

Александр Александрович Олейников

Компьютерные и телекоммуникационные сети

Лекция 1.2.4. Коммутация каналов, коммутация пакетов. Постоянная и динамическая коммутация.

Астрахань, 2018

Сравнение способов коммутации

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

Постоянная и динамическая коммутация

Как сети с коммутацией пакетов, так и сети с коммутацией каналов можно разделить на два класса:

- ▶ сети с динамической коммутацией ;
- ▶ сети с постоянной коммутацией.

В сетях с динамической коммутацией:

- ▶ разрешается устанавливать соединение по инициативе пользователя сети;
- ▶ коммутация выполняется только на время сеанса связи, а затем (по инициативе одного из пользователей) разрывается;
- ▶ в общем случае пользователь сети может соединиться с любым другим пользователем сети;
- ▶ время соединения между парой пользователей при динамической коммутации составляет от нескольких секунд до нескольких часов и завершается после выполнения определенной работы – передачи файла, просмотра страницы текста или изображения и т.п.

Примерами сетей, поддерживающих режим динамической коммутации, являются телефонные сети общего пользования, локальные сети, сети TCP/IP.

Сеть, работающая в режиме постоянной коммутации:

- ▶ разрешает паре пользователей заказать соединение на длительный период времени;
- ▶ соединение устанавливается не пользователями, а персоналом, обслуживающим сеть;
- ▶ период, на который устанавливается постоянная коммутация, составляет обычно несколько месяцев;
- ▶ режим постоянной (permanent) коммутации в сетях с коммутацией каналов часто называется сервисом выделенных (dedicated) или арендуемых (leased) каналов;
- ▶ в том случае, когда постоянное соединение через сеть коммутаторов устанавливается с помощью автоматических процедур, инициированных обслуживающим персоналом, его часто называют полупостоянным (semi-permanent) соединением, в отличие от режима ручного конфигурирования каждого коммутатора.

- ▶ Наиболее популярными сетями, работающими в режиме постоянной коммутации, сегодня являются сети технологии SDH, на основе которых строятся выделенные каналы связи с пропускной способностью в несколько гигабит в секунду.
- ▶ Некоторые типы сетей поддерживают оба режима работы. Например, сети X.25 и ATM могут предоставлять пользователю возможность динамически связаться с любым другим пользователем сети и в то же время отправлять данные по постоянному соединению определенному абоненту.

Пропускная способность сетей с коммутацией пакетов

- ▶ Одним из отличий метода коммутации пакетов от метода коммутации каналов является неопределенность пропускной способности соединения между двумя абонентами. В случае коммутации каналов после образования составного канала ; пропускная способность сети при передаче данных между конечными узлами известна — это пропускная способность - канала.

Данные после задержки, связанной с установлением канала, начинают передаваться на максимальной для канала скорости ([рис. 1](#)). Время передачи сообщения в сети с коммутацией каналов $T_{к.к.}$ равно сумме задержки распространения сигнала по линии связи и задержки передачи сообщения. Задержка распространения сигнала зависит от скорости распространения электромагнитных волн в конкретной физической среде, которая колеблется от 0,6 до 0,9 скорости света в вакууме. Время передачи сообщения равно V/C , где V — объем сообщения в битах, а C — пропускная способность - канала в битах в секунду.

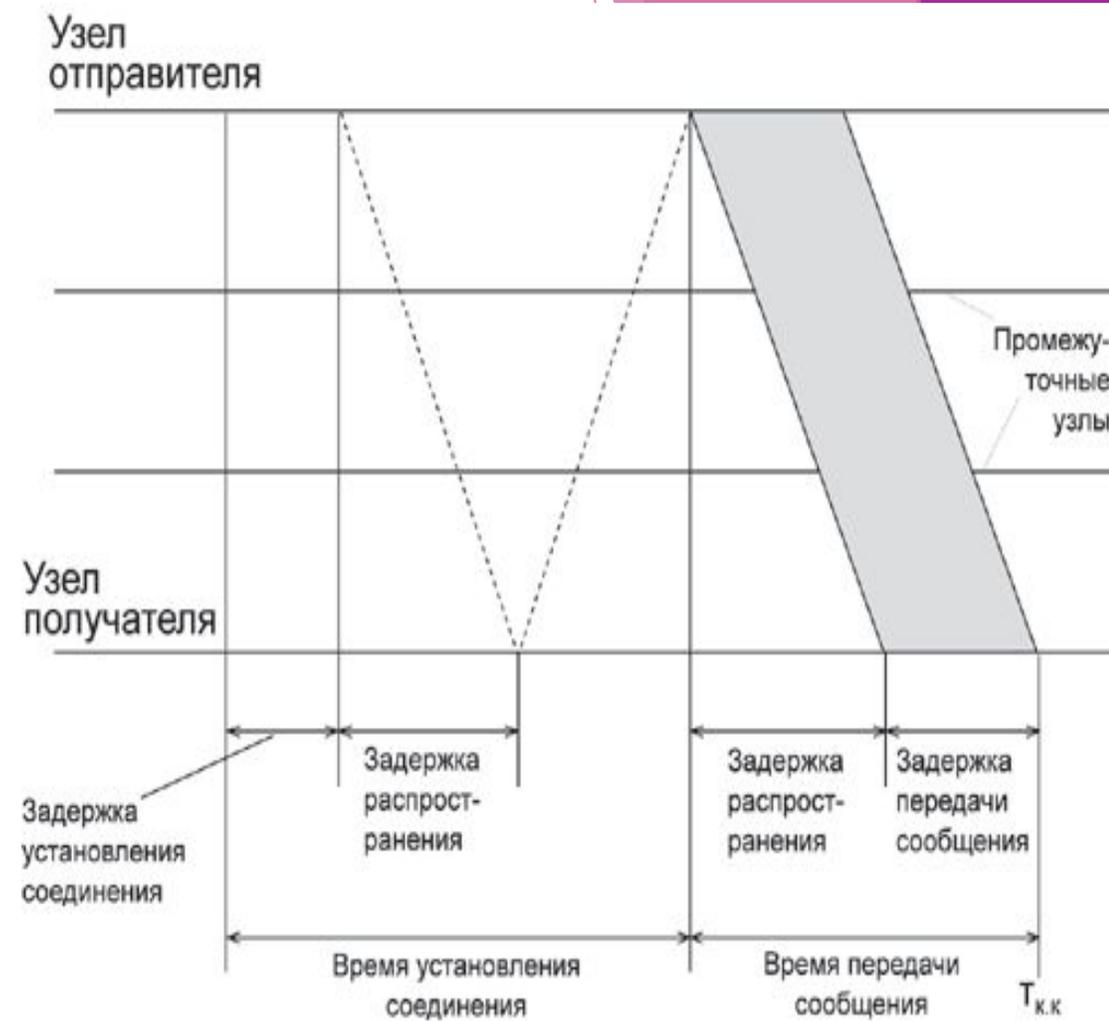


Рис. 1. Задержки передачи Данных в сетях с коммутацией каналов.

- ▶ В сети с коммутацией пакетов картина совсем иная. Процедура установления соединения в этих сетях, если она используется, занимает примерно такое же время, как и в сетях с коммутацией каналов, поэтому будем сравнивать только время передачи данных.

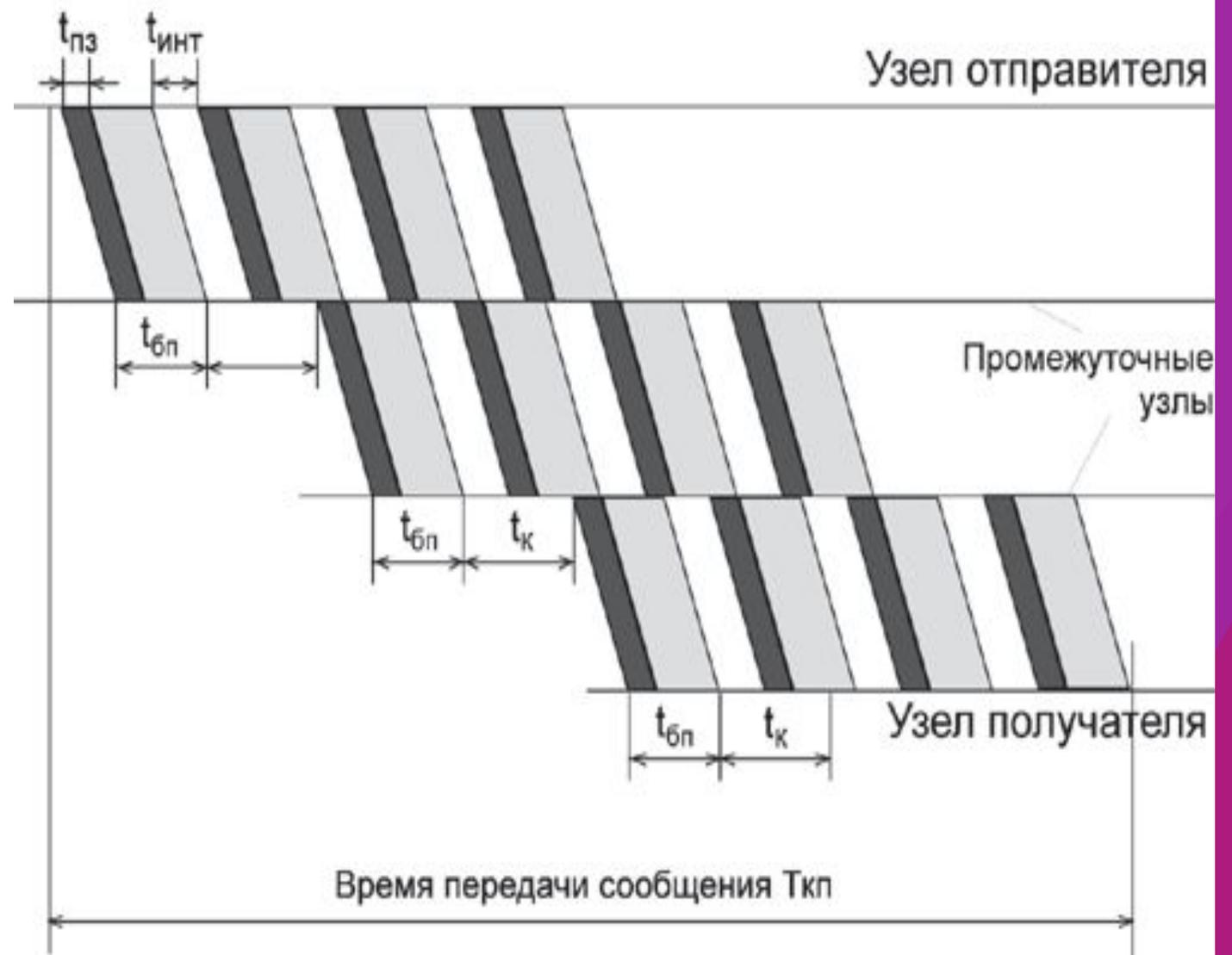


Рис. 2. Задержки при передаче данных в сетях с коммутацией пакетов.

- ▶ На [рис.2](#) показан пример передачи данных в сети с коммутацией пакетов. Предполагается, что по сети передается сообщение того же объема, что и сообщение, передаваемое на [рис.1](#) однако оно разделено на пакеты, каждый из которых снабжен заголовком. Время передачи сообщения в сети с коммутацией пакетов обозначено на рисунке $T_{к.п.}$. При передаче этого разбитого на пакеты сообщения по сети с коммутацией пакетов возникают дополнительные задержки. Во-первых, это задержки в источнике передачи, который, помимо передачи собственно сообщения, тратит дополнительное время на передачу заголовков $t_{п.з.}$, к тому же добавляются задержки $t_{инт}$, вызванные интервалами между передачей каждого следующего пакета (это время уходит на формирование очередного пакета стеком протоколов).

- ▶ Во-вторых, дополнительное время тратится в каждом коммутаторе. Здесь задержки складываются из времени буферизации - пакета $t_{б.п.}$ (коммутатор не может начать передачу пакета, не приняв его полностью в свой буфер) и времени коммутации $t_{к.}$. Время буферизации равно времени приема пакета с битовой скоростью протокола. Время коммутации складывается из времени ожидания пакета в очереди и времени перемещения пакета в выходной порт. Если время перемещения пакета фиксировано и, как правило, невелико (от нескольких микросекунд до нескольких десятков микросекунд), то время ожидания пакета в очереди колеблется в очень широких пределах и заранее неизвестно, так как зависит от текущей загрузки сети.

- ▶ Проведем грубую оценку задержки при передаче данных в сетях с коммутацией пакетов по сравнению с сетями с коммутацией каналов на простейшем примере. Пусть тестовое сообщение, которое нужно передать в обоих видах сетей, имеет объем 200 Кбайт. Отправитель находится от получателя на расстоянии 5000 км. Пропускная способность линий связи составляет 2 Мбит/с.
- ▶ Время передачи данных по сети с коммутацией каналов складывается из времени распространения сигнала, которое для расстояния 5000 км можно оценить примерно в 25 мс (принимая скорость распространения сигнала равной $2/3$ скорости света), и времени передачи сообщения, которое при пропускной способности 2 Мбит/с и длине сообщения 200 Кбайт равно примерно 800 мс. При расчете корректное значение K (2^{10}), равное 1024, округлялось до 1000, аналогично значение M (2^{20}), равное 1048576, округлялось до 1000000. Таким образом, передача данных оценивается в 825 мс.

- ▶ Ясно, что при передаче этого сообщения по сети с коммутацией пакетов, обладающей такой же суммарной длиной и пропускной способностью - каналов, пролегающих от отправителя к получателю, время распространения сигнала и время передачи данных будут такими же — 825 мс. Однако из-за задержек в промежуточных узлах общее время передачи данных увеличится. Давайте оценим, на сколько возрастет это время. Будем считать, что путь от отправителя до получателя пролегает через 10 коммутаторов. Пусть исходное сообщение разбивается на пакеты в 1 Кбайт, всего 200 пакетов. Вначале оценим задержку, которая возникает в исходном узле. Предположим, что доля служебной информации, размещенной в заголовках пакетов, по отношению к общему объему сообщения составляет 10%. Следовательно, дополнительная задержка, связанная с передачей заголовков - пакетов, составляет 10% от времени передачи целого сообщения, то есть 80 мс. Если принять интервал между отправкой пакетов равным 1 мс, то дополнительные потери за счет интервалов составят 200 мс. Таким образом, в исходном узле из-за пакетирования сообщения при передаче возникла дополнительная задержка в 280 мс.

▶ Пример: Каждый из 10 коммутаторов вносит задержку коммутации, которая может составлять от долей до тысяч миллисекунд. В данном примере будем считать, что на коммутацию в среднем тратится 20 мс. Кроме того, при прохождении сообщений через коммутатор возникает задержка буферизации пакета. Эта задержка при величине пакета 1 Кбайт и пропускной способности линии 2 Мбит/с равна 4 мс. Общая задержка, вносимая 10 коммутаторами, составляет примерно 240 мс. В результате дополнительная задержка, созданная сетью с коммутацией пакетов, составила 520 мс. Учитывая, что вся передача данных в сети с коммутацией каналов заняла 825 мс, эту дополнительную задержку можно считать существенной.

▶ Хотя приведенный расчет носит очень приблизительный характер, он объясняет, почему процесс передачи для определенной пары абонентов в сети с коммутацией пакетов является более медленным, чем в сети с коммутацией каналов.

- ▶ Неопределенная пропускная способность - сети с коммутацией пакетов – это плата за ее общую эффективность при некотором ущемлении интересов отдельных абонентов. Аналогично, в мультипрограммной операционной системе время выполнения приложения предсказать невозможно, так как оно зависит от количества других приложений, с которыми данное приложение делит процессор.
- ▶ На эффективность работы сети влияют размеры пакетов, которые передает сеть. Слишком большие размеры пакетов приближают сеть с коммутацией пакетов к сети с коммутацией каналов, поэтому эффективность сети падает. Кроме того, при большом размере пакетов увеличивается время буферизации на каждом коммутаторе. Слишком маленькие пакеты заметно увеличивают долю служебной информации, так как каждый пакет содержит заголовок фиксированной длины, а количество пакетов, на которые разбиваются сообщения, при уменьшении размера пакета будет резко расти.

▶ Существует некоторая "золотая середина", когда обеспечивается максимальная эффективность работы сети, однако это соотношение трудно определить точно, так как оно зависит от многих факторов, в том числе изменяющихся в процессе работы сети. Поэтому разработчики протоколов для сетей с коммутацией пакетов выбирают пределы, в которых может находиться размер пакета, а точнее его поле данных, так как заголовок, как правило, имеет фиксированную длину. Обычно нижний предел поля данных выбирается равным нулю, что дает возможность передавать служебные пакеты без пользовательских данных, а верхний предел не превышает 4 Кбайт. Приложения при передаче данных пытаются занять максимальный размер поля данных, чтобы быстрее выполнить обмен, а небольшие пакеты обычно используются для коротких служебных сообщений, содержащих, к примеру, подтверждение доставки пакета.

▶ При выборе размера пакета необходимо также учитывать интенсивность битовых ошибок канала. На ненадежных каналах необходимо уменьшать размеры пакетов, так как это сокращает объем повторно передаваемых данных при искажениях пакетов.

Ethernet – пример стандартной технологии коммутации пакетов

- ▶ Рассмотрим, каким образом описанные выше общие подходы к решению проблем построения сетей воплощены в наиболее популярной сетевой технологии – Ethernet. (Заметим, что мы не будем сейчас подробно рассматривать саму технологию – отложим этот важный вопрос до следующего курса, а сегодня остановимся лишь на некоторых принципиальных моментах, иллюстрирующих ряд уже рассмотренных базовых концепций.)

- ▶ Эпитет "достаточный" подчеркивает то обстоятельство, что речь идет о минимальном наборе средств, с помощью которых можно построить работоспособную сеть. Эту сеть можно усовершенствовать, например, за счет выделения в ней подсетей, что сразу потребует кроме протоколов стандарта Ethernet применения протокола IP, а также специальных коммуникационных устройств — маршрутизаторов. Усовершенствованная сеть будет, скорее всего, более надежной и быстродействующей, но за счет надстроек над средствами технологии Ethernet, которая составила базис сети.
- ▶ Термин "сетевая технология" чаще всего используется в описанном выше узком смысле, но иногда применяется и его расширенное толкование как любого набора средств и правил для построения сети, например "технология сквозной маршрутизации", "технология создания защищенного канала", "технология IP-сетей".

- ▶ Протоколы, на основе которых строится сеть определенной технологии (в узком смысле), создавались специально для совместной работы, поэтому от разработчика сети не требуется дополнительных усилий по организации их взаимодействия. Иногда сетевые технологии называют базовыми технологиями, имея в виду, что на их основе строится базис любой сети. Примерами базовых сетевых технологий могут служить наряду с Ethernet такие известные технологии локальных сетей как Token Ring и FDDI, или же технологии территориальных сетей X.25 и frame relay. Для получения работоспособной сети в этом случае достаточно приобрести программные и аппаратные средства, относящиеся к одной базовой технологии — сетевые адаптеры с драйверами, концентраторы, коммутаторы, кабельную систему и т. п., — и соединить их в соответствии с требованиями стандарта на данную технологию.

Итак, для сетевой технологии - Ethernet характерны:

- ▶ коммутация пакетов ;
- ▶ типовая топология - "общая шина" ;
- ▶ плоская числовая адресация ;
- ▶ разделяемая передающая среда.
- ▶ Основной принцип, положенный в основу Ethernet, — случайный метод доступа к разделяемой среде передачи данных. В качестве такой среды может использоваться толстый или тонкий коаксиальный кабель, витая пара, оптоволокно или радиоволны (кстати, первой сетью, построенной на принципе случайного доступа к разделяемой среде, была радиосеть Aloha Гавайского университета).

- ▶ В стандарте Ethernet строго зафиксирована топология электрических связей. Компьютеры подключаются к разделяемой среде в соответствии с типовой структурой "общая шина" ([рис. 3.](#)). С помощью разделяемой во времени шины любые два компьютера могут обмениваться данными. Управление доступом к линии связи осуществляется специальными контроллерами – сетевыми адаптерами - Ethernet. Каждый компьютер, а точнее, каждый сетевой адаптер, имеет уникальный адрес. Передача данных происходит со скоростью 10 Мбит/с. Эта величина является пропускной способностью сети Ethernet.



Рис.3. Сеть Ethernet.

- ▶ Суть случайного метода доступа состоит в следующем. Компьютер в сети Ethernet может передавать данные по сети, только если сеть свободна, то есть если никакой другой компьютер в данный момент не занимается обменом. Поэтому важной частью технологии Ethernet является процедура определения доступности среды.
- ▶ После того как компьютер убедился, что сеть свободна, он начинает передачу и при этом "захватывает" среду. Время монопольного использования разделяемой среды одним узлом ограничивается временем передачи одного кадра. Кадр — это единица данных, которыми обмениваются компьютеры в сети Ethernet. Кадр имеет фиксированный формат и наряду с полем данных содержит различную служебную информацию, например адрес получателя и адрес отправителя.

- ▶ **Сеть Ethernet** устроена так, что при попадании кадра в разделяемую среду передачи данных все сетевые адаптеры начинают одновременно принимать этот кадр. Все они анализируют адрес назначения, располагающийся в одном из начальных полей кадра, и, если этот адрес совпадает с их собственным, кадр помещается во внутренний буфер сетевого адаптера. Таким образом компьютер-адресат получает предназначенные ему данные.
- ▶ Может возникнуть ситуация, когда несколько компьютеров одновременно решают, что сеть свободна, и начинают передавать информацию. Такая ситуация, называемая коллизией, препятствует правильной передаче данных по сети. В стандарте Ethernet предусмотрен алгоритм обнаружения и корректной обработки коллизий. Вероятность возникновения коллизии зависит от интенсивности сетевого трафика.
- ▶ После обнаружения коллизии - сетевые адаптеры, которые пытались передать свои кадры, прекращают передачу и после паузы случайной длительности пытаются снова получить доступ к среде и передать тот кадр, который вызвал коллизию.

Основные достоинства технологии Ethernet

- ▶ Главным достоинством сетей Ethernet, благодаря которому они стали такими популярными, является их экономичность. Для построения сети достаточно иметь по одному сетевому адаптеру для каждого компьютера плюс один физический сегмент коаксиального кабеля нужной длины.
- ▶ Кроме того, в сетях Ethernet реализованы достаточно простые алгоритмы доступа к среде, адресации и передачи данных. Простота логики работы сети ведет к упрощению и, соответственно, снижению стоимости сетевых адаптеров и их драйверов. По той же причине адаптеры сети Ethernet обладают высокой надежностью.
- ▶ И, наконец, еще одним замечательным свойством сетей Ethernet является их хорошая расширяемость, то есть возможность подключения новых узлов.

- ▶ Другие базовые сетевые технологии, такие как Token Ring и FDDI, хотя и обладают индивидуальными чертами, в то же время имеют много общего с Ethernet. В первую очередь, это применение регулярных фиксированных топологий ("иерархическая звезда" и "кольцо"), а также разделяемых сред передачи данных. Существенные отличия одной технологии от другой связаны с особенностями используемого метода доступа к разделяемой среде. Так, отличия технологии Ethernet от технологии Token Ring во многом определяются спецификой заложенных в них методов разделения среды – случайного алгоритма доступа в Ethernet и метода доступа путем передачи маркера в Token Ring.

Дейтаграммная передача

В сетях с коммутацией пакетов сегодня применяется два класса механизмов передачи пакетов:

- ▶ дейтаграммная передача;
- ▶ виртуальные каналы.

Примерами сетей, реализующих дейтаграммный механизм передачи, являются сети Ethernet, IP и IPX. С помощью виртуальных каналов передают данные сети X.25, frame relay и АТМ. Сначала мы рассмотрим базовые принципы дейтаграммного подхода.

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, никак не учитывается.

- ▶ Выбор следующего узла — например, коммутатора Ethernet или маршрутизатора IP/IPX — 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 и IPX, — таблицами маршрутизации (routing table). Далее для простоты будем пользоваться термином "таблица маршрутизации" в качестве обобщенного названия такого рода таблиц, используемых для дейтаграммной передачи на основании только адреса назначения конечного узла.

- ▶ В таблице маршрутизации 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 [рис.4](#) пакеты, поступающие в маршрутизатор R1 для узла назначения с адресом N2, A2, в целях баланса нагрузки распределяются между двумя следующими маршрутизаторами – R2 и R3, что снижает нагрузку на каждый из них, а значит, уменьшает очереди и ускоряет доставку. 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 отказа промежуточных маршрутизаторов.

- ▶ Такая особенность дейтаграммного механизма как размытость путей следования трафика через сеть также в некоторых случаях является недостатком. Например, если пакетам определенной сессии между двумя конечными узлами сети необходимо обеспечить заданное качество обслуживания. Современные методы поддержки QoS работают эффективней, когда трафик, которому нужно обеспечить гарантии обслуживания, всегда проходит через одни и те же промежуточные узлы.

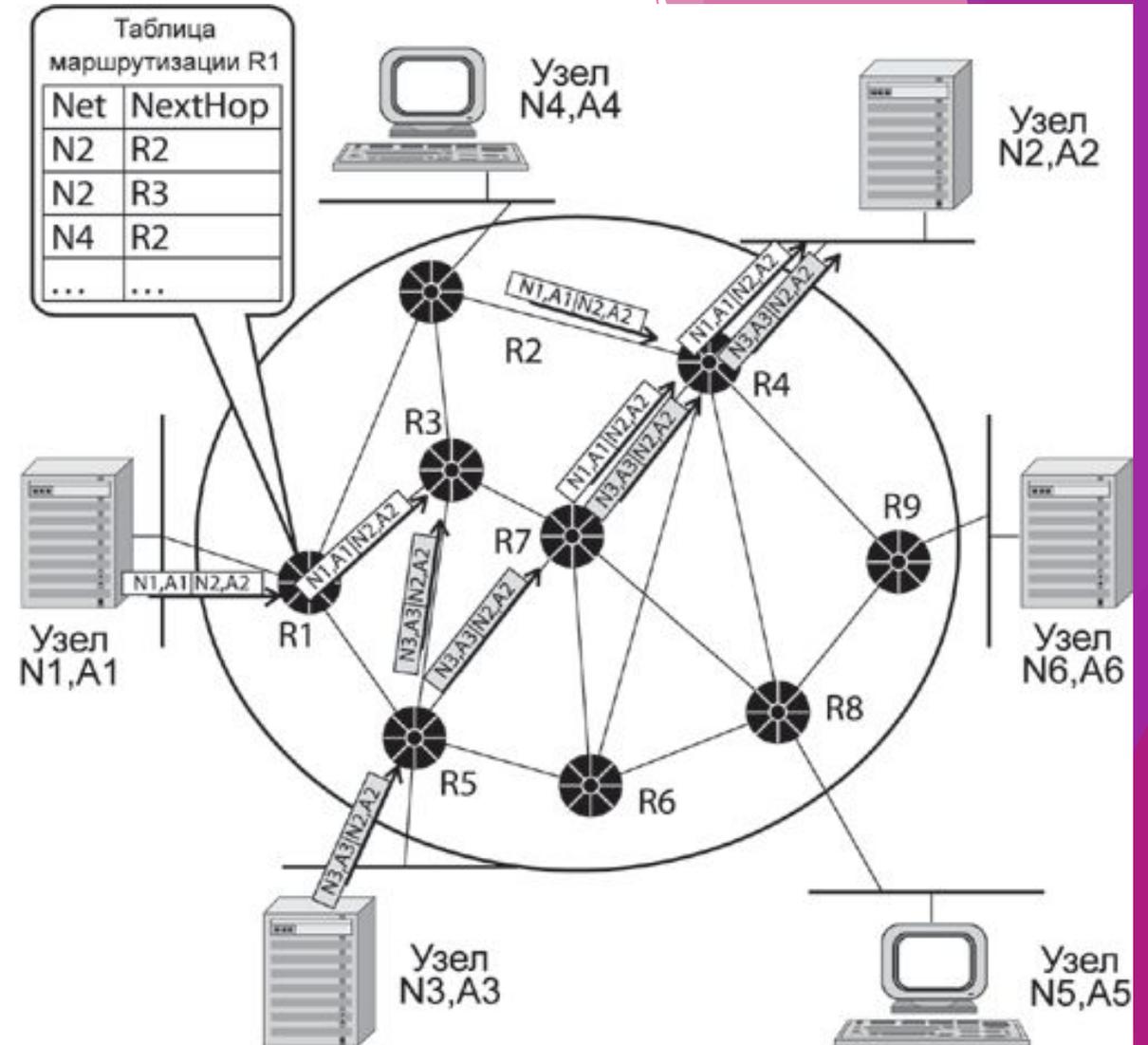


Рис.4. Дейтаграммный принцип передачи пакетов.

Виртуальные каналы в сетях с коммутацией пакетов

- ▶ Механизм виртуальных каналов (virtual circuit или virtual channel) создает в сети устойчивые пути следования трафика через сеть с коммутацией пакетов. Этот механизм учитывает существование в сети потоков данных.
- ▶ 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 5 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 коммутаторы сети R1, R3, R7 и R4. Второй обеспечивает продвижение данных по пути N3, A3 — 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.

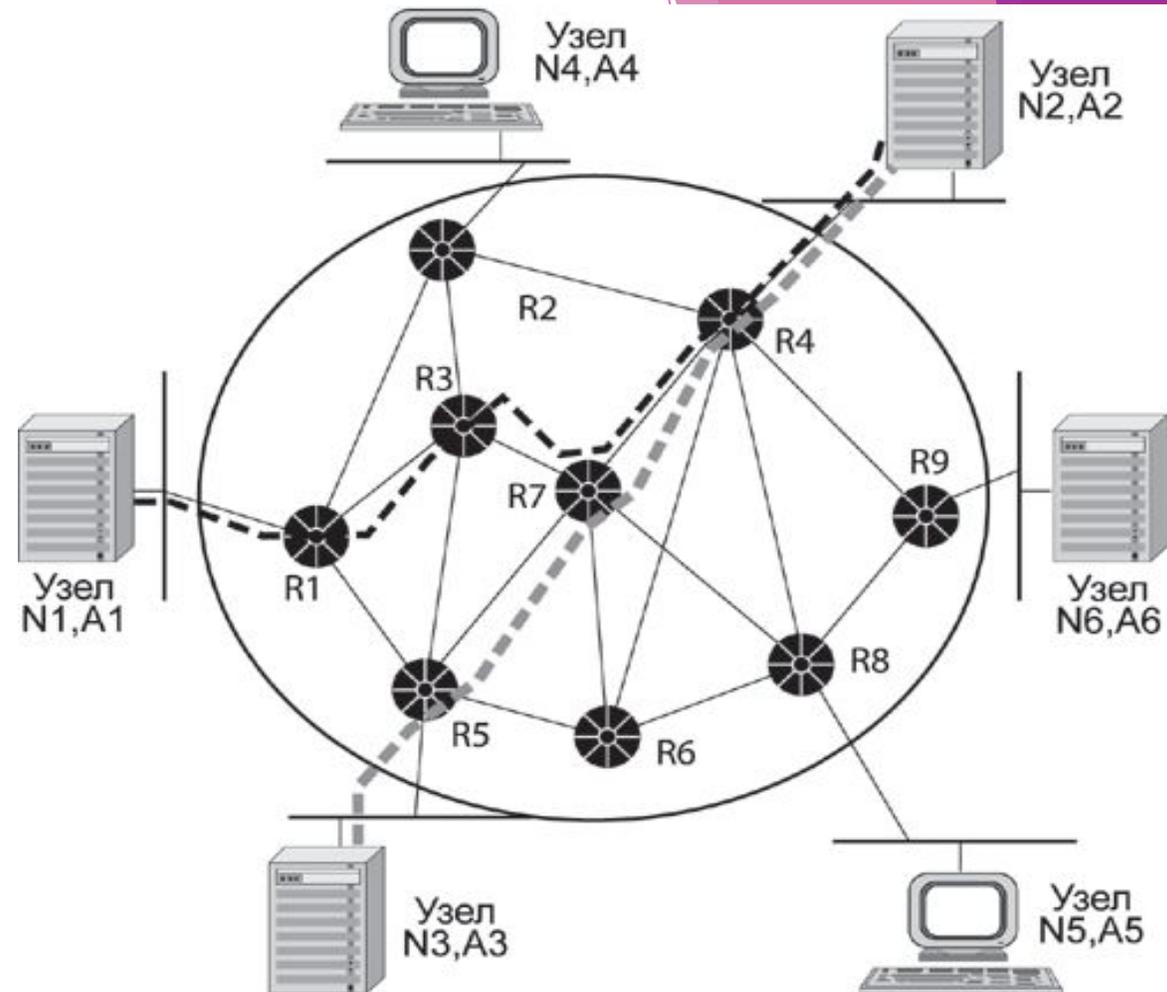


Рис.5. Принцип работы виртуального канала.

- ▶ Сеть только обеспечивает возможность передачи трафика вдоль виртуального канала, 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 различных 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, в которой указывается, на какой выходной порт нужно передать пакет. Таблица коммутации 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 таблица коммутации намного меньше таблицы маршрутизации, 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, а переносит по сети только идентификатор, существенно меньше.