

Лекция 2. ЛОКАЛЬНЫЕ СЕТИ НА ПРИМЕРЕ ETHERNET

Основные положения

1. Основные этапы передачи данных

В физической передаче данных двумя системами учувствуют два уровня модели OSI – канальный и физический. Сам процесс передачи состоит из следующих подэтапов:

- a. Формирование кадра данных;
- b. Логическое кодирование;
- c. Физическое кодирование;
- d. Передача.

Формирование кадра подразумевает создание заголовка канального уровня, инкапсуляция в поле данных кадра сообщения сетевого уровня, добавление признака конца кадра. Фактически мы получаем набор бит, подлежащий передаче. Далее может следовать необязательный этап логического кодирования (например, в сетях Ethernet его нет, а в сетях FastEthernet он есть). По сути, исходный набор бит для передачи модифицируется в иной набор бит по кодовым таблицам (наиболее частый случай) или иным алгоритмам.

Наконец, подготовленный набор бит представляется передатчиком в виде физического сигнала по определенным соглашениям и передается по физической среде в виде электромагнитных волн.

На принимающей стороне приемник получает сигнал, из физического сигнала формирует набор бит. Если канальный протокол предполагает использование логического кодирования, то производится декодирование. Потом набор бит уже обрабатывается как кадр канального уровня – разбирается заголовок, при необходимости деинкапсулируются данные.

2. Физическое кодирование

Физическое кодирование – представление исходного набора бит в виде сигнала. Кодирование бывает аналоговым и цифровым. Обратите внимание, что один и тот же физический сигнал может быть как аналоговым, так и цифровым. Разница состоит в интерпретации сигнала. При аналоговом кодировании сигнал интерпретируется непрерывно, при цифровом дискретно, то есть приемопередатчики работают с определенной периодичностью, формируя или получая сигнал с характеристиками, которые позволят понять, какое именно итоговое битовое слово передается или получается.

Простейшим примером цифрового сигнала является потенциальный сигнал. Наличию напряжения советует двоичная 1, отсутствию – двоичный 0. За один такт передается один бит.

Можно усложнить код и различать 4 уровня сигнала – тогда будем за один такт передавать два бита.

Эти простые соображения показывают, как мы можем элементарно увеличивать скорость передачи данных:

- a. Увеличить частоту (просто чаще передавать биты)
- b. Увеличить сложность кодирования и в один такт различать множество состояний сигнала и передавать длинные битовые слова.

Однако, не все так просто и физические законы мира диктуют свои ограничения.

3. Немного физики

Рассмотрим, пусть и очень поверхностно, физические аспекты передачи сигнала. Важнейшим моментом здесь является положение о принципиальной разложимости периодической функции в ряд Фурье (ряд, где члены это \sin или \cos с различными амплитудами, частотами и фазами). При **известном упрощении** можно сказать, что наш физический сигнал раскладывается в ряд Фурье, где члены ряда называются – гармониками. То есть можно считать, что итоговый сложный сигнал получается смешиванием (суммированием) простых сигналов вида \sin или \cos .

Старшие гармоники вносят вклад в мощностные характеристики сигнала, младшие – в форму сигнала. Для того, чтобы точно получить исходный сигнал, нам нужно сложить все члены ряда Фурье, на который он был разложен.

Обратите внимание, что:

- a. любая реальная линия связи выступает в виде частотного фильтра. То есть сравнительно хорошо передает сигнал одной частоты и хуже (или вообще не) передает сигналы других частот. То есть отдельные гармоники сигнала будут передаваться с разным качеством;
- b. нет необходимости передавать все гармоники. Пусть некоторые из них (как правило самые младшие) будут поглощены линией связи. Нам важно передать количество гармоник, достаточное для того, чтобы при суммировании получился сигнал достаточный для однозначной интерпретации физического кода.

Среди других характеристик линий связи выделяют амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Эта эмпирическая характеристика показывает диапазон частот, в котором линия связи пропускает сигналы. Вне этого диапазона, называемого полосой пропускания, линия связи поглощает сигналы.

То есть физическое кодирование должно осуществляться в соответствии с АЧХ так, чтобы необходимые для однозначной интерпретации сигнала гармоники пропускались линией связи.

На искажение АЧХ влияют помехи от внешних источников, наводки от сигналов, идущих по параллельным линиям, плохие контакты в местах соединений, нарушение требований по химическому составу и конструктиву кабелей и разъемов. В сетях Ethernet для разных поколений протоколов применяется разные физические коды.

Для Ethernet и FastEthernet - манчестерский код. Для GigabitEthernet – PAM-5. Все эти коды самосинхронизирующиеся, то есть не нуждаются в линии, передающей сигналы, позволяющие приемнику и передатчику синхронизировать такты.

Так, в Манчестерском коде двоичная 1 кодируется перепадом уровня сигнала с верха вниз, а 0 – снизу вверх. При передаче двух последовательных 1 или 0 удваивается частота. Так приемник определяет границы бит.

4. Логическое кодирование

В сетях FastEthernet применяется кодирование 4B/5B, в GigabitEthernet - 8B10B, в сетях 10G - 64B/66B и 64B/65B.

Логическое кодирование решает две задачи:

- a. Позволяет обнаруживать ошибку на канальном уровне
- b. Улучшает условия передачи.

Например, в кодировании 4B/5B исходные 4-х битные комбинации заменяются на 5-и битные. Это приводит к тому, что часть комбинаций оказывается недопустимой, и их получение свидетельствует об ошибке.

С другой стороны, логическое кодирование, хоть и приводит к увеличению объема бит доля передачи, позволяет передавать данные на больших частотах при той же

полосе пропускания. Так при Манчестерском кодировании мы сокращаем комбинации, при которых идет длинные последовательности 1 или 0, а следовательно, растет частота, а следовательно, возникает необходимость в канале с большей полосой пропускания. Логическое кодирование позволило использовать для протокола FastEthernet, частота работы которого в 10 раз больше, те же среды передачи, что для Ethernet.

5. Сети Ethernet

Сети Ethernet это группа проводных протоколов канального уровня для организации LAN. Автором Ethernet является Вильям Меткалф. По сравнению с конкурирующими протоколами своего времени Ethernet обладал более простым алгоритмом работы, а следовательно, оборудование Ethernet оказалось не только производительным, но и более дешевым, что позволило сетям Ethernet стать стандартом де-факто для локальных сетей. Сети Ethernet описываются стандартом IEEE 802.3.

В настоящее время существуют модификации Ethernet на 10 и 100 Мб/с, 1, 10 и 40 Гб/с.

6. Алгоритм работы

Сети Ethernet основаны на применении алгоритма доступа к передающей среде CSMA\CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection), что означает множественный доступ с прослушиванием несущей и обнаружением коллизий.

Основными принципами алгоритма являются:

- a. равноправный доступ узлов к сети,
- b. отсутствие диспетчеризации на уровне протокола, то есть нет устройства или признака, определяющего порядок передачи,
- c. использование статистических механизмов распределения пропускной способности сети.

Для получения узел:

- a. определяет есть ли сигнал на несущей частоте,
- b. начинает прием, получая преамбулу кадра для вхождения в побитный и побайтный синхронизм с передатчиком.
- c. прием осуществляется до получения признака завершения кадра.
- d. Проверяет адрес получателя в заголовке, при совпадении адресов осуществляется обработка кадра.

При передаче узел:

- a. определяет занят ли канал, т. е. есть ли сигнал на несущей частоте.
- b. если линия свободна, то узел, делает задержку на межузловой интервал (эта пауза которая позволяет сократить вероятность конфликта при передаче) и передает кадр.
- c. следующий кадр узел передает после межузлового интервала. Отметим, что сети, GigabitEthernet и старше могут передавать несколько кадров подряд (Packet Bursting).

При возникновении коллизии, то есть при одновременной передаче несколькими узлами:

- a. каждый узел, участвовавший в коллизии, обрывает передачу и рассылает специальный jam-кадр, предназначенный для усиления коллизии,
- b. каждый из конфликтующих узлов рассчитывает время ожидания:

$$P=L * T, \text{ где}$$

T=512 битовых интервалов,

N номер последовательно возникшей коллизии,

L случайное число из [0, 2N] при $0 < N \leq 10$. При $N \geq 10$ L=1023.

Битовый интервал – это время, необходимое для передачи одного бита в сеть, 512 – размер кадра минимальной длины.

Таким образом для узлов, которые участвовали в конфликте, время ожидания P окажется разным и один из узлов сможет занять канал связи.

Область сети, в которой узлы могут вступать в коллизию называется доменом коллизий.

7. Физический уровень

Сети Ethernet это проводные сети с большим многообразием физических протоколов. Вот некоторые из них:

- a. Ранние модификации. 1BASE5 – коаксиальный кабель, топология общая шина;
- b. 10 Мбит/с Ethernet. 10BASE2, 10BASE5 - коаксиальный кабель, топология общая шина; 10BASE-T – витая пара категории 3 и 5, топология звезда; 10BASE-F – оптоволокно, топология точка-точка или звезда.
- c. 100 Мбит/с Fast Ethernet. 100BASE-T – витая пара категории 5 и 5е, топология звезда; 100BASE-FX - оптоволокно, топология точка-точка или звезда.
- d. 1 Гбит/с Gigabit Ethernet. 1000BASE-T – витая пара категории 5е и 6, топология звезда; 1000BASE-SX / LX - оптоволокно, топология точка-точка или звезда.
- e. 10 Гбит/с Ethernet. 10GBASE-T – витая пара категории 6, 7, топология звезда;
- f. 40 Gigabit Ethernet. 40GBASE-CR4 - твинаксиальный кабель, топология точка-точка; 40GBASE-LR4 - оптоволокно, топология точка-точка.
- g. 100 Gigabit Ethernet. 100GBASE-CR10 - твинаксиальный кабель, топология точка-точка; 100GBASE-SR10 – оптоволокно (10 волокон), топология точка-точка.

Дальности связи так же ограничены и зависят от иерархии скорости и характеристик проводника. Например:

- a. 100BASE-T – витая пара категории 5 и 5е – 100 метров;
- b. 100BASE-FX – оптоволокно до 2000 метров;
- c. 1000BASE-T – витая пара категории 5е – 100 метров;
- d. 1000BASE-SX / LX – оптоволокно 550 и 5000 метров соответственно;
- e. 10GBASE-T – витая пара категории 6 до 55 метров;
- f. 40GBASE-CR4 - твинаксиальный кабель до 7 метров;
- g. 100GBASE-CR10 - твинаксиальный кабель до 7 метров;
- h. 100GBASE-SR10 – оптоволокно класса OM3 до 100 метров, класса OM4 – 150 метров.

К характеристикам линии связи относятся затухание, помехоустойчивость, достоверность передачи данных, но интегральными характеристиками является АЧХ и полоса пропускания. Так, для витой пары категории 5 полоса пропускания составляет 100 МГц, а для 7-й категории уже 700 МГц. Поэтому с ростом категории витой пары становится возможным рост скоростей передачи данных.

8. Формат кадра

Для сетей Ethernet стандартизированы несколько типов кадров. Самым распространённым является кадр формата Ethernet II или Ethernet DIX (по первым буквам компаний-разработчиков DEC, Intel и Xerox).

Кадр начинается с Preamble – 8 байтного поля, указывающего начало Ethernet фрейма. Далее идут:

Destination Address – 6 байтное поле для указания MAC адреса назначения. Аналогичное поле Source Address с MAC адресом отправителя.

EtherType – 2-х байтный идентификатор инкапсулированного протокола сетевого уровня. Например, значение 0x0800 соответствует Ipv4.

Payload – поле данных длиной от 46 до 1500 байт

Frame Check Sequences – 4 байтное значение контрольной суммы, используемое для выявления ошибок передачи.

Существуют еще типы кадров, не нашедшие широкого применения Ethernet 802.2, Ethernet Raw 802.3, Ethernet SNAP.

Отметим, что из всех типов кадров инкасулировать IP умеют только Ethernet SNAP и Ethernet II.

9. Оборудование Ethernet

К основным типам оборудования Ethernet относятся:

Сетевые адаптеры – network interface card (NIC) – интерфейсные устройства для подключения отдельных систем к сетям.

Концентраторы – hub – устройства для сетей 10 BASE T и 100BASE T. Концентратор объединяет узлы на физическом уровне, усиливает сигнал. Не производит фильтрацию и обработку кадров. Все входящие кадры концентратор копирует во все порты, предоставляя подключенным устройствам фильтровать трафик по назначению. Естественно, не фильтруется широковещательный трафик.

Концентратор фактически предоставляет узлам общую среду передачи данных. Все узлы, подключенные к концентратору, находятся в одном домене коллизий.

Повторители – устройства, усиливающие сигнал в линии. Предназначены для увеличения дальности связи. Принцип работы тот же, что у концентратора.

Коммутаторы – объединяют устройства в локальную сеть на канальном уровне.

Анализируют адресную информацию в заголовках канального уровня. Отправляют кадры на те порты, к которым подключены целевые устройства. Домен коллизий разделяется до пар взаимодействующих устройств. Коммутатор поддерживает несколько одновременных потоков передачи по разным парам портов.

Широковещательный трафик рассылается без ограничений. В этом случае коммутатор работает как концентратор. Отметим, что существует несколько видов коммутаторов, различающихся функциональностью. Об этом мы расскажем в следующих лекциях.

Медиа конвертеры – устройства для преобразования физической среды передачи при сохранении канального протокола. Например, оптическую линию 1000BASE-LX можно через медиаконвертер подключить к электрической линии 1000BASE-T.

Иногда еще и маршрутизаторы относят к оборудованию Ethernet, но они, хотя и используют интерфейсы семейства Ethernet для доступа к локальным сетям, относятся к сетевому уровню, а не к канальному.

10. Алгоритм работы коммутатора

Рассмотрим базовый алгоритм работы неуправляемого коммутатора второго уровня. Общий принцип сводится к простой идее: по аппаратному адресу получателя определяют на какой порт необходимо отправлять кадр, а по адресу отправителя – к какому порту коммутатора подключено устройство.

Упрощенно принцип работы коммутатора 2-го уровня сводится к составлению и поддержанию в актуальном состоянии таблицы коммутации (принадлежности адресов устройств к портам коммутатора) и последующей фильтрации проходящего трафика согласно таблице коммутации.

Таблица коммутации заполняется по мере активности узлов. Например, когда узел с адресом E8-11-32-7A-C0-ED передает кадр через порт №1, то коммутатор заносит в таблицу коммутации запись: Порт 1 – Адрес E8-11-32-7A-C0-ED – TTL t1.

Где $t1$ – уменьшающийся счетчик времени, когда он достигает 0, запись удаляется, когда коммутатор получает подтверждающий кадр, $t1$ сбрасывается в исходное состояние. Запись так же изменяется, если кадр от узла получен через другой порт. Таким образом коммутатор поддерживает актуальные данные в таблице. Когда коммутатор получает кадр, он по адресу получателя и таблице коммутации определяет в какой порт нужно записать кадры записывает кадр в целевой порт. Остальные порты коммутатора свободны и могут участвовать в обмене данными между друг другом. В случае, если в таблице нет данных об адресе назначения, кадр записывается во все порты устройства. Адресная информация в заголовке кадра канального уровня не изменяется. Широковещательные сообщения рассылаются без ограничений.

11. Аппаратные адреса

Аппаратные адреса, или Media Access Control (MAC) адреса бывают трех видов: Unicast (одноадресные) – адрес конкретного устройства, Broadcast (широковещательные) – предопределенный адрес всех устройств в локальной сети - FF:FF:FF:FF:FF:FF. Multicast (групповые) – предопределенные адреса некоторой группы устройств, например 33:33:00:00:00:00 – адрес маршрутизаторов IPv6. MAC адрес состоит из 6 байт. При этом первые 3 байта - OUI – уникален для производителя, вторые 3 байта уникальны для устройства производителя. Адрес прошивается в ПЗУ устройства производителем, но часто может быть изменен.

12. Выводы

- a. Протоколы семейства Ethernet (IEEE 802.3) являются стандартом де-факто для локальных проводных сетей.
- b. Существует множество физических спецификаций Ethernet на разные скорости (10, 100, 1000 Мбит\с; 1,10,40, 100 Гб\с) для электрической и оптической связи. Они отличаются дальностями, физическим и логическим кодированием, но совместимы по формату кадров и алгоритму доступа к среде.
- c. Физическое кодирование – это представление набора бит в виде физического сигнала, логическое кодирование – предварительное перекодирование набора бит для улучшения условий передачи.
- d. Важной характеристикой линии связи является амплитудно-частотная характеристика, позволяющая определить полосу пропускания. Зная физический код, а, следовательно ширину частотного спектра сигнала, можно понять какая линия связи, с какой полосой пропускания нужна.
- e. Алгоритм доступа к среде CSMA\CD предполагает механизм разрешения коллизий, но в сетях с 3 и более узлами в чистом виде применяется на скоростях до 100 Мб\с. На старших иерархиях скоростей сеть управляется коммутаторами.
- f. Среди всех типов кадров ethernet используется Ethernet II.
- g. Основным типом коммуникационного оборудования Ethernet является коммутатор.
- h. Классический неуправляемый коммутатор второго уровня реализует алгоритм самообучения, по которому составляется таблица коммутации, по которой коммутатор фильтрует трафик, отправляя кадр только на тот порт, к которому подключен целевой узел.

Основные термины

1. CSMA\CD – алгоритм доступа к передающей среде в сетях Ethernet.
2. Hub – то же что и концентратор.
3. MAC адрес – аппаратный адрес сетевого интерфейса на канальном уровне.
4. PAM-5 - физический код GigabitEthernet.
5. Switch - то же что и коммутатор.
6. АЧХ - амплитудно-частотная характеристика для линии связи, характеристика, описывающее затухание сигнала в линии, в зависимости от частоты.
7. Гармоника – в сигнальной передаче, сигнал формы \sin или \cos , с определенной частотой, амплитудой и фазой, представляющий собой член ряда Фурье, полученный разложением исходного сигнала.
8. Кадр – сообщение канального уровня.
9. Коллизия – смешение сигналов от разных источников в сетях Ethernet. Является нормальной ситуацией. Алгоритм Ethernet имеет механизм разрешения коллизии.
10. Коммутатор – устройство канального уровня, осуществляющее передачу и фильтрацию кадров на основе их адресной информации.
11. Концентратор – сетевое устройство, работающее как повторитель, концентратор просто копирует кадры во все свои порты.
12. Логическое кодирование – предварительное перекодирование исходного набора бит перед физическим кодированием.
13. Манчестерский код – физический код Ethernet и FastEthernet.
14. Несущая частота (сигнал на несущей частоте) - сигнал, один или несколько параметров которого подлежат изменению в процессе модуляции. Степень изменения параметра определяется мгновенным значением информационного (модулирующего) сигнала.
15. Сетевой адаптер – устройство для подключения системы к локальной сети.
16. Таблица коммутации – структура данных, содержащая записи о принадлежности MAC адреса к порту коммутатора. Записи снабжаются TTL – уменьшающемся счетчиком времени, необходимым для актуализации записей.
17. Физическое кодирование – представление набора бит в виде физического сигнала

Персоналии

Уильям Меткалф – автор и основной разработчик сетей Ethernet.

Клод Шеннон - американский инженер, криптоаналитик и математик. Основатель теории информации, нашедшей применение в современных высокотехнологических системах связи.

Жан-Батист Жозеф Фурье - французский математик и физик.

Дополнительная литература

1. <https://ieee802.org/3/>
2. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. Юбилейное издание. СПб.: Питер, 2020 г.
3. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. СПб.: Питер, 2019 г.
4. Зюко А.Г. Кловский Д.Д. Теория электрической связи: учебник для вузов. Москва: Радио и Связь, 1999 г.