

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Северо-Кавказский филиал
ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Московский технический университет связи и информатики»

Кафедра
«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Методические указания к практическим занятиям

Анализ способов коммутации в ТК-сетях

**Дисциплины: Сети связи, Мультисервисные сети связи,
Моделирование**

Направление подготовки 11.03.02
«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»,
профиль Инфокоммуникационные системы и сети

Ростов-на-Дону
2022

Составитель: доцент кафедры «ИТСС», к.т.н., доцент Решетникова И.В.

Данное методическое пособие предназначено для обеспечения проведения лабораторных работ со студентами направления подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи, профиль Инфокоммуникационные системы и сети, квалификации «бакалавр».

Пособие обеспечивает получение навыков по основополагающим вопросам изучаемой дисциплины.

Рецензент: Зав. кафедрой ИТСС, к.т.н., доцент Юхнов В.И.

Методическое пособие рассмотрено и утверждено на заседании кафедры ИТСС 19.12. 2022 г. Протокол №5

СОДЕРЖАНИЕ

1 Цель занятий.....	4
2 Теоретические предпосылки.....	4
2.1 Коммутация каналов и коммутация пакетов.	
2.2 Коммутация каналов	
2.3 Коммутация сообщений	
2.4 Коммутация пакетов	
2.5 Постоянная и динамическая коммутация	
2.6 Дейтаграммная передача	
2.7 Виртуальные каналы в сетях с коммутацией пакетов	
3 Сравнение.....	10
4 Сравнение эффективности способов коммутации.....	14
5 Расчёт времени передачи пакета между узлами сети.....	15
6 Состав исходных данных.....	21
7 Задание на практическое занятие – анализ сети КК.....	21
8 Задание на практическое занятие – анализ сети КП....	22

Практические занятия

«Анализ способов коммутации в ТК-сетях»

1. Цель занятий. Изучение способов анализа функциональных характеристик телекоммуникационных сетей с различными способами коммутации и освоение методик расчёта параметров этих сетей. Проведение сравнительного анализа способов коммутации.

2. Теоретические предпосылки

2.1 Способы коммутации в телекоммуникационных сетях

В современных сетях в разной степени используются следующие способы коммутации:

- коммутация каналов;
- коммутация сообщений;
- коммутация пакетов.

Сети с коммутацией каналов имеют более богатую историю. Они создавались для первых телефонных сетей и долгое время безраздельно господствовали в мире, поскольку не требовали сложных электронных схем. Для их реализации достаточно было использовать обычные реле или более сложные, но всё же электромеханические устройства (например, декадно-шаговые или координатные искатели).

Сети с коммутацией сообщений и пакетов сравнительно молоды. Они появились в конце 60-х годов как результат экспериментов с первыми глобальными компьютерными сетями. Общим для этих способов является поэтапная передача информации от одного коммутационного узла к другому с обязательным хранением её в памяти узла. Различие между способами коммутации сообщений и пакетов, в основном, касаются форматов информационных порций и алгоритмов их обработки. При этом в интересах повышения эффективности работы сети алгоритмы обработки стремительно усложнялись и требовали для своей реализации всё более сложных микросхем (БИС, СБИС), а в дальнейшем и микропроцессорных технологий.

Каждый из этих способов имеет свои достоинства и недостатки, однако, будущее принадлежит способу коммутации пакетов, как более гибкому и универсальному и способному в перспективе стать единственным способом для передачи всех видов информации (так называемое All IP).

2.2 Коммутация каналов

Коммутация каналов (КК, *circuit switching*) — организация составного канала через несколько транзитных узлов из нескольких последовательно «соединённых» каналов на время передачи сообщения (*оперативная коммутация*) или на более длительный срок (*постоянная/долговременная коммутация* — время коммутации определяется административно).

При коммутации каналов коммутационная сеть образует между ко-

нечными узлами непрерывный составной физический канал из последовательно соединенных коммутаторами промежуточных канальных участков. Условием того, что несколько физических каналов при последовательном соединении образуют единый физический канал, является равенство скоростей передачи данных в каждом из составляющих физических каналов. Равенство скоростей следует из того, что коммутаторы такой сети не буферизуют передаваемые данные.

В сети с коммутацией каналов перед передачей данных всегда необходимо выполнить процедуру установления соединения, в процессе которой и создается составной канал. И только после этого можно начинать передавать данные.

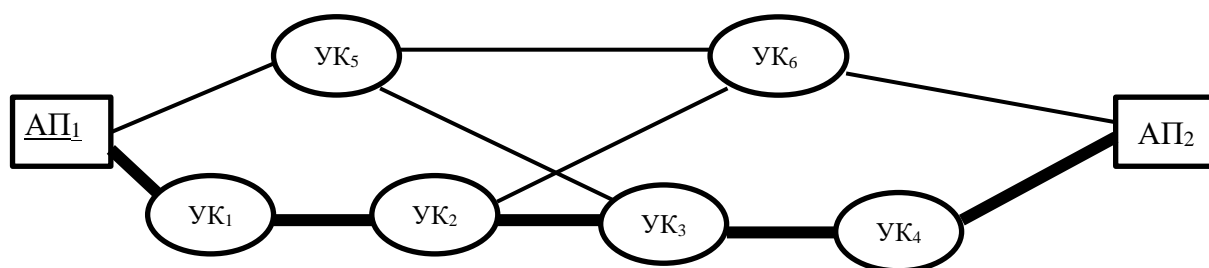


Рисунок 2.1 Схема 6-и узловой сети

Такая процедура для 6-и узловой сети (Рисунок 2.1) представлена на рисунке 2.2. Здесь составной канал устанавливается между двумя абонентскими пунктами.

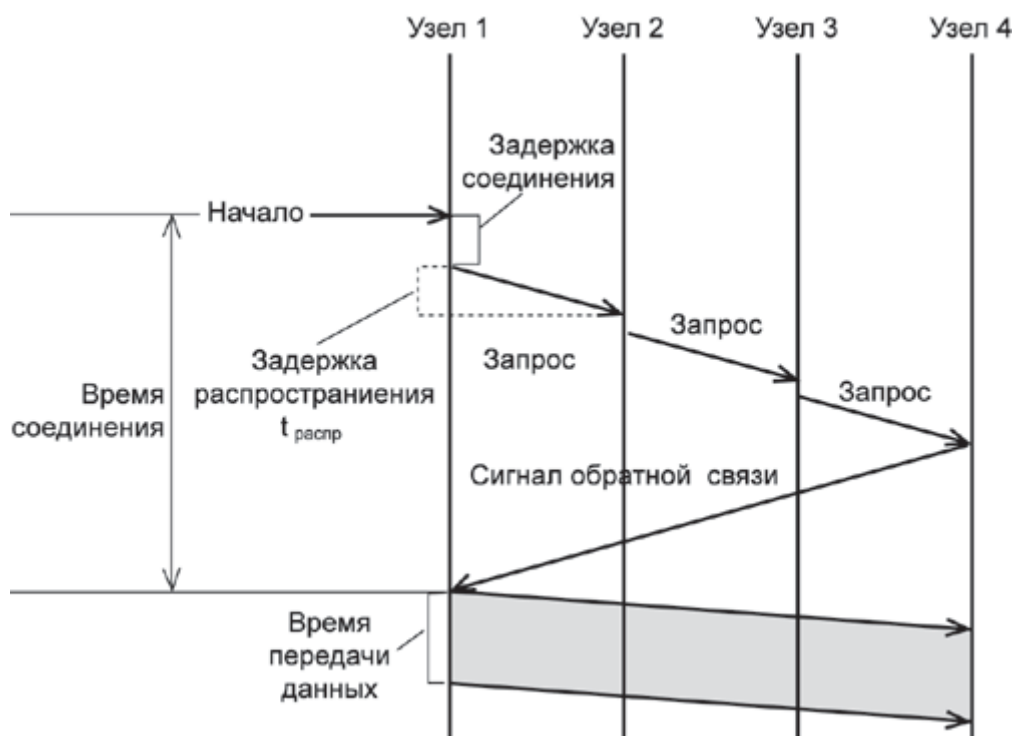


Рис. 2.2 Процедура установления составного канала

2.3 Коммутация сообщений

Коммутация сообщений (КС, *message switching*) — разбиение информации на сообщения, которые передаются последовательно к ближайшему транзитному узлу, который, приняв сообщение, запоминает его и передаёт далее сам таким же образом. Получается нечто вроде конвейера. Сообщение (это может быть, например, текстовый документ, файл с кодом программы, электронное письмо) имеет произвольную длину, которая определяется не технологическими соображениями, а содержанием информации, составляющей сообщение.

Техника коммутации сообщений появилась в компьютерных сетях раньше техники коммутации пакетов, но потом была вытеснена последней, как более эффективной по критерию пропускной способности сети и качеству сервиса QoS).

2.4 Коммутация пакетов

Коммутация пакетов (КП, *packet switching*) — разбиение сообщения на «пакеты», которые передаются отдельно. Разница между сообщением и пакетом: размер пакета ограничен технически, а размер сообщения — логически.

Эта техника коммутации была специально разработана для эффективной передачи компьютерного трафика. Первые шаги на пути создания компьютерных сетей на основе техники коммутации каналов показали, что этот вид коммутации не позволяет достичь высокой общей пропускной способности сети.

Типичные сетевые приложения в компьютерных сетях генерируют трафик очень неравномерно, с высоким уровнем пульсации скорости передачи данных. Например, при обращении к удаленному файловому серверу пользователь сначала просматривает содержимое каталога этого сервера, что порождает передачу небольшого объема данных. Затем он открывает требуемый файл в текстовом редакторе, и эта операция может создать достаточно интенсивный обмен данными, особенно если файл содержит объемные графические включения. После отображения нескольких страниц файла пользователь некоторое время работает с ними локально, что вообще не требует передачи данных по сети, а затем возвращает модифицированные копии страниц на сервер — и это снова порождает интенсивную передачу данных по сети.

Коэффициент пульсации трафика отдельного пользователя сети, равный отношению средней интенсивности обмена данными к максимально возможной, может достигать 1:50 или даже 1:100. Если для некоторой сессии организовать коммутацию канала между компьютером пользователя и сервером, то большую часть времени канал будет простаивать. В то же время коммутационные возможности сети будут закреплены за данной парой абонентов и будут недоступны другим пользователям сети.

При коммутации пакетов все передаваемые пользователем сообщения разбиваются в исходном узле на сравнительно небольшие части, называемые

пакетами. Напомним, что сообщением называется логически завершенная порция данных — запрос на передачу файла, ответ на этот запрос, содержащий весь файл и т.д. Сообщения могут иметь произвольную длину, от нескольких байт до многих мегабайт. Напротив, пакеты хотя и могут иметь переменную длину, но в узких пределах, например от 46 до 1500 байт как в технологии Ethernet. Каждый пакет снабжается заголовком, в котором указывается адресная информация, необходимая для доставки пакета в узел назначения, а также сведения, используемые пунктом назначения для сборки сообщения из поступивших к нему пакетов.

Сеть с КП замедляет процесс взаимодействия конкретной пары абонентов по сравнению с сетью с КК, но повышает пропускную способность сети в целом.

В сетях с КП сегодня применяется два режима передачи пакетов:

- дейтаграммная передача;
- виртуальные каналы.

2.4.1 Дейтаграммный режим в сетях с коммутацией пакетов

Дейтаграммный способ передачи данных основан на том, что все передаваемые пакеты обрабатываются независимо друг от друга, пакет за пакетом. Принадлежность пакета к определенному потоку между двумя конечными узлами и двумя приложениями, работающими на этих узлах, сетевым уровнем (уровень маршрутизаторов) никак не учитывается.

Выбор следующего узла — например, коммутатора Ethernet или маршрутизатора IP — происходит только на основании адреса узла назначения, содержащегося в заголовке пакета. Решение о том, какому узлу передать пришедший пакет, принимается на основе таблицы, содержащей набор адресов назначения и адресную информацию, однозначно определяющую следующий (транзитный или конечный) узел. Такие таблицы имеют разные названия — например, для сетей Ethernet они обычно называются таблицей продвижения (forwarding table), а для сетевых протоколов, таких как IP, — таблицами маршрутизации (routing table).

В таблице маршрутизации (ТМ) для одного и того же адреса назначения может содержаться несколько записей, указывающих, соответственно, на различные адреса следующего маршрутизатора. Такой подход используется для повышения производительности и надежности сети. В примере на рисунке 2.3 пакеты, поступающие в маршрутизатор R1 для узла назначения с адресом N2, A2, в целях баланса нагрузки распределяются по путям между следующими маршрутизаторами — R1-R2-R4 и R1-R3-R7-R4, что снижает нагрузку в соответствующих путях, а значит, уменьшает очереди и ускоряет доставку. Аналогичное разделение путей (так называемое расслоение горизонта) происходит и между узлами N3 и N2 (путь R5-R3-R7-R4 и путь R5-R7-R4).

Некоторая "размытость" путей следования пакетов с одним и тем же адресом назначения через сеть является прямым следствием принципа независимой обработки каждого пакета, присущего дейтаграммным протоколам.

Пакеты, следующие по одному и тому же адресу назначения, могут добираться до него разными путями и вследствие изменения состояния сети, например возрастания очереди сверх допустимых пределов или отказов в соответствующих путях.

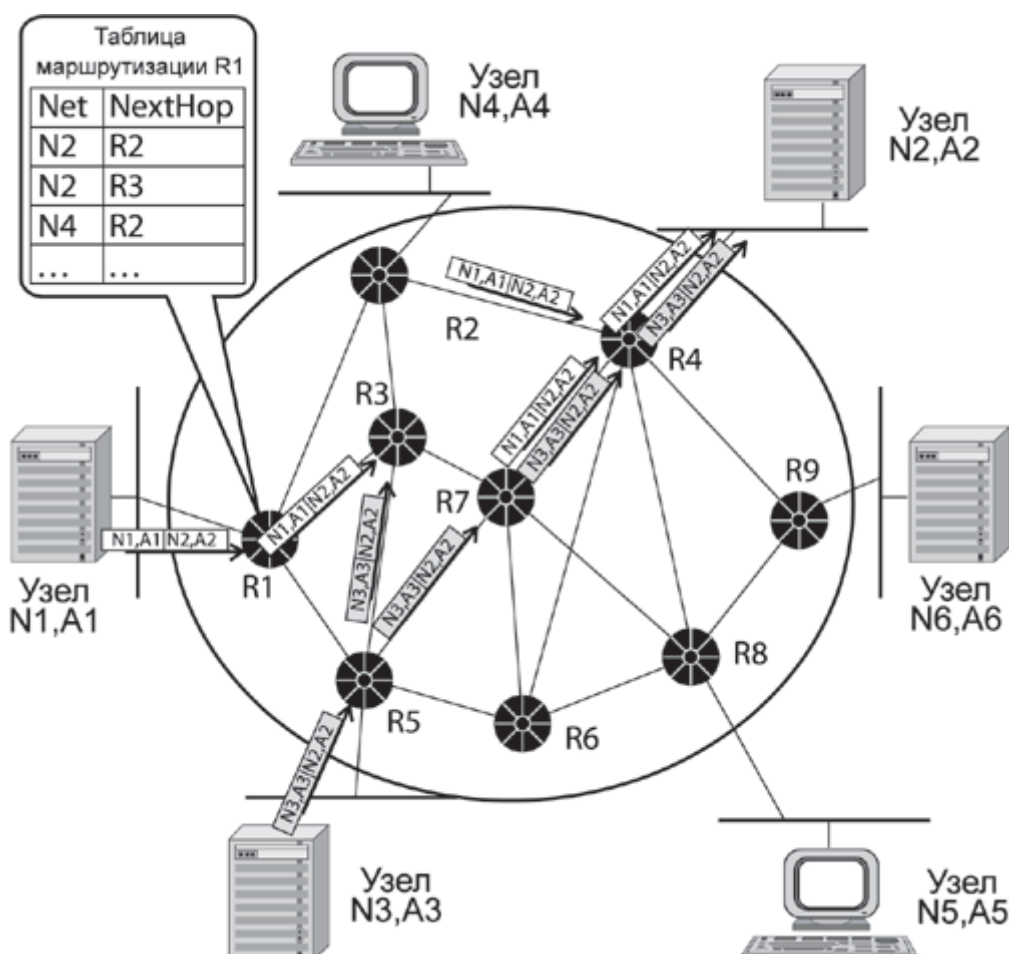


Рисунок 2.3 Дейтаграммный принцип передачи пакетов.

При дейтаграммном режиме пакеты могут теряться, повторяться или приходить в неправильном порядке. Зато распараллеливание путей в этом протоколе обеспечивает более быструю доставку информации.

2.4.2 Режим виртуальных каналов в сетях с коммутацией пакетов

Режим виртуальных каналов (virtual circuit или virtual channel) создает в сети устойчивые пути следования трафика через сеть с КП. Если целью является прокладка для всех пакетов потока единого пути через сеть, то необходимым (но не всегда единственным) признаком такого потока должно быть наличие для всех его пакетов общих точек входа и выхода из сети. Именно для передачи таких потоков в сети создаются виртуальные каналы. На рисунке 2.4 показан фрагмент сети, в которой проложены два виртуальных канала. Первый проходит от конечного узла с адресом N1, A1 до конечного узла с адресом N2, A2 через промежуточные маршрутизаторы сети R1, R3, R7 и R4. Второй обеспечивает продвижение данных от узла N3, A3 по пути R5 —

R7 — R4 — N2, A2. Между двумя конечными узлами может быть проложено несколько виртуальных каналов, как полностью совпадающих в отношении пути следования через транзитные узлы, так и отличающихся.

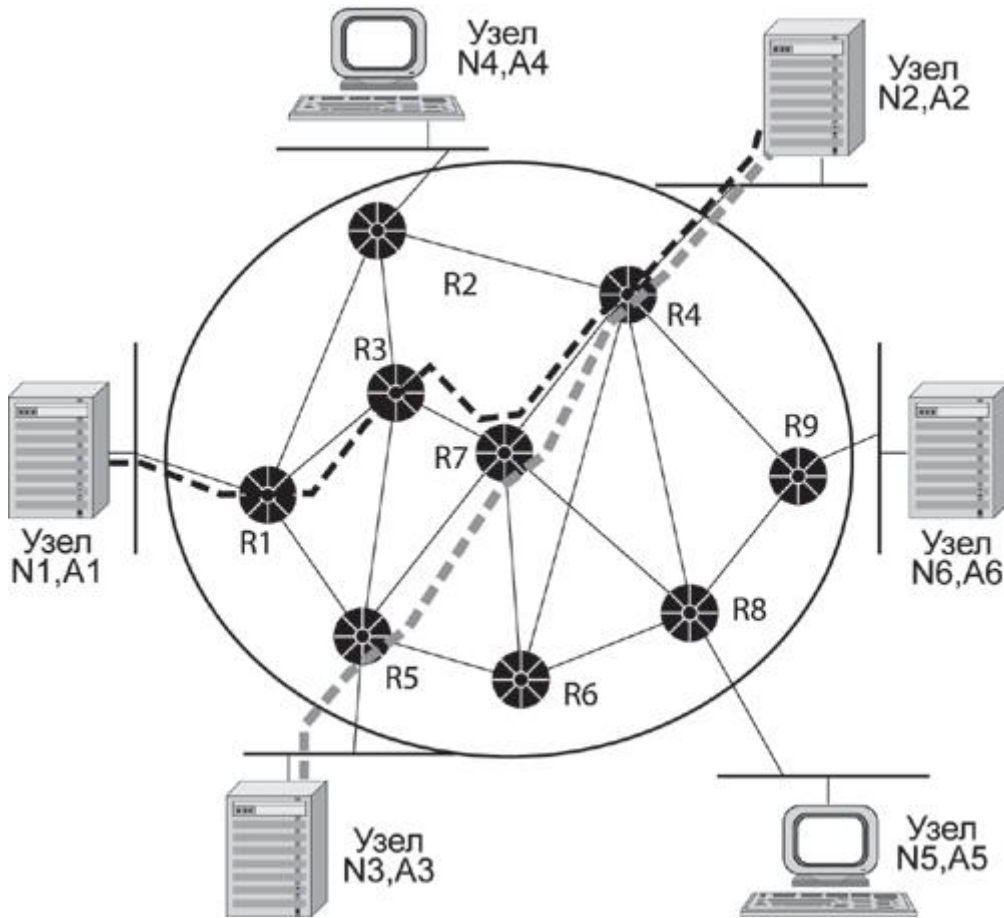


Рисунок 2.4 Принцип работы виртуального канала.

Сеть только обеспечивает возможность передачи трафика вдоль виртуального канала на уровне пакетов, а какие именно потоки будут передаваться по этим каналам, решают сами конечные узлы. Узел может использовать один и тот же виртуальный канал для передачи всех потоков, которые имеют общие с данным виртуальным каналом конечные точки, или же только части из них. Например, для потока реального времени можно использовать один виртуальный канал, а для трафика электронной почты — другой. В последнем случае разные виртуальные каналы будут предъявлять разные требования к качеству обслуживания, и удовлетворить их будет проще, чем в том случае, когда по одному виртуальному каналу передается трафик с разными требованиями к параметрам QoS.

Важной особенностью сетей с виртуальными каналами является использование локальных адресов пакетов при принятии решения о передаче. Вместо достаточно длинного адреса узла назначения (его длина должна позволять уникально идентифицировать все узлы и подсети в сети, например технология ATM оперирует адресами длиной в 20 байт) применяется локальная, то есть меняющаяся от узла к узлу, метка, которой помечаются все пакеты, перемещаемые по определенному виртуальному каналу. Эта метка в раз-

личных технологиях называется по-разному: в технологии X.25 — номер логического канала (Logical Channel number, LCN), в технологии frame relay — идентификатор соединения уровня канала данных (Data Link Connection Identifier, DLCI), в технологии ATM — идентификатор виртуального канала (Virtual Channel Identifier, VCI). Однако назначение ее везде одинаково — промежуточный узел, называемый в этих технологиях коммутатором, читает значение метки из заголовка пришедшего пакета и просматривает свою таблицу коммутации (ТК), в которой указывается, на какой выходной порт нужно передать пакет.

ТК содержит записи только о проходящих через данный коммутатор виртуальных каналах, а не обо всех имеющихся в сети узлах (или подсетях, если применяется иерархический способ адресации). Обычно в крупной сети количество проложенных через узел виртуальных каналов существенно меньше количества узлов и подсетей, поэтому по размерам ТК намного меньше ТМ, а, следовательно, просмотр занимает гораздо меньше времени и не требует от коммутатора большой вычислительной мощности.

Идентификатор виртуального канала (именно такое название метки будет использоваться далее) также намного короче адреса конечного узла (по той же причине), поэтому и избыточность заголовка пакета, который теперь не содержит длинного адреса существенно меньше.

3 Маршрутные таблицы

3.1 Таблицы маршрутизации (ТМ)

Маршрутизатор (*проф. жарг.* роутер)) — специализированный сетевой компьютер, имеющий как минимум один сетевой интерфейс и пересылающий пакеты данных между различными сегментами сети, связывающий разнородные сети различных архитектур, принимающий решения о пересылке на основании информации о топологии сети и определённых правил, заданных администратором. Маршрутизатор работает на более высоком «сетевом» уровне 3 сетевой модели OSI, нежели коммутатор (или сетевой мост) и концентратор (хаб), которые работают соответственно на уровне 2 и уровне 1 модели OSI.

Таблица маршрутизации — электронная таблица (файл) или база данных, хранящаяся на маршрутизаторе или сетевом компьютере, которая описывает соответствие между адресами назначения и интерфейсами, через которые следует отправить пакет данных до следующего маршрутизатора. ТМ является простейшей формой правил маршрутизации.

Таблица маршрутизации обычно содержит:

- адрес сети или узла назначения, либо указание, что маршрут является маршрутом по умолчанию;
- маску сети назначения (для IPv4-сетей маска в виде /32 или 255.255.255.255 позволяет указать единичный узел сети);
- шлюз, обозначающий адрес маршрутизатора в сети, на который необходимо отправить пакет, следующий до указанного адреса назначения;

- интерфейс (в зависимости от системы, это может быть порядковый номер, GUID или символическое имя устройства)
- метрику — числовой показатель, задающий предпочтительность маршрута. Чем меньше число, тем более предпочтителен маршрут (интуитивно представляется как расстояние).

В таблице может быть один, а в некоторых операционных системах и несколько шлюзов по умолчанию.

Пример ТМ для фрагмента сети, представленного на рисунке 3.1 показан в таблице 3.1. Обратите внимание на то, что сам маршрутизатор не имеет IP-адреса. IP-адреса присваиваются только интерфейсам (портам) маршрутизатора.

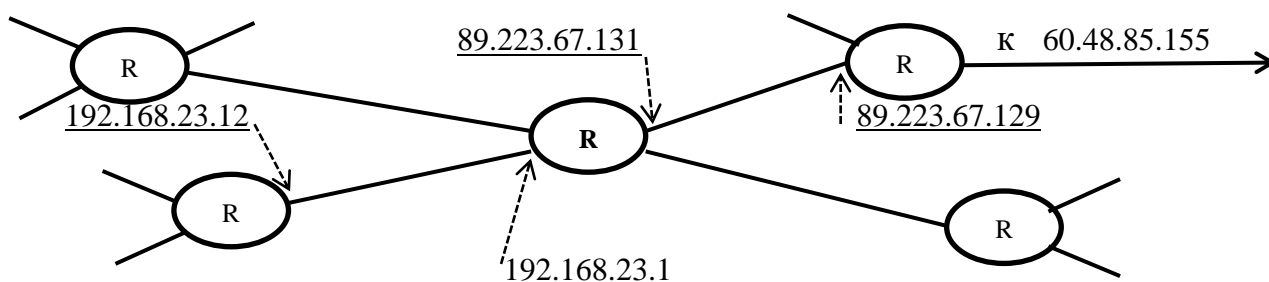


Рисунок 3.1 Схема интерфейсов для фрагмента сети

Таблица 3.1 Структура таблицы маршрутизации (ТМ)

Адрес сети или устройства	Маска сети	Адрес следующего маршрутизатора	Выходной интерфейс данного маршрутизатора	Метрика
0.0.0.0	0.0.0.0	89.223.67.129	89.223.67.131	20
60.48.85.155	255.255.255.255	89.223.67.129	89.223.67.131	20
60.48.172.103	255.255.255.255	89.223.67.129	89.223.67.131	20
60.48.203.116	255.255.255.255	89.223.67.129	89.223.67.131	20
127.0.0.0	255.0.0.0	127.0.0.1	127.0.0.1	1
164.77.239.153	255.255.255.255	89.223.67.129	89.223.67.131	20
192.168.23.0	255.255.255.0	192.168.23.1	192.168.23.1	20
192.168.23.1	255.255.255.255	127.0.0.1	127.0.0.1	20
224.0.0.0	240.0.0.0	89.223.67.131	89.223.67.131	20
224.0.0.0	240.0.0.0	192.168.23.1	192.168.23.1	20
Default Gateway:		89.223.67.129		

Таблица маршрутизации может составляться двумя способами:

- статическая маршрутизация — когда записи в таблице вводятся и изменяются вручную. Такой способ требует вмешательства администратора каждый раз, когда происходят изменения в топологии сети. С другой стороны, он является наиболее стабильным и требующим минимума аппаратных ресурсов маршрутизатора для обслуживания таблицы.

- динамическая маршрутизация — когда записи в таблице обновляются автоматически при помощи одного или нескольких протоколов маршрутизации — RIP, OSPF, IGRP, EIGRP, IS-IS, BGP, и др. Такой способ построения

таблицы позволяет автоматически держать таблицу маршрутизации в актуальном состоянии и вычислять оптимальные маршруты на основе сетевой информации о текущем состоянии сети. Однако динамическая маршрутизация оказывает дополнительную нагрузку на устройства и сеть, а высокая нестабильность сети может приводить к ситуациям, когда маршрутизаторы не успевают синхронизировать свои таблицы, что приводит к противоречивым сведениям о топологии сети в различных её частях и потере передаваемых данных.

3.2 Таблица коммутации (ТК) для виртуальных каналов

Для продвижения пакетов по виртуальному каналу узел коммутации должен иметь коммутационную таблицу, содержащую следующие сведения:

- входной интерфейс (порт) узла;
- входной идентификатор пакета;
- выходной интерфейс (порт) узла;
- выходной идентификатор пакета.

Работа узла коммутации (маршрутизатор или коммутатор) состоит в том, чтобы по паре входных данных (порт, идентификатор) найти соответствующую строку в ТК и по ней определить выходной порт и новый идентификатор пакета. Таким образом, все идентификаторы имеют только локальный характер, т.е. действуют только на участке сети между двумя узлами.

Строки ТК (Таблица 3.2) формируются при прохождении по сети сигнала пакета, организующего виртуальный канал, и освобождаются по окончании соединения.

Таблица 3.2 Структура таблицы коммутации (ТК)

Вх. интерфейс	Вх. идентифик.	Вых. интерфейс	Вых. идентифик.
192.168.23.1	917	89.223.67.131	403
192.168.23.12	701	192.168.23.1	210
.....

3.3 Принципы маршрутизации в сетях КП

Основной принцип маршрутизации в сети звучит достаточно просто – нужно выбирать кратчайший путь между двумя пунктами сети. Проблемы начинаются при желании определить объективную метрику длины пути, т.е. что интересует пользователя – километры, секунды, Мбит/с, надёжность, стоимость или всё сразу в разных весовых пропорциях. Рассмотрим эти вопросы подробнее.

Прежде всего – длина пути (например, в километрах) меньше всего интересна потребителю сетевых услуг. Ему всё равно: соединили его по спутниковому каналу (≈ 80 тыс. км) или по кабелю длиной в 5 км, разумеется, при прочих равных условиях. Вопрос о расстояниях между узлами очень важен для строителей, прокладывающих кабель или рассчитывающих дальность действия радио линии. После того как сеть построена главными пара-

метрами становятся время задержки сообщения в сети и пропускная способность сети.

На ранних этапах развития ТК-сетей чаще всего кратчайший маршрут определялся по минимуму числа переприёмов. Например, протокол RIP (Routing Information Protocol). В дальнейшем стали использовать протоколы, учитывающие каналные скорости. Так наиболее применимый протокол OSPF (Open Shortest Path First) поддерживает стандартную метрику: Fast Ethernet – 1; Ethernet – 10; E1 – 50 и т. д. Сопоставьте с пропускными способностями этих стандартов – 100, 10 и 2 Мбит/с. В соответствии с этой метрикой, если не учитывать задержки в узлах, то путь (рисунок 3.2) через 4 последовательных канала Ethernet (длина 40) предпочтительнее одного канала E1 (длина 50).

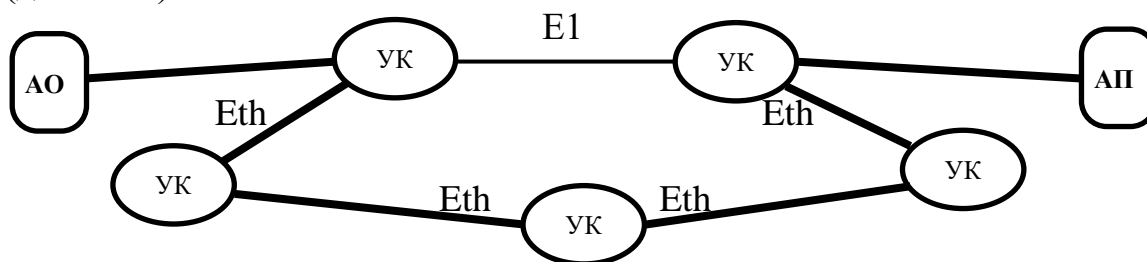


Рисунок 3.2 Схема выбора кратчайшего пути

Но этот хороший протокол имеет один существенный недостаток – он не учитывает степень загрузки каналов. Так в схеме (рисунок 3.2), если один из 4-х каналов Ethernet загружен на 90%, то его реальная пропускная способность составит 10% от 10 Мбит/с, т.е. всего 1 Мбит/с. В этом случае, при свободности канала E1 лучше использовать верхний (на схеме) путь.

Протокол IGRP (Interior Gateway Routing Protocol) использует обобщённую метрику, учитывающую как номинальные каналные скорости по маршруту, так и степень загрузки этих каналов. Ниже даётся описание алгоритма IGRP, несколько упрощённого в учебных целях.

Длина пути определяется как сумма двух слагаемых, одно из которых зависит от эффективной пропускной способности канала, а другое – от времени задержки пакета:

$$R = R_{\text{проп_сп}} + R_{\text{задержки}} = K_1 / Be + K_2 Dc, \quad (1)$$

где Dc – время задержки пакета в данном пути для незагруженной сети (мс);

Be – эффективная пропускная способность канала (скорость для самого медленного канала в пути). $Be = C (1 - Z)$;

C – номинальная каналная скорость;

Z – степень загруженности канала в данный момент.

Таким образом Be – это минимальная свободная пропускная способность канала в выбранном пути (Мбит/с).

K_1 и K_2 – константы, определяющие вес (значимость) пропускной способности и задержки для разных видов трафика. Примем для данной работы $K_1 = 10^4$, $K_2 = 1$.

Например, если пакет длиной в 500 байт передаётся по пути, состоящему из 3-х незагруженных (очереди отсутствуют) ветвей V_1, V_2, V_3 за 70 мс, то $R_{\text{задержки}} = 70$. Далее, пусть пропускные способности ветвей соответственно равны $C_1 = 10$ Мбит/с, $C_2 = 100$ Мбит/с, $C_3 = 155,52$ Мбит/с, а степени загрузки каналов в данный момент равны $Z_1 = 0,1$, $Z_2 = 0,6$ и $Z_3 = 0,8$. Тогда получим эффективные пропускные способности каналов равные $Be_1 = 9$ Мбит/с, $Be_2 = 40$ Мбит/с и $Be_3 = 31,1$ Мбит/с. Из этих трёх последовательно включённых ветвей наименьшей пропускной способностью обладает первая ветвь – 9 Мбит/с. Именно она будет определять пропускную способность всего пути. Поэтому для первого слагаемого получим значения $R_{\text{проп_сп}} = K_1 / Be_1 = 10^4/9 = 111$, а общая длина по формуле (1) составит 181.

Аналогичные расчёты нужно провести для всех путей, соединяющих две выбранные точки, и путь с наименьшим значением R будет кратчайшим маршрутом по обобщённому критерию: пропускная способность + время задержки.

4 Сравнение эффективности способов коммутации

При анализе эффективности ТК-сетей необходимо рассматривать две группы характеристик:

- общесетевые – пропускная способность, надёжность, живучесть, капитальные (CAPEX) и эксплуатационные (OPEX) затраты, время реакции на изменения в структуре и параметрах сети и другие;
- пользовательские (индивидуальные) – время задержки сообщения в сети, вероятность потери пакетов, вероятность искажения пакетов, время установления соединения и другие.

Способ коммутации сообщений (КС) можно исключить из детального анализа, так как в процедурном отношении он очень похож на коммутацию пакетов (поэтапная передача информации от узла к узлу с записью её в память узла), но многократно уступает ей по главному параметру – времени задержки в сети. Причём это время тем больше, чем больше промежуточных узлов и чем длиннее сообщение, так как записывать сообщение в память узлов приходится в каждом узле. В связи с этим применение способа КС в современных ТК-сетях ограничивается передачей коротких сообщений (64-100 байт) таких как сигнальная информация в протоколах всех уровней, телеграммы и т.п.

Способ коммутации каналов (КК) позволяет всю доступную полосу канала разделить между активными пользователями, предоставив каждому из них в монопольное владение необходимую пропускную способность на всё время соединения. Способ КК был господствующим способом более ста лет не только потому, что для КС и КП не было соответствующей технологической поддержки, но и потому, что он идеально подходил для телефонных разговоров, т.е. для потоковых видов трафика. Телефонные сети строились на базе трактов, содержащих сотни, тысячи и даже десятки тысяч узкополосных каналов. Но если по такому каналу (например, ОЦК с полосой 64 кбит/с) передавать сообщение объёмом в 4 Мбайта, то потребуется более 8-ми минут.

В отличие от потоковых видов трафика (аудио, видео), трафик данных имеет всплесковый характер, когда передача или приём больших массивов данных чередуются минутами их обработки и анализа. В этом случае целесообразна такая технология, при которой вся доступная полоса канала предоставляется на короткое время одному пакету (сообщению), потом другому и т.д. Можно представить себе шоссе, разделённое на отдельные велосипедные дорожки (КК), или то же шоссе по которому мчатся фуры. То же самое сообщение в 4 Мбайта по каналу в 10 Гбит/с будет передано за 3,2 мс.

С другой стороны, при КК у абонента, получившего канал, не будет никаких непредвиденных задержек (повреждения и прочее здесь не рассматриваются) и передача сообщения будет доведена до конца. При КС или КП у узла в нужном направлении имеется только один (но широкополосный) канал, и если он занят передачей другого пакета, то образуется очередь, размеры которой зависят от потоковой ситуации. Этот факт является главной проблемой для сетей коммутации пакетов, в том числе и для сети Internet, так как приводит к непредсказуемым задержкам в сети.

Сравнение коммутации каналов и коммутации пакетов	
Коммутация каналов	Коммутация пакетов
Гарантированная пропускная способность (полоса) для взаимодействующих абонентов	Пропускная способность сети для абонентов неизвестна, задержки передачи носят случайный характер
Сеть может отказать абоненту в установлении соединения	Сеть всегда готова принять данные от абонента
Трафик реального времени передается без задержек	Ресурсы сети используются эффективно при передаче пульсирующего трафика
Адрес используется только на этапе установления соединения	Адрес передается с каждым пакетом

5 Расчёт времени передачи пакетов и сообщений в сети.

5.1 Передача пакета между узлами сети.

Рассмотрим типичную схему звена передачи данных, состоящего из двух узлов (коммутаторы или маршрутизаторы) и соединяющего их канала передачи данных (КПД). Рисунок 5.1.

Длина пакета составляет L байт, скорость канала C бит/с, расстояние между узлами – R км.

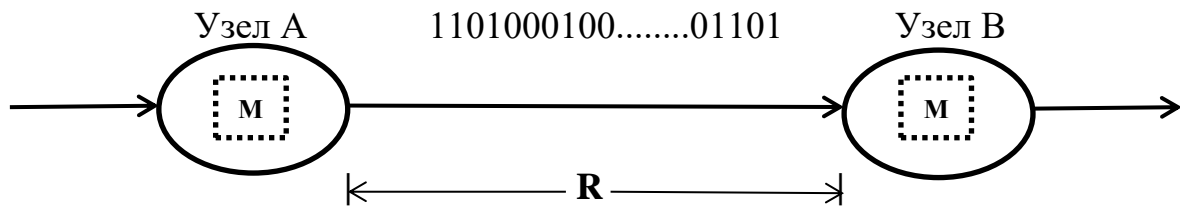


Рисунок 5.1 Схема звена передачи данных

Для определённости рассчитаем время между моментом, когда пакет записался в память узла А (на рисунке М), до момента его полной записи в память узла В. Упрощённо это время можно принять состоящим из 4-х частей:

$$T_{\text{прд}} = t_{\text{выбора}} + t_{\text{ожидания}} + t_{\text{перемещения}} + t_{\text{распростр}} + t_{\text{канала}}$$

где $t_{\text{выбора}}$ — время выбора направления дальнейшей передачи поступившего пакета. Это время, в первую очередь, зависит от производительности процессора узла коммутации и от объёма адресной таблицы. Ориентируясь на технические характеристики современных коммутаторов (маршрутизаторов), обрабатывающих десятки и даже сотни миллионов пакетов в секунду (возможно с распараллеливанием процедуры вычислений по нескольким микропроцессорам), примем в дальнейших расчётах это время равным $t_{\text{выбора}} = 2 \text{ мкс}$.

$t_{\text{ожидания}}$ — время ожидания до освобождения канала от передачи ранее поступивших пакетов. Это время зависит от очень большого числа параметров (поток в сети, тяготения между абонентами, конфигурация сети, приоритеты и др.), рассматриваемых в дисциплине Теория телетрафика. Проведём наш расчёт в предположении, что очередь отсутствует и пакет после определения направления передачи немедленно поступает в канал, т.е. $t_{\text{ожидания}} = 0$.

$t_{\text{перемещения}}$ — как правило память узла не локализуется физически в одном месте. Для распараллеливания процесса обработки пакетов порты коммутаторов и маршрутизаторов строятся по микропроцессорной схеме, включающую память приёма и выдачи пакетов. Это время зависит от требуемого быстродействия узла и, как правило, невелико (от нескольких микросекунд до нескольких десятков микросекунд). В дальнейших расчётах примем это время равным $t_{\text{перемещения}} = 10 \text{ мкс}$.

$t_{\text{распростр}}$ — это время распространения сигнала (электромагнитной волны) по физической среде КПД. Оно зависит от расстояния R между узлами и от скорости распространения ЭМВ в среде, которую для кабельных линий часто принимают равной $v = 200 \text{ тыс. км/с}$ (Для радио линий это известная скорость света — 300 тыс. км/с). Тогда время распространения определится как $t_{\text{распростр}} = R/v$.

$t_{\text{канала}}$ — это время прохождения пакета через канал, конкретнее — через любую его точку, например, через точку входа в порт узла В. Иногда это время называют временем буферизации пакета с битовой скоростью протокола. Оно зависит от длины пакета и канальной скорости и равно

$t_{\text{канала}} = 8 L/C$, где L – длина пакета в байтах, а C – канальная скорость в битах. Например, время прохождения пакета длиной $L = 500$ байт через точку входа в узел В по каналу Fast Ethernet (100 Мбит/с) составляет

$$t_{\text{канала}} = 8 \cdot 500 / 100 \cdot 10^{-6} = 40 \text{ мкс.}$$

5.2 Передача сообщения в сети с коммутацией каналов

Процесс передачи сообщения в сети КК состоит из трёх фаз:

- установление соединения;
- передача информации;
- разъединение.

Рассмотрим сеть с КК, представленную на рисунке 5.1. Терминал АО подключён к узлу У1 (маршрутизатор, коммутатор, мультиплексор) каналом доступа Е1 (2 Мбит/с). Аналогичным каналом доступа подключён к узлу У5 терминал АП. Межузловые соединительные линии содержат пучки каналов Е1, число которых рассчитывается в зависимости от трафика и требований по качеству обслуживания методами теории телетрафика.

Предположим, что в момент вызова от АО к АП единственным путём между узлами У1 и У5, содержащим свободные каналы Е1, является путь, показанный на схеме жирными линиями.

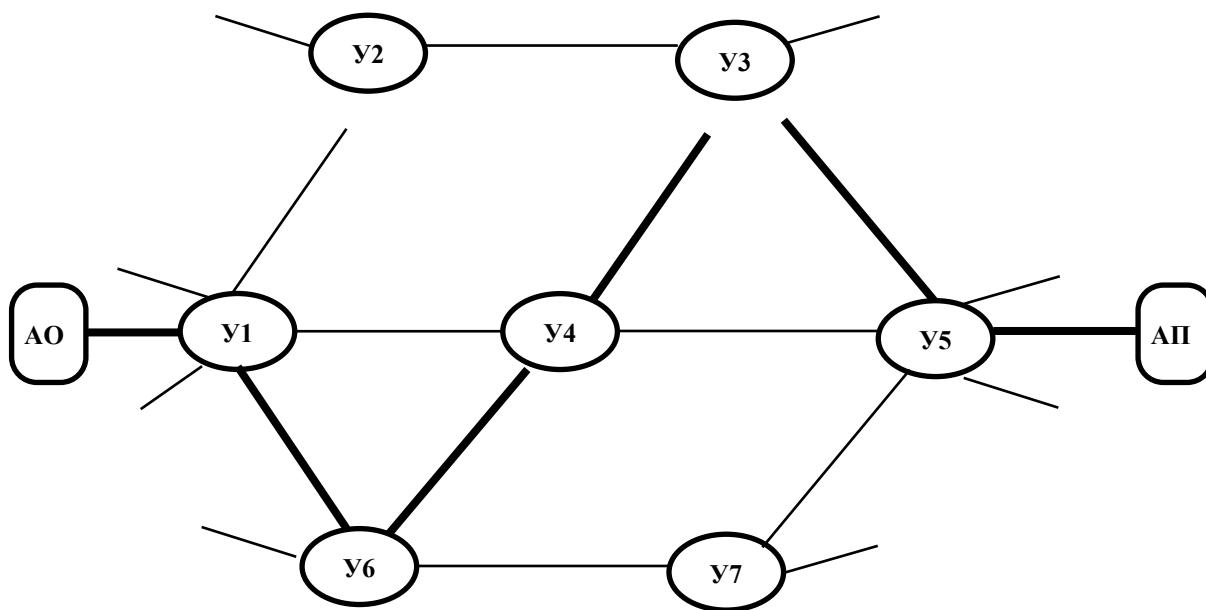


Рисунок 5.1 Схема сети с коммутацией каналов

Установление соединения производится с помощью передачи между узлами коммутации по выбранному маршруту сигнального сообщения (объём ≈ 100 байт), содержащего адрес получателя и другие атрибуты, необходимые для используемого протокола. Для оценки этого времени нужно определить путь, проходимый сигнальным сообщением (СС) от абонента отправителя (АО) до абонента получателя (АП) через узлы коммутации (УК) сети в обе стороны. В нашем случае этот путь пройдёт по цепочке звеньев АО-У1-У6-У4-У3-У5-АП-У5-У3-У4-У6-У1-АО, а время установления соединения

($T_{уст}$) определится как сумма времён передачи ($T_{прд}$) в каждом звене, рассчитываемых по п. 5.1.

После установления соединения начинается собственно передача сообщения, время которой как $T_{прд_кк} = t_{распротр} + t_{канала}$. Здесь: $t_{распротр}$ – время распространения ЭМВ по всему пути от АО до АП, а $t_{канала}$ – время передачи сообщения по каналу, определяемое как $t_{канала} = 8L_{сообщ} / C$, где C – канальная скорость (в нашем случае 2 Мит/с). Напомним, что необходимым условием работы сети с КК является равенство канальных скоростей в каждом звене пути.

Так как фаза разъединения не влияет на время доставки сообщения до АП, то можно определить это время как $T_{дост.кк} = T_{уст} + t_{канала}$. Время распространения определяется в соответствии с матрицей межузловых расстояний по формулам п.5.1.

Сеть с КК с точки зрения теории телетрафика функционирует как система с потерями: если для установления соединения в момент вызова отсутствуют маршруты из ветвей со свободными каналами, то вызов будет потерян. **Вероятность потери вызова – главный показатель качества работы сети с КК.**

5.3 Передача сообщения в сети с коммутацией пакетов

5.3.1 Режим виртуального канала

Рассмотрим сеть с КП, представленную на рисунке 5.2. На схеме возле каждого канала указана его пропускная способность. Процедура организации виртуального канала аналогична сети с КК. Таким же образом, но в соответствии с протоколом ТСП, выдаётся служебное сообщение (пакет) с адресом получателя, которое проходит по сети в соответствии с таблицей маршрутизации (т.е. по кратчайшему в данный момент пути). На рисунке 5.2 ветви выбранного маршрута показаны жирными линиями. При обратном прохождении сигнального пакета формируются строки в таблицах коммутации всех узлов выбранного пути (см. п. 3.2).

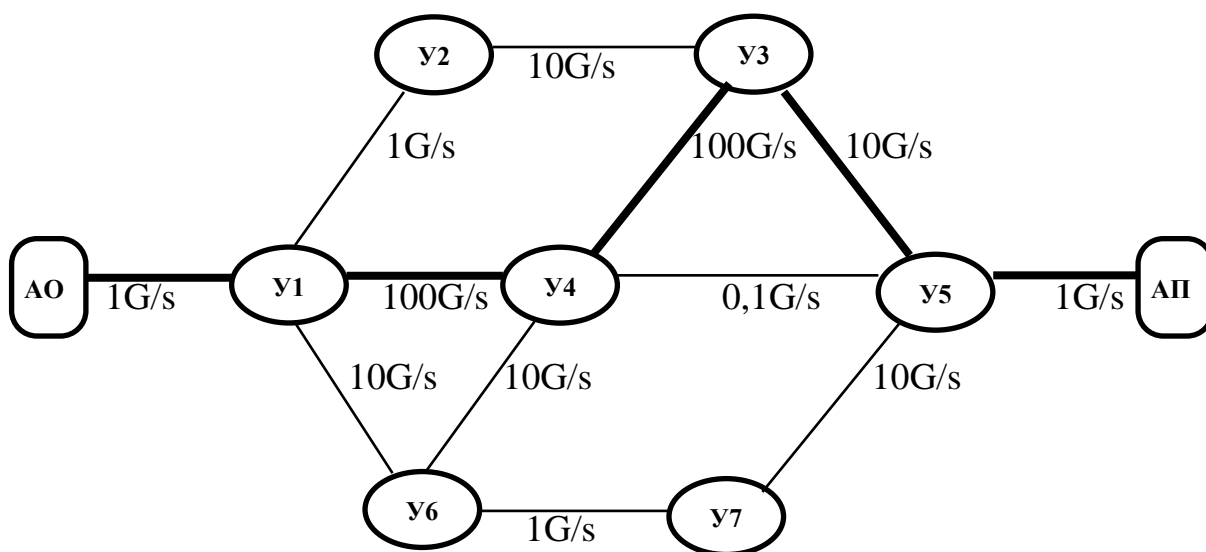


Рисунок 5.2 Схема реализации режима виртуального канала

После установления соединения начинается последовательная передача сообщения в виде цепочки пакетов, содержащих данные и заголовок с идентификатором. Время передачи сообщения будет определяться самым узким местом маршрута. В рассматриваемой схеме это каналы доступа с полосой 1 Гбит/с. Но это справедливо только для незагруженной сети. В реальной ситуации вполне возможно, что в направлении У3-У5 почти вся полоса зарезервирована и свободным осталось только 0,3 Гбит/с. Тогда маршрут У1-У6-У7-У5 может оказаться более предпочтительным.

Сеть с КП с точки зрения теории телетрафика функционирует как система с ожиданием: если выбранный для передачи пакета канал занят, то пакет помещается в буфер ожидания данного узла и будет передан после некоторой задержки. **Длительность задержки в сети – главный показатель качества работы сети с КП.**

5.3.2 Дейтаграммный режим

В дейтаграммном режиме КП передача сообщения начинается сразу после передачи пакетов в АО с транспортного уровня на сетевой без установления соединения между АО и АП. При этом пакеты в зависимости от конфигурации сети и потоковой обстановки в данный момент могут передаваться между входным УК и выходным УК по одному или нескольким маршрутам. Сборка сообщения производится на транспортном уровне АП в соответствии с протоколом UDP и продолжительность этой сборки определится временем прихода самого запоздалого пакета (не обязательно последнего пакета в сообщении).

Рассмотрим этот процесс на примере сети рисунка 5.3. При этом будем считать, что ограничения на количество вбрасываемых в сеть пакетов с помощью механизма скользящего окна не накладываются.

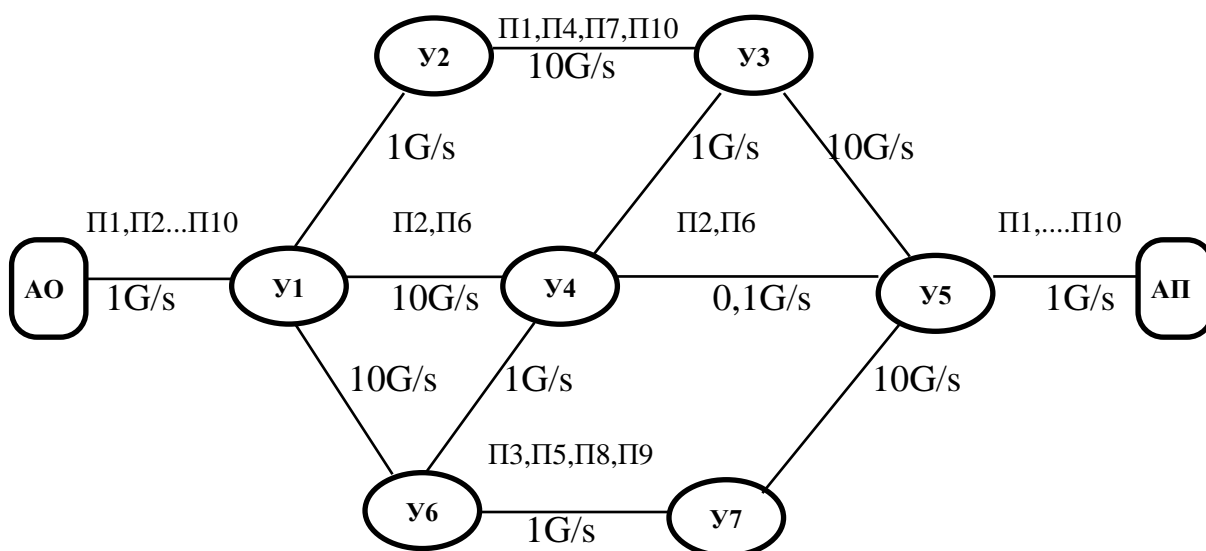


Рисунок 5.3 Схема прохождения пакетов в дейтаграммном режиме

Пусть АО должен передать в АП сообщение, состоящее из 10-и пакетов – П1...П10. Для упрощения анализа рассмотрим случай, когда пакеты по сети проходят по трём независимым маршрутам:

- АО – У1 – У2 – У3 – У5 – АП;
- АО – У1 – У4 – У5 – АП;
- АО – У1 – У6 – У7 – У5 – АП.

Пропускные способности каналов указаны в Гбит/с.

В данном случае проведение точного расчёта времени доведения сообщения является весьма трудоёмкой задачей. Поэтому проведём небольшой качественный анализ.

Присвоим трём маршрутам на рисунке 5.3 нумерацию сверху вниз – М1, М2, М3. По каким-то причинам (пропускные способности, очереди и др.) в М1 было направлено 4 пакета, в М2 – 2 и в М3 – 4. Рассматривая схему, можно заметить, что пропускная способность пути М2 на порядок ниже, чем у путей М1 и М3. Это объясняется наличием в М2 самого медленного канала в сети – 100 Мбит/с. Поэтому моментом начала сборки сообщения в АП можно считать приход в АП пакета П6, а время передачи всего сообщения нужно исчислять с момента ввода в канал доступа АО пакета П1. Тогда общее время передачи сообщения определится как

$$T_{\text{прд_сообщ}} = t_{6_АО-У1} + t_{П6_У1-У4} + t_{П6_У4-У5} + t_{П6_У5-АП}$$

где: $t_{6_АО-У1}$ – время передачи 6-и пакетов по каналу доступа;

$t_{П6_У1-У4}$, $t_{П6_У4-У5}$, $t_{П6_У5-АП}$ – времена передачи пакета П6 по соответствующим каналам. Все времена рассчитываются по методике п. 5.1.

Такие сложности возникают даже без учёта возможности пересечения маршрутов. Например, пакет П6, застав канал У4-У5 занятым пакетом П2, может обогнать его транзитом У4-У3-У5, и тогда начало сборки будет определяться по моменту прихода в АП пакета П2. Т.е. частные случаи, разбираться в которых даже имея точную маршрутную процедуру и общую схему потоков не имеет смысла.

Для изучения зависимости функциональных характеристик ТК-сети от её параметров и конфигурации можно использовать только методы имитационного моделирования. Аналитические методы, в том числе и теория телетрафика, для столь многомерных задач не применимы.

5.4 Тенденции применения способов коммутации

В настоящее время определилась чёткая тенденция к конвергенции всех видов информационного обмена в ТК-сетях на базе коммутации пакетов. Лозунг All IP означает «Всё через IP». Главное преимущество КП перед КК – более высокий коэффициент использования канальной емкости, что является следствием применения систем с ожиданием, которые всегда эффективнее систем с потерями. А лучшее использование канальной ёмкости ведёт к большей пропускной способности сети в целом.

Способ КК пока ещё господствует в телефонных сетях общего пользования, но активно внедряется IP-телефония. Телефонные операторы ждут, пока имеющееся оборудование выработает свой ресурс, чтобы перейти к технологии IP Multimedia Subsystem (IMS). В США 2018 год обозначен как срок ликвидации всех систем с КК.

Но не надо забывать и о главном недостатке способа КП - непредсказуемые задержки в процессе передачи. Дело в том, что в больших системах типа Internet с миллионами одновременно передаваемых сообщений невозможно предсказать, где и какие возникнут очереди.

По применимости протоколов UDP (дейтаграммный режим) и TCP (режим виртуального канала), ожидается, что будут использованы оба. В настоящее время по статистике:

- TCP используется в 90% случаев. В основном это клиент-серверные обмены, где виртуальный канал гарантирует более надёжное доведение;
- UDP используется в 9% случаев. В основном это потоковые виды трафика (аудио, видео), где более важным является быстрота доставки информации за счёт распараллеливания потоков, пусть даже и с некоторой потерей пакетов;
- сетевая служебная информация – 1%.

6 Состав исходных данных

Для проведения практических занятий необходимо определить или выбрать следующие исходные данные:

- конфигурация анализируемой сети;
- матрица расстояний;
- матрица канальных скоростей;
- матрица загрузки каналов;
- скорости распространения ЭМВ в кабелях: в каналах доступа – $1,8 \cdot 10^5$ км/сек, в магистральных каналах – $2 \cdot 10^5$ км/сек;
- вероятность потери пакета в сети – 10^{-3} ;
- параметры передаваемого сообщения – фотография объёмом в 4 Мбайта;

7 Задание на практическое занятие – анализ сети КК

7.1 Принять конфигурацию сети, представленную на рисунке 5.1.

7.2 Составить матрицу расстояний, приняв:

- для каналов доступа – 100 м;
- для межузловых линий – расстояние выбрать произвольно в пределах от 1 до 3 тыс. км.

7.3 Выбрать произвольно значение канальной скорости сети из линеек PDH, SDH или Ethernet.

7.4 Размер сигнального пакета принять равным $L_{\text{сигн}} = 100$ байт.

7.5 Размер передаваемого сообщения взять по п. 6.

7.6 Составить таблицу выбора пути для каждого УК для указанного на схеме АП. В качестве адреса АП выбрать произвольный телефонный

номер. Направления выдачи перенумеровать произвольно.

7.7 Выбрать кратчайший (по времени) путь от АО до АП.

7.8 Определить время установления соединения

7.9 Определить время передачи данных

7.10 Определить время доведения сообщения по сети

7.11 Определить время доставки сообщения между абонентами.

7.12 Повторить пп. 7.1.7 -.7.1.11 для случая отсутствия каналов в кратчайшем пути.

Таблица 7.1. Таблица выбора пути узла У4

Адрес АП	Номер направления выдачи	Длина пути по времени, мс
863-211- 11-12	3	29

8 Задание на практическое занятие – анализ сети КП

8.1 Определение исходных данных

8.1.1 Принять конфигурацию сети, представленную на рисунке 5.2.

8.1.2 Составить матрицу расстояний, приняв:

- для каналов доступа – 100 м;

- для межузловых линий – расстояние выбрать произвольно в пределах от 1 до 3 тыс. км.

8.1.3 Составить матрицу канальных скоростей, выбирая произвольно стандартные значения из линеек PDH, SDH и Ethernet.

8.1.4 Составить матрицу степени загрузки каналов, выбирая произвольные значения в пределах от 0,2 до 0,8.

8.1.5 Размер сигнального пакета принять равным $L_{\text{сигн}} = 100$ байт.

8.1.6 Размер передаваемого сообщения взять по п. 6.

8.1.7 Составить таблицу маршрутизации по п. 3.1 для нескольких получателей.

8.1.8 Определить общее число пакетов в сообщении в предположении, что длина информационной части пакета составляет 500 байтов.

8.1.9 Составить таблицу коммутации по п. 3.2.

8.2 Передача сообщения способом КП (TCP)

8.2.1 Принять длину заголовка информационного пакета равной 2-м байтам. Такой заголовок используется, например, в технологии Frame Relay.

8.2.2 Рассчитать время организации виртуального канала

8.2.3 Рассчитать время доставки одного пакета данных между АП.

8.2.4 Рассчитать время доставки всего сообщения между АП.

Примечание. Время передачи сообщения по виртуальному каналу, в основном, определяется каналом с наименьшей пропускной способностью.

8.3 Передача сообщения способом КП (UDP)

Рассмотреть процесс передачи сообщения из 20-и пакетов по сети (рисунок 5.3), обозначив маршрут движения каждого пакета. Использовать максимально возможное число маршрутов. Провести ориентировочную оценку времени доведения сообщения. Длину заголовка определить по Приложению В

Приложение А

Статистика по длинам IP-пакетов в банковском секторе

Длины пакетов, байты	Доля, %
0 – 63	25
64 – 127	28
128- 255	15
256 – 511	7
512 – 1023	2
1024 - 1517	23

Приложение В

Статистика по видам трафика

Виды трафика	Доля, %
Компьютеры и Internet	33
Развлечения	18
Новости и СМИ	9
Бизнес	7
Музыка	5
Остальное (Авто, дом, отдых, спорт, наука, образование, связь, транспорт, путешествия, культура, искусство, литература, здоровье, общество)	28

Приложение С

Структура информационного пакета (кадра)

