFA, хотя они и не являются чисто пассивными элементами.

Различают PON следующих видов: *широковещательные AON* и AON с *пассивной волновой маршрутизацией*.

**Широковещательные AON.** Каждому пункту широковещательной AON

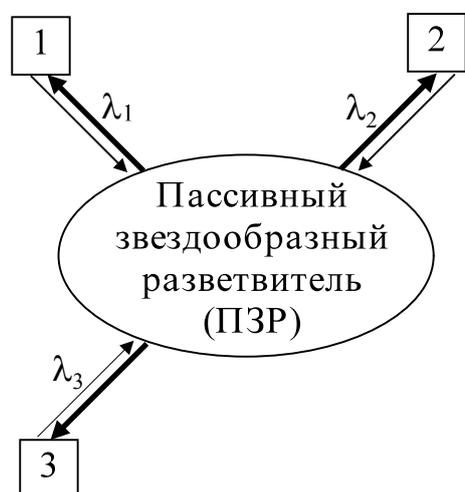


Рисунок 3.4 – Широковещательная AON

обычно присписывается определенная длина волны, на которой он ведет передачу. Сигналы со всех удаленных пунктов собираются в *оптическом звездообразном разветвителе*, где они смешиваются и распределяются по выходным полюсам в волокне, идущем обратно к удаленным пунктам (рис. 3.4). Каждый пункт получает мультиплексный сигнал, представленный всеми длинами волн.

Каждый удаленный пункт сам определяет, канал какой длины ему выбрать из пришедшего мультиплексного потока. В качестве приемного элемента может служить либо перестраиваемый фильтр с одним фотоприемником, либо демульт-

типлексор WDM с множеством фотоприемников, подключенных к выходным полюсам.

Поскольку центральный узел широковещательной AON и все оптические элементы являются чисто пассивными, такая сеть имеет очень высокую надежность. Число пунктов в сети ограничивается максимальным числом каналов, которое можно мультиплексировать в одно волокно. Технический пре-

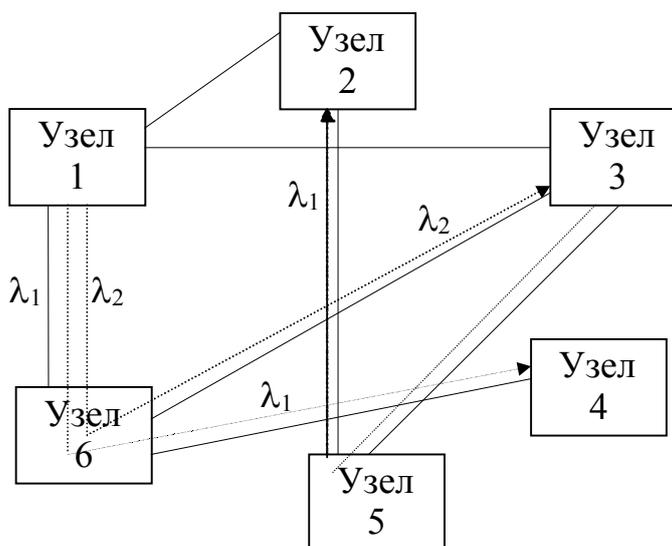


Рисунок 3.5 - AON с пассивной волновой маршрутизацией

дел, который здесь может быть достигнут с использованием технологии плотного волнового мультиплексирования DWDM, составляет порядка 200.

**АОН с пассивной волновой маршрутизацией.** В такой сети сигнал определенной длины волны может перенаправляться (статически маршрутизироваться) в пункт назначения через последовательность промежуточных узлов вместо того, чтобы широковещательно распределяться между всеми оконечными пунктами. Это позволяет экономить энергию оптического сигнала из-за отсутствия разветвителей и допускает одновременное использование сигналов одной и той же длины волны в разных непересекающихся частях сети (рис. 3.5).

Промежуточные узлы с пассивной волновой маршрутизацией представляют собой статические маршрутизаторы, выполненные на основе WDM мультиплексов.

**АОН с активной волновой маршрутизацией.** Дальнейшее наращивание сети связано с переходом к *динамической маршрутизации*. Последняя предполагает использование оптических коммутационных узлов. На рис. 3.6 показана топология АОН с коммутацией каналов, в которой на уровне групп реализована широковещательная АОН. В каждой группе локально можно использовать один и тот же набор длин волн. На более высоком уровне используются сегменты сети с динамической волновой маршрутизацией. При этом в узлах коммутации (УК), помимо функции маршрутизации, должна осуществляться *волновая конверсия*, которая позволяет устанавливать соединения между волновыми каналами с разными длинами волн. Волновая конверсия также позволяет эффективно использовать ограниченное число волновых каналов путем использования одной длины волны в различных соединениях. На рис. 3.7 показана возможная реализация УК с коммутацией каналов, выполненного на основе *волновых конвертеров*.

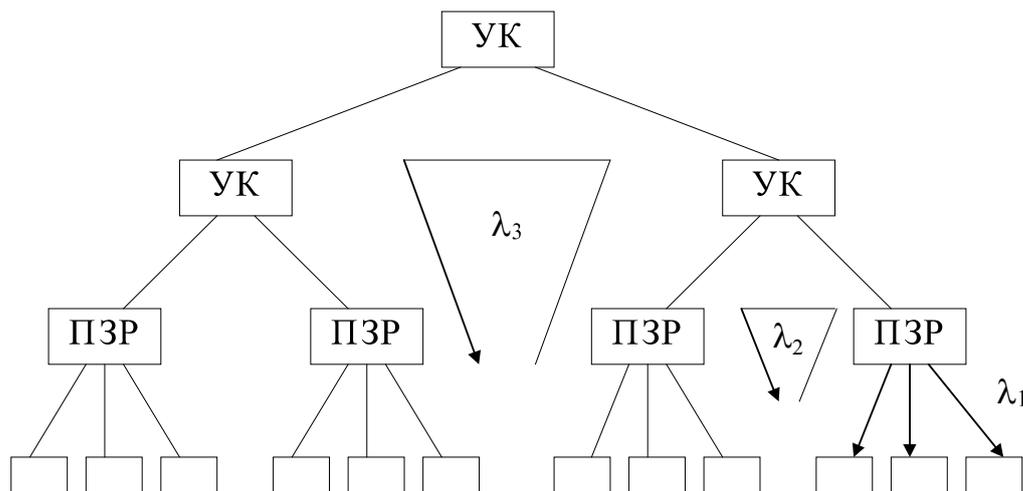


Рисунок 3.6 - АОН с коммутацией каналов:  
ПЗР - пассивный звездообразный разветвитель

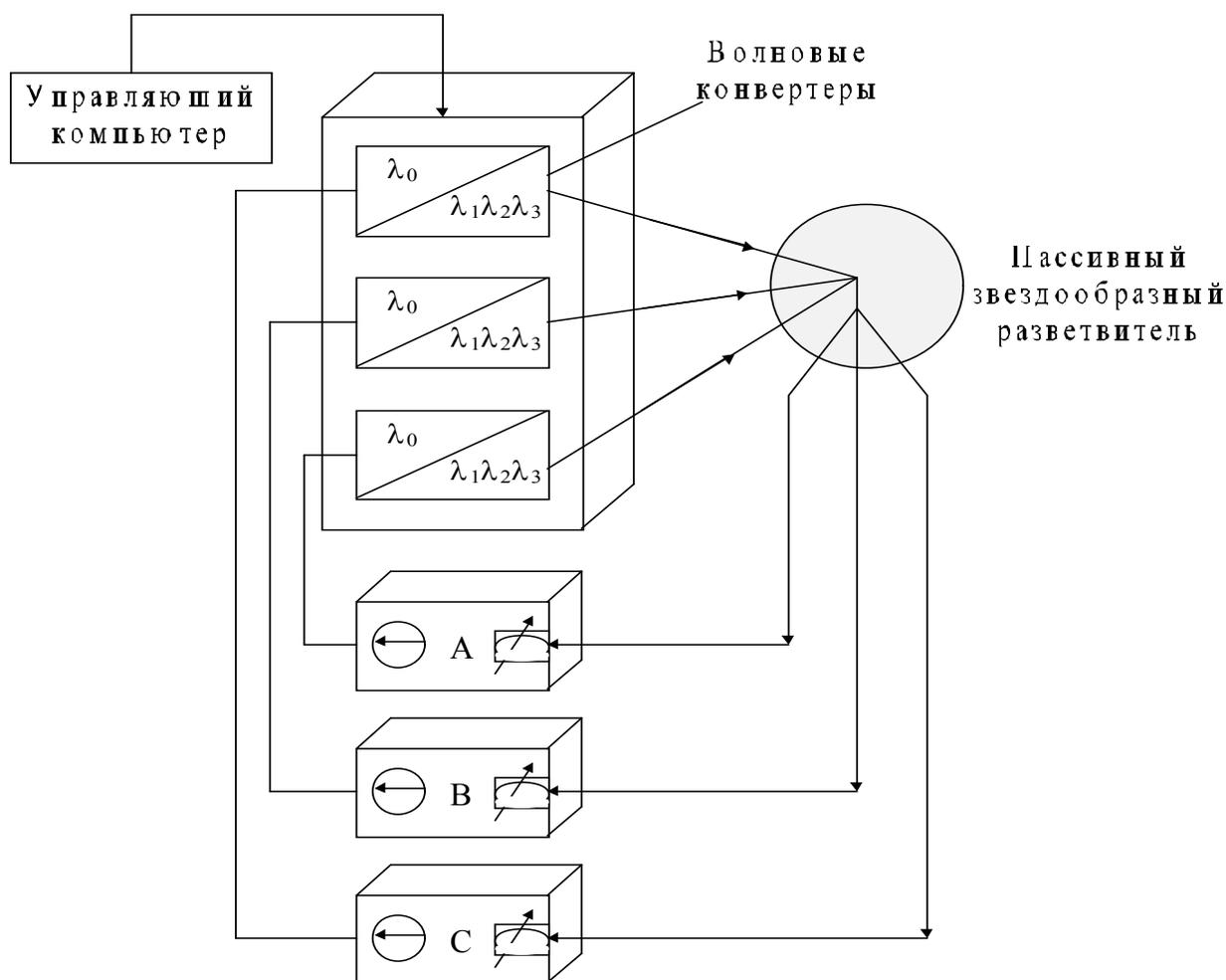


Рисунок 3.7 - Центральный узел AON на основе волновых конвертеров

Каждый узел передает сигнал на фиксированной длине волны, а также ведет прием на установленной для данного узла (фиксированной) длине волны. Выбор длины волны для передачи не принципиален, в частности все узлы могут передавать на одной и той же длине волны. Центральный узел коммутации принимает оптические сигналы от всех удаленных узлов и конвертирует их в сигналы других длин волн в соответствии с командами от управляющего компьютера. Звездообразный разветвитель смешивает сигналы разных длин волн и распределяет по всем выходным полюсам.

Логическому соединению между двумя пунктами предшествует настройка соответствующих конвертеров.

Основным преимуществом рассмотренной централизованной коммутируемой сети является тот факт, что ее стоимость при очень больших скоростях (1 Гбит/с и более) значительно ниже сети с чисто электронным коммутатором в центральном узле.

### 3.3.3 AON с коммутацией пакетов

AON с коммутацией каналов хотя и позволяют строить оптические магистрали, прозрачные к использованию любых приложений со стороны конечных систем, обладают одним недостатком - они не могут эффективно работать

с изохронными потоками ("взрывным трафиком") от локальных сетей. В этой связи внедрение полностью оптических сетей с коммутацией пакетов является более предпочтительным с точки зрения лучшего использования отведенной полосы пропускания оптических каналов.

Коммутация пакетов в AON представляет совершенно новое направление развития сетей.

Различают два метода пакетной коммутации в AON:

- *последовательная битовая коммутация;*
- *параллельная битовая коммутация.*

Оптическая **последовательная битовая коммутация BSPS** (Bit-sequential Packet Switching) - это метод прямого управления электроникой коммутационных элементов, в отличие от методов, используемых в сетях с коммутацией каналов. При использовании BSPS заголовок пакета в канале взятой длины волны кодируется последовательностью из  $p$  *бинарных* битов (битовая единица определяется наличием оптического сигнала, а битовый ноль - его отсутствием). Эти биты устанавливают коммутатор в надлежащее состояние, позволяя следующему за заголовком телу пакета свободно идти через коммутатор к соответствующему выходному полюсу. Поскольку коммутатор прозрачен к телу пакета, то такая сеть сохраняет название полностью оптической сети. Для заголовка из  $p$  битов существует  $2^p$  различных адресов узлов сети. Волновое мультиплексирование позволяет значительно увеличить передающую емкость, но приводит к дополнительному усложнению. Прежде чем выполнить пакетную коммутацию каналов, необходимо предварительно демultipлексировать сложный сигнал, а на выходе коммутаторов - повторно мультиплексировать соответствующие выходные симплексные каналы.

*Самомаршрутизирующая сеть с волновой адресацией SWANET* (Self-routed Wavelength-Addressable Network) является улучшением бинарной BSPS архитектуры. SWANET использует преимущества BSPS и WDM, в результате чего значительно увеличивается допустимое число различных адресов, устанавливаемых битами заголовков пакетов (рис. 3.8).

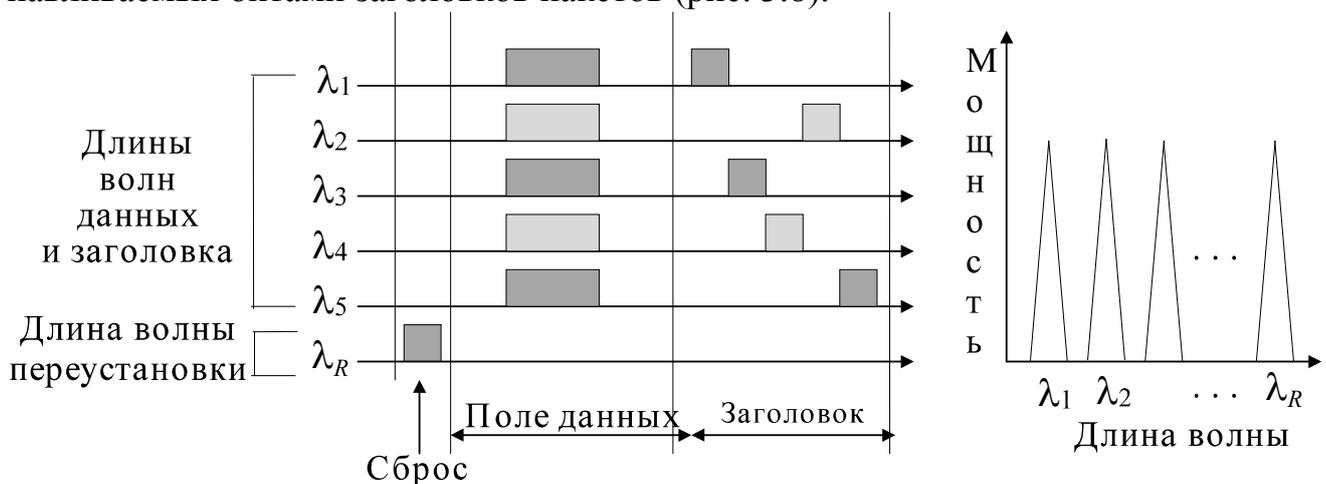


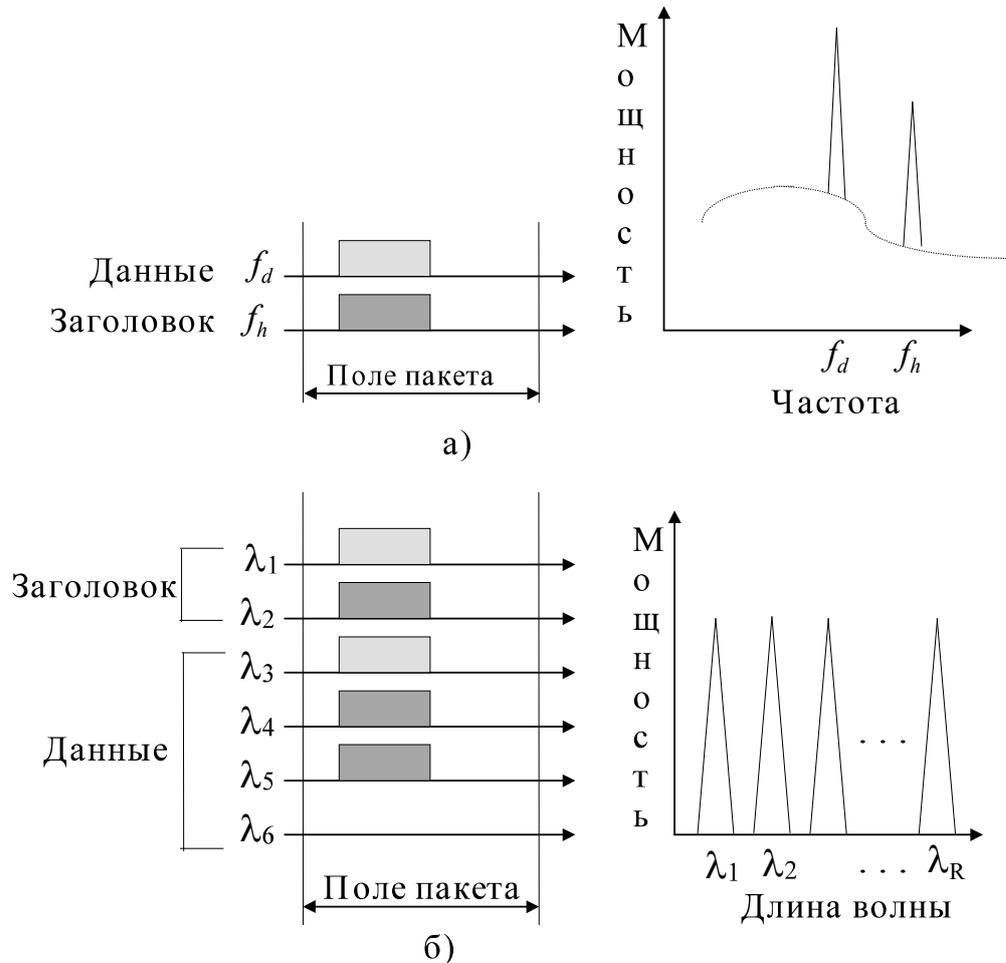
Рисунок 3.8 - Структура пакета в сети SWANET

SWANET имеет аналогичную BPSK структуру пакета. Заголовок, за которым следует поле данных, кодируется последовательностью из  $p$  битов, охватывая сразу несколько волновых каналов. Заголовок и поле данных используют один и тот же набор длин волн. Если число длин волн  $k$ , то каждый бит заголовка представляется единицей (есть сигнал) на одной из длин волн, в то время как на остальных  $k-1$  каналах сигнала в это время нет. Таким образом, полное число различных конфигураций заголовка (максимальное число конечных узлов сети) составляет  $k^p$ . Для требуемой коммутации всего мультиплексного канала коммутатор устанавливает биты заголовка в соответствующее состояние. Завершение передачи пакета происходит посредством передачи сигнала "Сброс" на специальной длине волны, выделенной исключительно для этой цели. Поскольку сеть прозрачна по отношению к формату поля данных, то это поле может охватывать как одну интегрированную многоволновую передачу, так и множество не связанных между собой передач по индивидуальным каналам. В первом случае необходима синхронизация между полями данных различных каналов, во втором - такая синхронизация необязательна. Ограничениями SWANET являются дисперсия и поперечные помехи.

Для реализации сетей с **параллельной битовой коммутацией BPPS** (Bit-parallel Packet Switching) предложены две различные техники кодирования: техника *мультиплексирования поднесущих* SCM (sub-carrier multiplexing) и техника *многоволновой BPPS*. Обе техники используют отдельные каналы в одном и том же волокне для передачи данных и собственно заголовка, на основании которого происходит переключение состояний коммутаторов. Заголовок пакета передается теперь не последовательно, когда он предшествовал передаче поля данных пакета, а параллельно с данными, что позволяет увеличить пропускную способность.

В технике SCM данные и заголовок кодируются как две различные поднесущие оптического носителя и далее передаются одновременно (рис. 3.9, а). SCM позволяет эффективно использовать имеющийся спектр за счет ограничения битовой скорости, которая должна быть меньше, чем частота поднесущей. Таким образом, техника SCM полезна, когда весь спектр сигнала данных ограничен, т. е. битовая скорость данных не очень высока.

SCM имеет ряд ограничений применительно к полностью оптическим сетям. Главное из них связано с невозможностью избежать сложных электронных преобразований поднесущих заголовка и данных в коммутаторе, так как перед началом коммутации данные и заголовок должны быть демультиплексированы. Второе ограничение связано с характером распространения сложного сигнала по волокну. Поскольку заголовок и данные мультиплексированы в канал одной и той же несущей частоты, то передатчик, имеющий ограниченные ресурсы, должен обеспечить достаточную мощность для каждого сигнала, что уменьшает мощность сигналов по отдельности.



Рисунка 3.9 - Структура пакета в сетях:

а - с техникой мультиплексирования поднесущих;

б - с техникой многоволновой параллельной битовой коммутации

Модификацией SCM является метод, при котором данные передаются на основном носителе, а заголовок мультиплексируется на поднесущую. В этой технике частота поднесущей не ограничивает битовую скорость передачи данных. Поскольку заголовок не требует высокой битовой скорости передачи, то для него предельное соотношение сигнал/шум может быть значительно ниже, что допускает без ущерба большее затухание сигнала в волоконно-оптической линии. Данный метод демонстрировался для скорости передачи данных 2,5 Гбит/с и для заголовка 40 Мбит/с, который мультиплексировался на поднесущую шириной 3 ГГц.

Многоволновая параллельная битовая коммутация - это техника кодирования, при которой для данных и для заголовка приписываются различные наборы длин волн. В отличие от традиционного волнового мультиплексирования, где каждый пакет связан с определенной длиной волны, в этой технике пакет (как и заголовок) связывается с несколькими длинами волн (рис. 3.9, б).

Ряд особенностей делают многоволновую параллельную битовую коммутацию более предпочтительной по сравнению с SCM для использования в полностью оптических сетях. Во-первых, простая оптическая фильтрация волновых каналов выполняется легче, чем радиочастотное выделение поднесущих.

Во-вторых, можно выполнить кодирование заголовка так, что заголовок будет распознаваться коммутатором, а коммутация будет происходить на пакетных скоростях вместо скоростей данных. И, наконец, поскольку отдельные источники излучения используются для каждой длины волны, то не возникает проблемы, связанной с потерей мощности.

В заключение следует отметить, что в настоящее время ведутся интенсивные работы по реализации ряда крупных международных проектов сетей AON, среди которых можно выделить такие как:

- Проект OPEN (Optical Pan-European Network), цель которого состоит в разработке концепции Пан-Европейской сети, соединяющей крупнейшие европейские города волоконно-оптическими линиями связи со сверхвысокой пропускной способностью. Сеть использует методы спектрального разделения и позволяет осуществить гибкую взаимосвязь европейских национальных сетей.
- Проект COBNET (Corporate Optical Backbone Network), основной целью которого является разработка архитектурной и технологической концепций программных сетей на основе использования преимуществ оптических АМТ технологий.
- Проект METON (Metropolitan Optical Network), предусматривающий разработку оптической транспортной городской сети SDH на основе различных топологий с применением спектрального разделения, оптических мультиплексоров и коммутаторов АТМ.
- Проект BROADBAND (Broadband Loop), цель которого – проведение испытаний недорогих широкополосных сетей абонентского доступа с доведением волокна в локальный узел по мере роста потребностей в полосе пропускания.

## Т Е З А У Р У С

<b>Адаптивная коммутация</b> Adaptable Switching Адаптивна комутація	Коммутация, основанная на принципе статистического уплотнения, занятого соединения в режиме КК пакетами в паузах при передаче речи или между передачей данных
<b>АОН, использующие многоволновые линии</b> Simple Multi - Wavelength Tink (SMWL) АОН, які використовують багатохвильові лінії	Способ организации сети, обеспечивающий множество соединений "точка - точка" между однотипными оконечными системами, которые взаимодействуют на определенных, предназначенных исключительно для них, длинах волн
<b>Асинхронное временное мультиплексирование</b> Asynchronous Time Multiplexing Асинхронне часове мультиплексування	Асинхронный режим переноса
<b>Байт-интерливинг</b> Byte-interleaving Байт-інтерлівінг	Чередование байтов, по одному из каждого канала
<b>Бит-интерливинг</b> Bit- interleaving Біт-інтерлівінг	Чередование битов, по одному из каждого канала
<b>Блок-интерливинг</b> Block-interleaving Блок-інтерлівінг	Чередование блоков по несколько байтов из каждого канала
<b>Быстрая коммутация пакетов</b> Fast Packet Switching (FPS) Швидка комутація пакетів	Коммутация пакетов на сетях АТМ отличается тем, что за счет использования в УК многопроцессорных коммутационных систем (коммутаторов АТМ) с многочисленными входами и выходами в них обеспечивается параллельная обработка большого количества одновременно коммутируемых пакетов (ячеек АТМ)
<b>Быстрый пакет</b> Fast Packet Швидкий пакет	Ячейка, дополненная заголовком, определяющим маршрут ее движения внутри коммутатора

<b>Виртуальный канал</b> Virtual Circuit Віртуальний канал	Канал, установленный логическим путем
<b>Виртуальный контейнер</b> Virtual Container Віртуальний контейнер	Фрейм стандартных размеров с присоединенными к нему заголовками, предназначенный для инкапсуляции передаваемых данных
<b>Волновой конвертер</b> Wave Converter Хвильовий конвертер	Устройство, предназначенное для преобразования одной длины волны в другую
<b>Волновое уплотнение</b> Wavelength Division Multiplexing (WDM) Хвильове ущільнення	Функция сборки нескольких простых сигналов различных длин волн из нескольких волокон в мультиплексный сигнал, распространяющийся по одному волокну
<b>Временной принцип построения коммутационного блока</b> Time Construction Principle of Switching Unit Часовий принцип побудови комутаційного блока	Принцип, основанный на установлении связи входа с выходом через буферное запоминающее устройство (БЗУ)
<b>Выборка</b> Interleaving Вибірка	Кодовая комбинация, соответствующая одному дискретному отсчету амплитуды речевого сигнала
<b>Гибридная коммутация</b> Compatible Switching Гібридна комутація	Коммутация, при которой пропускная способность линии связи, т. е. кадр (фрейм) делится на две области, одна из которых отводится для временных каналов, а другая - для передачи пакетов
<b>Датаграмма</b> Datagram Датаграма	Пакет, самостоятельно движущийся по сети
<b>Датаграммный режим</b> Datagram Mode Датаграмний режим	Режим, при котором каждый пакет маршрутизируется в сети самостоятельно

<b>Демультимплексор</b> Demultiplexor (DEMUX) Демультимплексор	Устройство, выполняющее функцию, обратную мультиплексированию
<b>Изохронный поток</b> Isochronous flow (stream) Изохронний потік	Поток, характеризующийся изменением скорости передачи - “взрывным” (пачечным) режимом работы источника
<b>Интерливинг</b> Interleaving Інтерлівінг	Процесс формирования канальных выборок при формировании фрейма
<b>Коммутация временных каналов</b> Switching Circuits (SC) Комутація часових каналів	Образование соединительного линейного тракта от абонента до абонента на основе метода коммутации каналов
<b>Коммутация пакетов</b> Packet Switching (PS) Комутація пакетів	Формирование соединительного тракта при асинхронном режиме передачи сообщений
<b>Мультиплексор</b> Multiplexor (MUX) Мультиплексор	Устройство, принимающее несколько потоков от разных приложений и передающее их в линию в виде мультиплексного сигнала
<b>Оптическая последовательная побитовая коммутация</b> Bit-sequential packet switching (BSPS) Оптична послідовна побітова комутація	Метод прямого управления электроникой коммутационных элементов, при котором биты заголовка пакета устанавливаются коммутаторы в нужное состояние
<b>Оптический передатчик</b> Optical Transmitter Оптичний передавач	Устройство, обеспечивающее преобразование входного электрического цифрового сигнала в выходной световой (цифровой) сигнал
<b>Оптический приемник</b> Optical Receiver Оптичний приймач	Устройство, обеспечивающее преобразование входных оптических импульсов в выходные импульсы электрического тока

<b>Оптический разветвитель</b> Coupler Оптичний розгалужувач	Многополосное устройство, в котором излучение, подаваемое на часть входных полюсов, распределяется между его остальными полосами
<b>Оптический усилитель</b> Optical Amplifier Оптичний підсилювач	Устройство, обеспечивающее усиление проходящего оптического сигнала благодаря индуцированному излучению, не наделенное функциями восстановления скважности импульса
<b>Пакет</b> Packet Пакет	Блок (сегмент) сообщения, снабженный заголовком
<b>Параллельная битовая коммутация</b> Bit-parallel Packet Switching (BPPS) Паралельна бітова комутація	Техника, использующая отдельные каналы в одном и том же волокне для передачи данных и заголовка, на основании которого происходит переключение состояний коммутаторов
<b>PAD-функция</b> Packet Assembler and Disassembler (PAD) PAD-функція	Функция разбиения/сборки сообщения при передаче и коммутации пакетов
<b>Плезиохронная цифровая иерархия</b> Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH) Плєзіохронна цифрова ієрархія	Стандартизованные уровни скоростей Европейской, Японской и Американской иерархий (от 64 до 140 кбит/с)
<b>Плотное волновое мультиплексирование</b> Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) Щільне хвильове мультиплексування	Волновое мультиплексирование с малым расстоянием между соседними каналами 3,2...0,4 нм
<b>Повторитель</b> Repeater Повторювач	Устройство, предназначенное для усиления ослабевшего в процессе распространения на большое расстояние оптического сигнала, а также для восстановления фронтов импульсов

<b>Полностью оптические сети</b> All-optical Network (AON) Повністю оптичні мережі	Класс сетей, в функционировании которых главную роль при коммутации, мультиплексировании, ретрансляции играют не электронные (оптоэлектронные), а чисто оптические технологии
<b>Посылка виртуального вызова</b> Virtual Call Sending Посилання віртуального виклику	Обмен служебными пакетами перед сеансом передачи сообщения в режиме виртуального вызова
<b>Пространственный принцип построения коммутационного блока</b> Space Construction Principle of Switching Unit Просторовий принцип побудови комутаційного блока	Принцип, обеспечивающий соединение в одной и той же временной позиции каналов входящей уплотненной линии (ВУЛ) с каналами исходящей уплотненной линии (ИУЛ)
<b>Режим виртуального вызова</b> Virtual Call Mode Режим віртуального виклику	Датаграммный режим, дополненный виртуальным вызовом
<b>Режим виртуального канала</b> Virtual Circuit Mode Режим віртуального каналу	Режим характеризуется тем, что фазе передачи пакетов сообщения предшествует фаза установления логического соединения между корреспондирующими абонентскими пунктами
<b>Режим виртуального соединения</b> Virtual Connection Mode Режим віртуального з'єднання	Режим, характеризующийся тем, что в фазе установления виртуального канала осуществляется резервирование буферов в запоминающих устройствах УК, входящих в маршрут передачи пакетов, достаточных для прохождения пакетов без задержек
<b>Режим качественного обслуживания</b> Quality of Service (QoS) Режим якісного обслуговування	Режим, параметры которого задаются пользователем при заявке на установление связи в фазе формирования виртуального соединения
<b>Режим переноса</b> Transfer Mode Режим перенесення	Способ транспортировки информации, рассматриваемый в аспектах мультиплексирования, передачи и коммутации

<b>Символьный интерливинг</b> Symbol interleaving Символьний інтерлівінг	Чередование количеств битов, необходимых для кодирования одного символа передаваемого текста, из каждого канала
<b>Синхронное временное мультиплексирование</b> Synchronous Time Multiplexing Синхронне часове мультиплексування	Объединение $n$ низкоскоростных цифровых потоков в один высокоскоростной поток
<b>Синхронный режим переноса</b> Synchronous Transfer Mode (STM) Синхронний режим перенесення	Режим коммутации временных каналов, базирующийся на принципе синхронного временного мультиплексирования при транспортировании информации от исходящего узла коммутации к входящему
<b>Синхронный транспортный модуль STM-n</b> Synchronous Transport Module of level n Синхронний транспортний модуль	Формат фрейма мультиплексного выходного сигнала синхронного потока
<b>Синхронная цифровая иерархия</b> Synchronous Digital Hierarchy (SDH) Синхронна цифрова ієрархія	Стандартизованные уровни скоростей от 155,52 Мбит/с и выше
<b>Смешанная коммутация каналов и пакетов</b> Mixed Circuits and Packet Switching Змішана комутація каналів та пакетів	Коммутация, при которой установление канала в УК от входа к выходу происходит не на все время сеанса связи, а лишь на время передачи пакета. На время же всего сеанса для передачи пакетов устанавливается виртуальный канал, как и на сети коммутации пакетов
<b>Таймер</b> Timer Таймер	Устройство с высоким стандартом частоты, предназначенное для синхронизации
<b>Тайм-слот</b> Time-slot Тайм-слот	Длительность временного интервала одного канала

<b>Телекоммуникационная технология</b> Telecommunication technology Телекомунікаційна технологія	Совокупность методов, определяющих способ транспортирования информационных сообщений в сети с некоторым гарантированным уровнем качества обслуживания (скоростью передачи, вероятностью ошибок), удовлетворяющим пользователей сети
<b>Технология ATM</b> Asynchronous Transfer Mode Технологія ATM	Технология, при которой транспортирование всех видов информации осуществляется пакетами фиксированной длины (ячейками) в 53 байта, из которых 48 байт определяют размер информационного поля и 5 байт отводится для заголовка
<b>Технология Frame Relay (FR)</b> Frame Relay technology Технологія Frame Relay	Метод передачи и коммутации кадров. Упрощенный протокол X.25, предназначенный для реализации на линиях связи с низким уровнем помех. FR обеспечивает подключение пользователей сети на скорости 2 Мбит/с
<b>Технология ISDN</b> ISDN technology Технологія ISDN	Технология коммутации каналов на разных скоростях, а также совместной коммутации каналов и пакетов
<b>Технология X.25</b> X.25 technology Технологія X.25	Метод передачи и коммутации пакетов, реализованный в протоколе X.25
<b>Транспортная сеть</b> Transport Network Транспортна мережа	Телекоммуникационная сеть, в которой транспортная среда для передачи любого вида информации обеспечивается использованием единых технологических принципов и установленных стандартов (по предоставлению ширины полосы пропускания, набора скоростей передачи цифровых потоков)
<b>Триб</b> Trib Тріб	Поток фиксированной скорости, поступающий из канала доступа

**Фрейм (кадр)**

Frame

Фрейм

Структура мультиплексного сигнала

**Цикл передачи**

Transmission Cycle

Цикл передавания

Интервал времени, в течение которого передается информация  $n$  каналов в линии связи**Цифровая иерархия**

Digital Hierarchy

Цифрова ієрархія

Уровни скоростей передачи, образуемые в процессе каскадного мультиплексирования

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Боккер П. ISDN. Цифровая сеть с интеграцией служб. Понятия, методы, системы / Пер. с нем. - М.: Радио и связь, 1991.
- 2 Ершов В.А., Кузнецов Н.А. Теоретические основы построения цифровой сети с интеграцией служб (ISDN). - М.: Институт проблем передачи информации РАН, 1995.
- 3 Furjanic I. Platform for Future Communication // Telcom Report International. - 1994. - V. 17. - N. 1.
- 4 Frantzen V., Hander R. A solid Foundation for Broadband ISDN // Telcom Report International. - 1991. - V. 14. - N. 1.
- 5 Ash I., Schan P. Communication Networks of the Future // Telcom Report International. - 1992. - V. 15. - N. 6.
- 6 Интеллектуальные коммуникационные технологии информационных сетей/ Захаров Г.П., Лазарев В.Г., Ле Моли Дж., Николаева Г.В., Пийль Е.И., Ховен А.В. // Тез. докл. Всемирного конгресса "Информационные коммуникации, сети, системы, технологии". - М., 1993.
- 7 Ким Л.Т. Синхронная цифровая иерархия // Электросвязь. - 1991. - N. 6.
- 8 Klein M.J. The Synchronous Digital Hierarchy - Principles, Variants and Application // Philips Junovation. - 1991. - N. 2.
- 9 Schaffer B. Technology: Setting the Pace for Modern Telecommunications // Siemens Review Telecommunication Special, 1991.
- 10 Lechuse J.L., Lanetlin A. Frame Relay - a Protocol for Fast Packet Switching: the COMPAC Implementation // Philips Telecommunication Review. - 1993. - V. 51. - N.1.
- 11 Landfall K. Packet-Switching Networks: What Protocol do User Want // Telecommunications. - 1993. - V. 27. - N. 4.
- 12 Eberhagen S., Fanger B., Wahl Sr. Marketing Strategy Optimizes Introduction of Services // Telcom Report International. - 1995. - V. 18. - N. 1.
- 13 Armbruster H., Humer-Hager T., Putz K.J. Application for ATM Network // Telcom Report International. - 1994. - V. 17. - N. 3.
- 14 Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. М. : ЭКО-ТРЕНДЗ,1998.
- 15 Назаров А.Н., Симонов М.В. АТМ технология высокоскоростных сетей. - М. : ЭКО-ТРЕНДЗ,1999.
- 16 Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH. - М. : ЭКО-ТРЕНДЗ,1998.
- 17 Семенов Н.Н., Шмалько А.В. Терминология сетей синхронной цифровой иерархии // Сети и системы. – 1996. - № 8. - С. 58-63.
- 18 Components of the HFC Network. Scientific Atlanta, 1998. <http://www.webproforum.com/sciatlanta/tp01.html>.
- 19 Кульгин М. Технологии корпоративных сетей. – СПб.: Питер”, 1999.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
Введение	3
1 Технологии синхронных режимов переноса	6
1.1 Синхронное временное мультиплексирование	6
1.2 Мультиплексирование речевых сигналов	7
1.3 Мультиплексирование потоков данных	10
1.4 Коммутация временных каналов SC (Switching Circuits)	11
1.5 Технологии высокоскоростной передачи цифровых потоков	13
1.5.1 Технология PDH	15
1.5.2 Технология SDH	16
2 Технологии асинхронных режимов переноса	18
2.1 Передача и коммутация пакетов. Технология X.25	18
2.2 Особенности формирования пакетов речевых сообщений	20
2.3 Коммутация пакетов PS (Packet Switching)	20
2.4 Передача и коммутация кадров. Технология Frame Relay	24
2.5 Технология ISDN	26
2.6 Технология ATM	28
2.7 Быстрая коммутация пакетов	31
3 Технологии полностью оптических сетей	36
3.1 Элементы полностью оптических сетей	37
3.2 Плотное волновое мультиплексирование DWDM	40
3.3 Классификация полностью оптических сетей	42
3.3.1 Простая многоволновая линия связи SMWL	43
3.3.2 AON с коммутацией каналов	44
3.3.3 AON с коммутацией пакетов	46
Тезаурус	51
Список литературы	59

Учебное пособие

**НИКИТЮК Леся Андреевна**

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ СЕТЕЙ

Под редакцией докт. техн. наук **Н.В. Захарченко**

Редактор И.В. Расщупкина

Компьютерная верстка Ж.А. Гардыман





