Управление доступом к среде 2. (medium access control MAC)

28 мая 2026 г.

Протокол CSMA с обнаружением коллизий

Настойчивый и ненастойчивый протоколы CSMA, несомненно, более эффективны по сравнению с системой ALOHA, поскольку гарантируют, что ни одна станция не начнет передачу, если канал уже занят. Однако если две станции, обнаружив, что канал свободен, одновременно начали передачу, коллизия все равно произойдет.

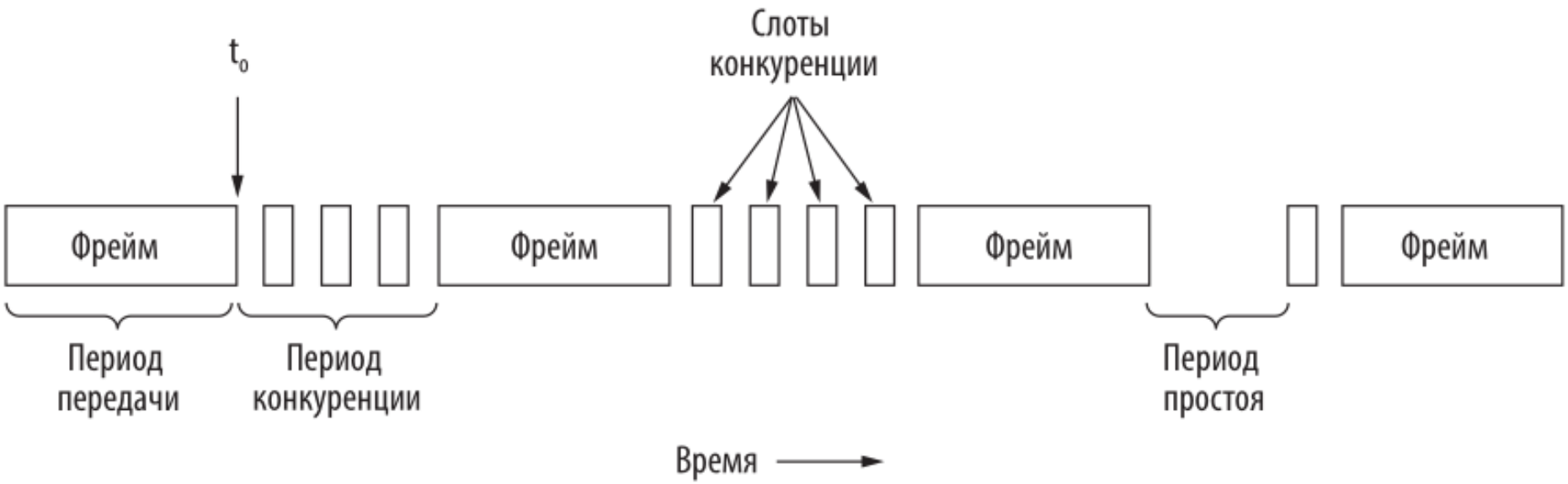
Еще одно улучшение — станции способны быстро распознать коллизию и немедленно прекратить передачу (а не доводить ее до конца), так как данные все равно искажены. Эта стратегия обеспечивает более экономное использование времени и пропускной способности канала.

Протокол CSMA с обнаружением коллизий (CSMA/CD) лежит в основе классических локальных сетей Ethernet и потому заслуживает подробного рассмотрения.

Оборудование станции должно прослушивать канал во время передачи. Если считываемый сигнал отличается от пересылаемого, становится понятно, что произошла коллизия. Полученный сигнал не обязательно должен идеально совпадать с отправленным.

В протоколе CSMA/CD, как и во многих других протоколах LAN, применяется концептуальная модель, показанная на илл. В момент времени t_0 одна из станций заканчивает передачу фрейма. Все остальные станции, готовые к передаче, теперь могут попытаться отправить свои фреймы.

Если две или несколько станций одновременно начнут передачу, то произойдет коллизия. Обнаружив ее, станция прекращает передачу, ждет в течение случайного периода времени, после чего пытается снова, при условии, что к этому моменту не начала передачу другая станция.


Слоты
конкуренции
t_0
Фрейм
Фрейм
Фрейм
Фрейм
Период
передачи
Период
конкуренции
Период
простоя
Время

Таким образом, простая модель протокола CSMA/CD состоит из чередующихся периодов конкуренции и передачи, а также периодов простоя (когда все станции молчат).

Рассмотрим более подробно алгоритм борьбы за право использования канала. Предположим, две станции одновременно начали передачу в момент t_0. Сколько понадобится времени на то, чтобы они поняли, что произошла коллизия?

От ответа на этот вопрос зависит длина периода конкуренции, а следовательно, величина задержки и производительность канала.

Рассмотрим наихудший сценарий. Пусть время, необходимое для прохождения сигнала между двумя самыми дальними станциями, равно τ. В момент времени t_0 одна из станций отправляет сигнал. В момент времени $t_0 + \tau - \epsilon$, за мгновение до того, как сигнал достигнет самой дальней станции, та станция также начинает передачу.

Конечно, почти мгновенно она обнаруживает коллизию и останавливается. Однако всплеск шума, вызванный коллизией, достигает передающей станции только к моменту $2\tau - \epsilon$. То есть станция не может быть уверена в том, что захватила канал, пока не пройдет 2τ с момента начала передачи.

В коаксиальном кабеле длиной 1 км $\tau \approx 5$ мкс.

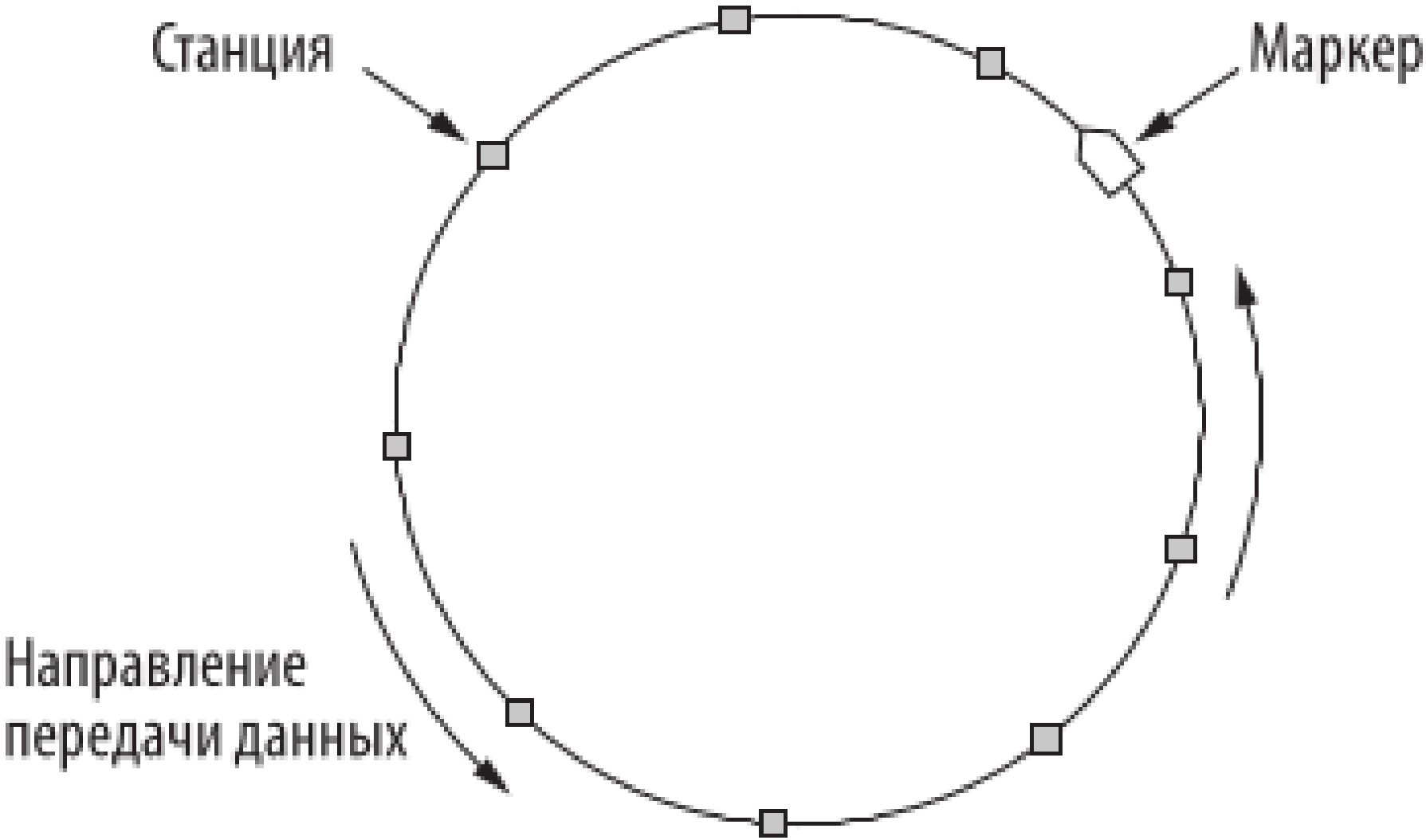
Протоколы без коллизий

Протокол битовоый карты

Каждый период конкуренции состоит ровно из N слотов. Если у станции 0 есть фрейм для передачи, она передает единичный бит в слоте 0. Другим станциям не разрешается осуществлять передачу в этом интервале. Независимо от действий станции 0, станция 1 получает возможность передать единичный бит в слоте 1, но только если у нее имеется поставленный в очередь фрейм.

Протоколы, в которых намерение передавать объявляется до самой передачи, называются **протоколами с резервированием** (reservation protocols). Они заранее резервируют канал для определенной станции, предотвращая коллизии.

Передача маркера



Сеть ethernet

Большое число технологий для персональных (PAN), локальных (LAN) и общегородских (MAN) сетей описано в серии стандартов IEEE 802.

Сеть ethernet

Стандарты 802.3 (Ethernet) и 802.11 (беспроводные LAN).

Сеть ethernet

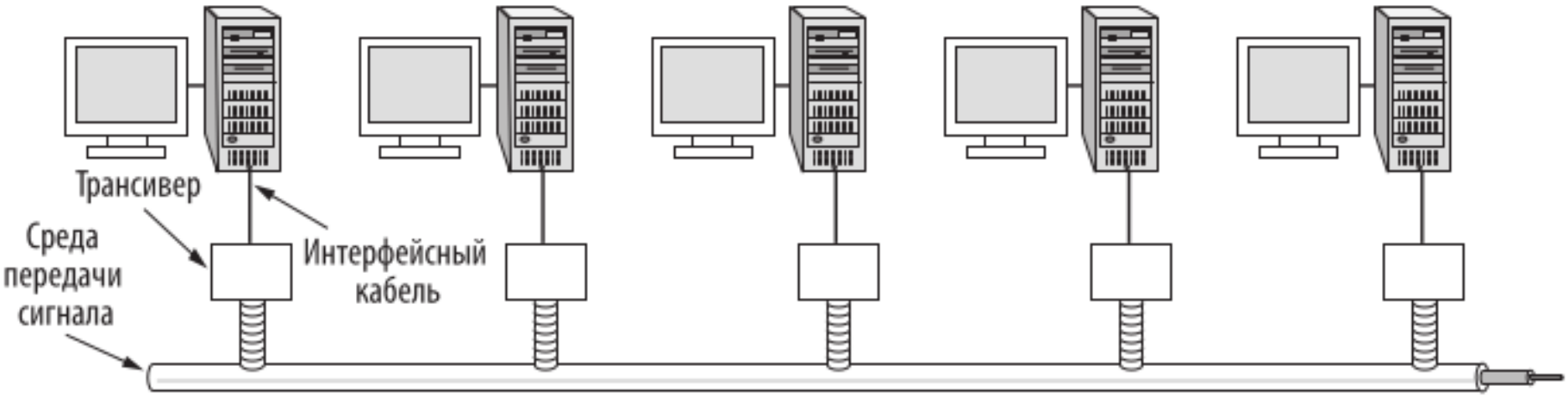
Существует два типа Ethernet: **классический Ethernet** (classic Ethernet), **коммутируемый Ethernet** (switched Ethernet).

Сеть ethernet

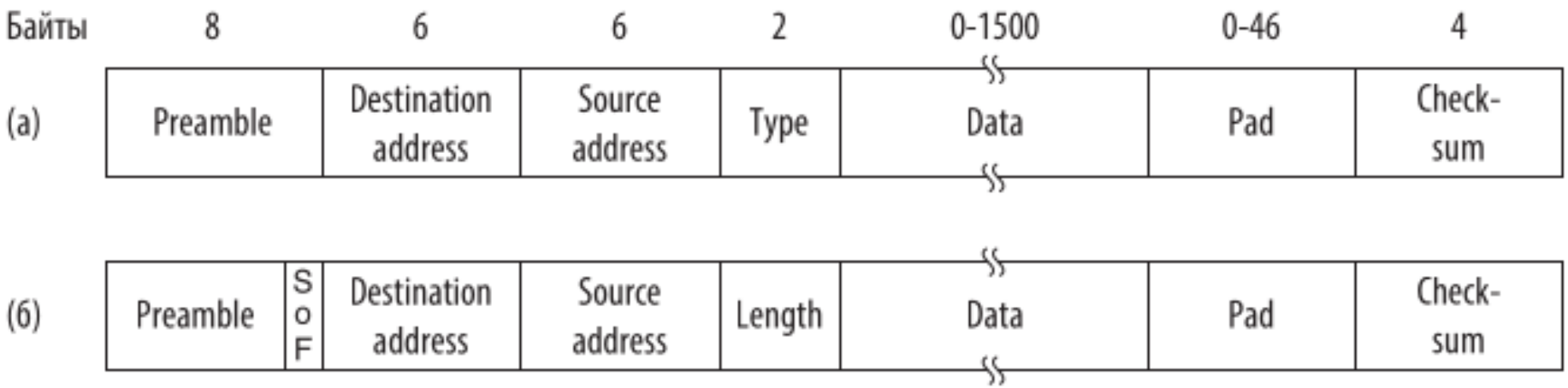
В **коммутируемый Ethernet** для соединения компьютеров используются коммутаторы (switches)

Классический Ethernet — изначальный вариант, достигавший скорости 3–10 Мбит/с. Коммутируемый Ethernet работает на скоростях 100, 1000, 10 000, 40 000 или 100 000 Мбит/с

Классический Ethernet



Протокол MAC в классическом ethernet



Сначала идет поле Preamble (Преамбула) длиной 8 байт, каждый содержит последовательность 10101010 (за исключением последнего байта, в котором значения двух последних битов равны 11). Последний байт в стандарте 802.3 называется разделителем Start of Frame, SoF (начало фрейма).

Манчестерское кодирование такой последовательности битов в результате дает квадратную волну с частотой 10 МГц и длительностью 6,4 мкс. Это позволяет получателю синхронизировать свой таймер с таймером отправителя. Два последних бита 11 сообщают получателю, что сейчас начнется передача остальной части фрейма.

Затем следуют два адресных поля: Destination address (Адрес получателя) и Source address (Адрес отправителя). Каждый занимает по 6 байт.

Первый передаваемый бит адреса получателя содержит 0 для обычных адресов и 1 для групповых. Групповые адреса позволяют нескольким станциям принимать информацию от одного отправителя.

Фрейм, отправляемый групповому адресату, может быть получен всеми станциями, входящими в эту группу. Этот механизм называется **групповой рассылкой** (multicasting).

Если адрес состоит только из единиц, то фрейм могут принять абсолютно все станции сети. Таким способом осуществляется **широковещание** (broadcasting).

Групповая рассылка более избирательна и предусматривает управление группами, чтобы определять, какие станции в них входят. При широковещании, напротив, никакой разницы между станциями нет, поэтому управление группами не требуется.

Интересной особенностью исходных адресов станций является их абсолютная уникальность. Они централизованно назначаются IEEE, и это гарантирует, что нигде в мире нет двух станций с одинаковым адресом.

Идея заключается в том, что каждая станция может быть однозначно идентифицирована по ее 48-битному номеру.

Для этого первые 3 байта поля адреса используются для **уникального идентификатора организации** (Organizationally Unique Identifier, OUI). Значения этого поля определяются IEEE и являются индикатором производителей (каждый из них получает блок из 2^24 адресов).

Производитель назначает последние 3 байта адреса и программирует весь адрес в сетевой карте перед тем, как она поступает в продажу.

Затем следует поле Type (Тип) или Length (Длина), в зависимости от того, к какому стандарту относится фрейм — Ethernet или IEEE 802.3.

В Ethernet поле Type показывает получателю, что делать с фреймом. Дело в том, что одновременно на одном и том же компьютере может работать несколько протоколов сетевого уровня. Поэтому операционная система должна понимать, какому протоколу передать полученный фрейм Ethernet.

Поле Type определяет процесс, для которого предназначается фрейм. Например, код типа 0x0800 означает, что данные содержат пакет IPv4.

Создатели IEEE 802.3 благоразумно решили, что в этом поле должна передаваться длина фрейма.

Наконец, за полем Type следует поле Data (Данные), размер которого ограничен 1500 байтами.

Основной причиной выбора размера послужило то, что трансиверу нужно довольно много оперативной памяти для хранения всего фрейма, а память в далеком 1978 году еще была очень дорогой. Соответственно, увеличение верхней границы размера поля данных привело бы к необходимости установки большего объема памяти и удорожанию всего трансивера.

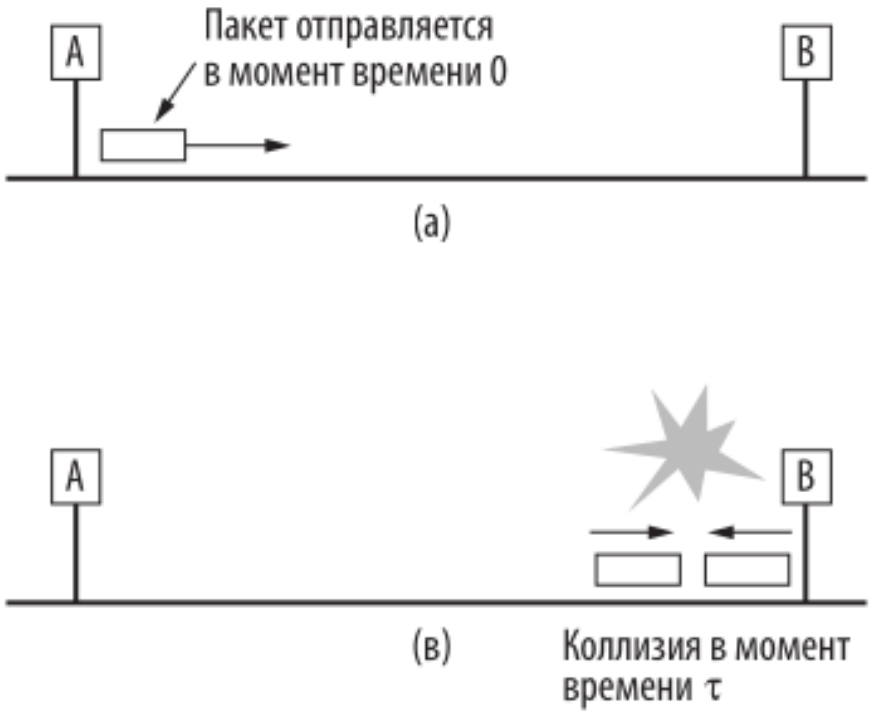
Между тем кроме верхней границы размера поля данных очень важна и нижняя. Поле данных, содержащее 0 байт, вызывает определенные проблемы. Дело в том, что когда трансивер обнаруживает коллизию, он обрезает текущий фрейм, а это означает, что отдельные куски фреймов постоянно блуждают по кабелю

Чтобы легче отличать нормальные фреймы от мусора, сети Ethernet требуется фрейм размером не менее 64 байт (от поля адреса получателя до поля контрольной суммы включительно).

Если во фрейме содержится меньше 46 байт данных, в него вставляется специальное поле Pad (Заполняющие биты), с помощью которого его размер доводится до необходимого минимума.

Есть и другая (и даже более важная) цель установки нижней границы размера фрейма: предотвращение ситуации, когда станция успевает передать короткий фрейм раньше, чем его первый бит дойдет до самого дальнего конца кабеля, где он может столкнуться с другим фреймом.

В момент времени 0 станция A на одном конце сети посылает фрейм. Пусть время прохождения фрейма по кабелю равно τ.


A
Пакет отправляется
в момент времени 0
B
(а)
A
Пакет достиг станции B
в момент времени τ – ε
B
(б)
A
B
(в)
Коллизия в момент
времени τ
A
Шумовой сигнал
в момент времени 2τ
B
(г)

За мгновение до того, как он достигнет конца кабеля (то есть в момент времени $\tau - \epsilon$), самая дальняя станция B начинает передачу. Когда B замечает, что получает большую мощность, нежели передает сама, она понимает, что произошла коллизия. Тогда она прекращает передачу и выдает 48-битный шумовой сигнал, предупреждающий остальные станции.

Примерно в момент времени 2τ отправитель замечает шумовой сигнал и также прекращает передачу, затем выжидает случайное время и пытается возобновить ее.

Если размер фрейма слишком маленький, не исключено, что отправитель закончит передачу прежде, чем получит шумовой сигнал в момент 2τ. В этом случае он может ошибочно предположить, что его фрейм был успешно принят. Для предотвращения этой ситуации все фреймы должны быть такой длины, чтобы время их передачи было больше 2τ.

В LAN со скоростью передачи 10 Мбит/с при максимальной длине кабеля 2500 м и наличии четырех повторителей (требование спецификации 802.3) время передачи одного фрейма должно составлять в худшем случае около 50 мкс. Следовательно, длина фрейма должна быть такой, чтобы время передачи было не меньше этого минимума.

При скорости 10 Мбит/с на передачу одного бита тратится 100 нс, значит, минимальный размер фрейма должен быть равен 500 бит. Из соображений надежности это число было увеличено до 512 бит, или 64 байт.

Последнее поле фрейма — Checksum (Контрольная сумма). По сути, это 32-битный код CRC того же типа, какой мы обсуждали

Ошибка пределяется при помощи того же порождающего многочлена, что используется для PPP, ADSL и других типов каналов. Этот CRC позволяет выявлять ошибки: он проверяет, правильно ли приняты биты фрейма. Исправления не происходит — при обнаружении ошибки фрейм удаляется.

В классическом Ethernet используется алгоритм CSMA/CD с настойчивостью 1, который мы рассматривали в разделе 4.2. Это означает, что станция прослушивает среду передачи, когда у нее появляется фрейм для отправки, и передает данные, если канал освобождается. Затем она проверяет, не произошла ли коллизия.

Если это случилось, станция прерывает передачу, посылая короткий сигнал о наличии коллизии, и повторяет отправку данных через случайный интервал времени.

Рассмотрим, как определяется случайная длина интервала ожидания после коллизии, так как это новый метод. Когда возникает проблема, время делится на дискретные слоты. Их длительность равна максимальному времени обращения сигнала (то есть его прохождения по кабелю туда и обратно) — 2τ. Для удовлетворения потребностей Ethernet при максимальном размере сети необходимо, чтобы один слот составлял 512 битовых интервалов, или 51,2 мкс.

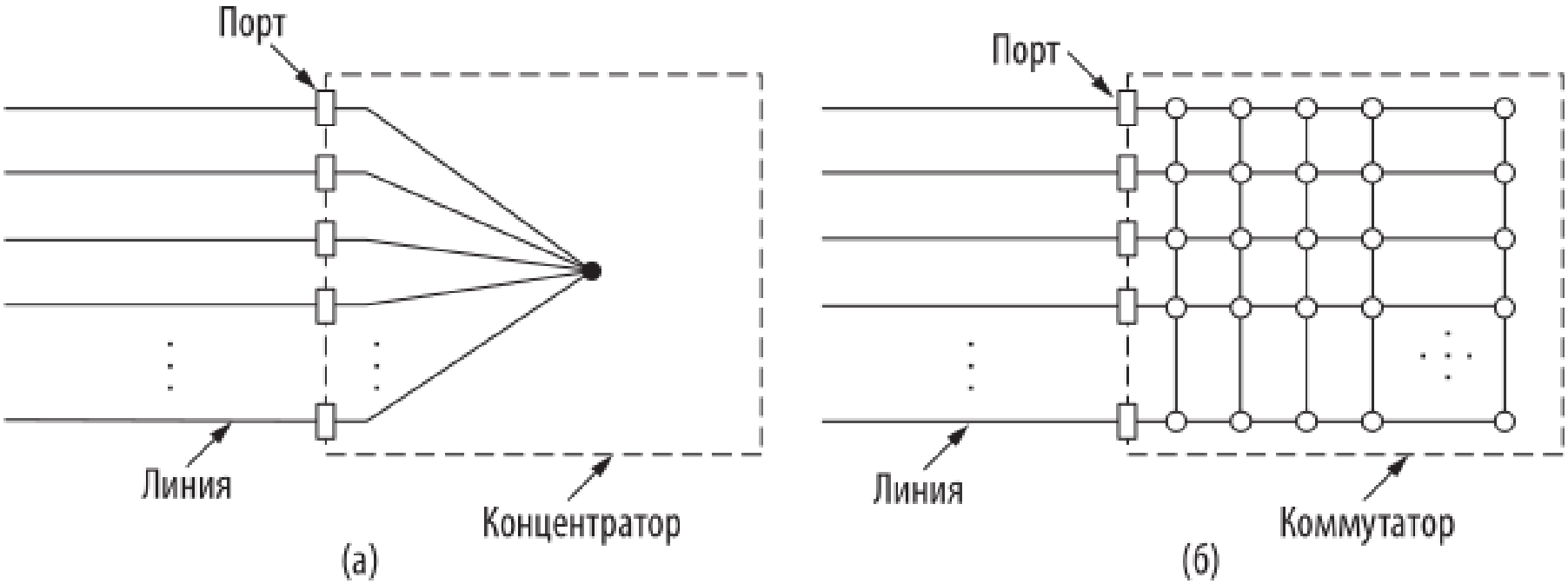
После первой коллизии каждая станция ждет или 0, или 1 слот, прежде чем снова предпринять попытку передачи. Если после коллизии две станции выберут одно и то же псевдослучайное число, они снова будут конфликтовать друг с другом. После второй коллизии каждая станция выбирает случайным образом 0, 1, 2 или 3 слота из набора и ждет снова. При возникновении третьей коллизии (вероятность такого события после предыдущих двух равна 1/4) слоты будут выбираться в диапазоне от 0 до $2^3 \smile 1$.

В общем случае после i столкновений выбирается случайный номер в диапазоне от 0 до 2^{i}˘1 и станция пропускает это количество слотов. Но после 10 коллизий подряд интервал рандомизации фиксируется на отметке 1023 слота. После 16 коллизий подряд контроллер признает свое поражение и возвращает компьютеру ошибку. Дальнейшим восстановлением занимаются более высокие уровни.

Если коллизии не произошло, отправитель предполагает, что фрейм успешно доставлен. Таким образом, ни в CSMA/CD, ни в Ethernet подтверждения не применяются. Такой вариант подходит для кабельных и оптоволоконных каналов с низким числом ошибок. Они распознаются с помощью кода CRC и исправляются более высокими уровнями.

Hub

Начало использования **концентраторов**(hub). Для соединения применялись витые пары — они и так уже были проложены телефонными компаниями в большинстве офисных зданий. Повторное использование было весьма выгодным, но максимальная длина кабеля между компьютером и концентратором была ограничена до 100 м (или 200 м при условии качественной витой пары категории 5).

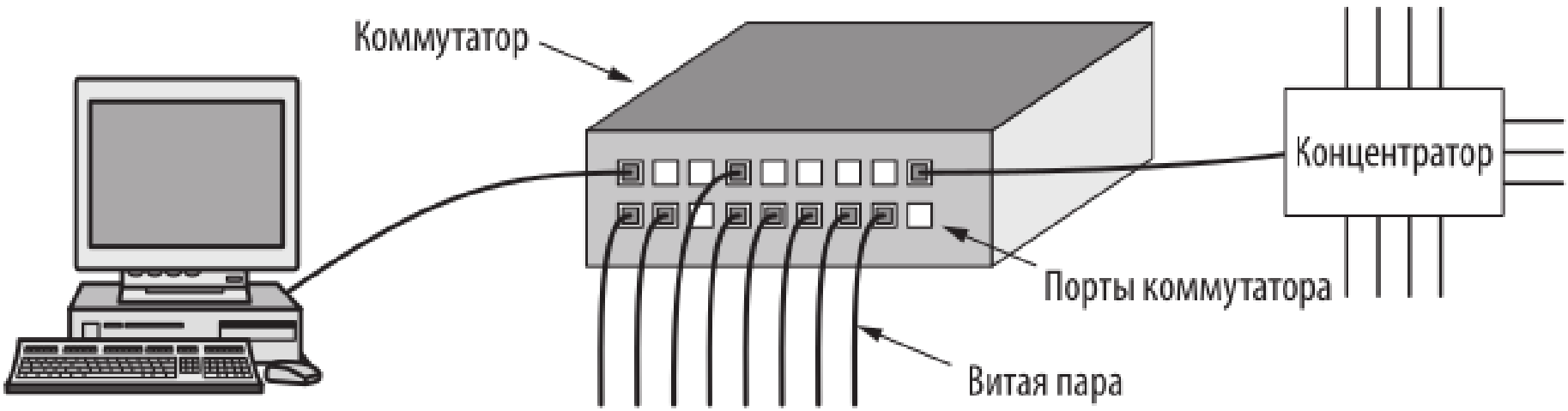

Порт
Линия
Концентратор
(а)
Порт
Линия
Коммутатор
(б)

Коммутируемый ethernet

Основой системы является **коммутатор** (switch), который включает высокоскоростную плату, объединяющую все порты. Внешне коммутатор ничем не отличается от концентратора. Оба представляют собой обычные коробки, оборудованные несколькими (от 4 до 48) стандартными разъемами RJ-45 для подключения витой пары.

Коммутаторы отдают фреймы только на порты, для которых те предназначены. Когда со станции на порт коммутатора приходит фрейм Ethernet, коммутатор проверяет адреса Ethernet и узнает, на какой порт этот фрейм нужно отдать. Для данного шага требуется, чтобы устройство могло сопоставлять номера портов и адреса.

Коммутатор знает порт получателя фрейма. Он пересылает фрейм на порт получателя через высокоскоростную плату. Скорость платы составляет несколько гигабит в секунду, а используемый протокол стандартизировать не требуется, так как он не выходит за пределы коммутатора. Затем порт получателя отправляет фрейм станции назначения по соединяющему их проводу. Другие порты об этом фрейме даже не подозревают.


Коммутатор
Концентратор
Порты коммутатора
Витая пара

Что произойдет, если два компьютера или два порта станут передавать фреймы одновременно? Как мы помним, поведение коммутаторов отличается от концентраторов. Внутри концентратора все станции находятся в одной и той же области коллизий (collision domain). Для планирования пересылки фреймов требуется алгоритм CSMA/CD.

У коммутатора каждый порт находится в своей области коллизий. Обычно передача по кабелю осуществляется в дуплексном режиме, а значит, и станция, и порт могут одновременно отправлять фреймы, не беспокоясь о других станциях и портах. Коллизии при этом невозможны, и CSMA/CD не нужен.

Что касается производительности, у коммутатора два преимущества перед концентратором.

Во-первых, поскольку коллизии отсутствуют, пропускная способность используется более эффективно.

Во-вторых, что еще более важно, благодаря коммутатору разные станции могут посылать фреймы одновременно. Достигнув портов коммутатора, они перейдут по внутренней плате устройства на правильные выходные порты. Но так как на один выходной порт может быть одновременно отправлено два фрейма, внутри коммутатора должен быть буфер для их временного хранения, если моментальная доставка на выходной порт невозможна.

Общую пропускную способность системы можно увеличить на порядок, в зависимости от числа портов и схем пересылки трафика.

Изменения в технологии портов, на которые пересылаются фреймы, также дают преимущества, связанные с безопасностью. Большинство интерфейсов LAN (сетевых адаптеров) могут работать в «неразборчивом режиме» (promiscuous mode), когда все фреймы передаются на все компьютеры, а не только адресату.

При использовании концентратора каждый подключенный к нему компьютер может видеть трафик между всеми остальными устройствами (что очень радует мошенников).

Коммутатор передает трафик только на порты адресатов. Это обеспечивает лучшую изоляцию и защиту от утечки данных: трафик не попадет в чужие руки. Однако если вопрос безопасности в организации стоит очень серьезно, в дополнение к этому лучше применять шифрование.