Канальный уровень 2

30 апреля 2026 г.

Обработка ошибок

Решив проблему маркировки начала и конца фрейма, мы сталкиваемся с новой проблемой: как гарантировать сетевому уровню принимающего устройства доставку всех фреймов и при этом расположить их в правильном порядке.

Обработка ошибок

Для гарантии надежной доставки отправителю посылается информация о том, что происходит на другом конце линии. Протокол требует от получателя передавать обратно специальные управляющие фреймы, содержащие позитивные или негативные сообщения о полученных фреймах.

Обработка ошибок

Если фрейм подтверждения теряется, то отправитель также не узнает, как ему действовать дальше. Очевидно, что протокол, с помощью которого отправитель отсылает фрейм и ожидает подтверждения (положительного или отрицательного ответа), в случае потери фрейма зависнет навсегда (например, если произойдет сбой оборудования или коммуникационного канала).

Обработка ошибок

Чтобы избежать зависаний сети в случае полной потери фреймов, используются таймеры канального уровня. После передачи фрейма включается таймер, отсчитывая интервал времени, достаточный для получения целевым устройством этого фрейма, его обработки и отправки подтверждения.

Обработка ошибок

В нормальной ситуации фрейм корректно принимается, а подтверждение отсылается и доходит до отправителя, прежде чем истечет установленный интервал времени; только после этого таймер отключается.

Обработка ошибок

Если исходный фрейм или подтверждение теряются по пути, установленный интервал времени истекает и отправитель получает сообщение о возможной проблеме.

Обработка ошибок

Самое простое решение для отправителя — послать фрейм еще раз. Однако при этом возникает опасность получения одного и того же фрейма несколько раз на канальном уровне целевого устройства и повторной передачи его сетевому уровню.

Обработка ошибок

Чтобы этого не случилось, необходимо последовательно пронумеровать отсылаемые фреймы, чтобы получатель мог отличить повторы от оригиналов.

Обработка ошибок

Вопрос управления таймерами и порядковыми номерами, гарантирующими доставку каждого фрейма адресату на сетевом уровне ровно один раз, не больше и не меньше, — очень важная задача, которая решается на канальном (или более высоком) уровне.

Управление потоком

Еще один важный вопрос разработки канального уровня (а также более высоких уровней) — что делать с отправителем, постоянно передающим фреймы быстрее, чем получатель способен их получать.

Управление потоком

В настоящее время применяются два подхода. Первый из них — управление потоком с обратной связью (feedback-based flow control): получатель отсылает отправителю сообщение, в котором разрешает продолжить передачу или просто сообщает о своем состоянии.

Управление потоком

При втором подходе, управлении потоком с ограничением (rate-based flow control), в протокол встраивается механизм, ограничивающий скорость, с которой отправитель может передавать данные. Обратная связь с получателем отсутствует.

Управление потоком

Существуют различные схемы управления потоком с обратной связью, но большинство из них использует один и тот же принцип. Протокол содержит четко заданные правила, определяющие, когда отправитель может отослать следующий фрейм. Эти правила часто запрещают отправку фрейма до тех пор, пока получатель не даст разрешения, явно или неявно.

Управление потоком

Например, при установке соединения получатель может сказать: «Сейчас вы можете отправить мне n фреймов, но не посылайте следующие фреймы, пока я не попрошу вас продолжить».

ОБНАРУЖЕНИЕ И КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК

Разработчики сетей создали две основные стратегии для борьбы с ошибками, основанные на добавлении к передаваемым данным некоторой избыточной информации.

ОБНАРУЖЕНИЕ И КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК

В одном случае с ее помощью принимающая сторона может определить, какие данные должны были прийти, в другом — это всего лишь оповещение об ошибке (без указания ее типа), после которого получатель запрашивает повторную передачу.

ОБНАРУЖЕНИЕ И КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК

Первая стратегия использует корректирующие коды (error-correcting codes), вторая — коды для обнаружения ошибок (error-detecting codes). Использование корректирующего кода часто называют упреждающей коррекцией ошибок (Forward Error Correction, FEC).

ОБНАРУЖЕНИЕ И КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК

В высоконадежных (например, оптоволоконных) каналах дешевле использовать код для обнаружения ошибок и просто заново передавать поврежденные блоки. А беспроводные соединения, в которых возникает множество ошибок, чаще используют избыточность информации, позволяющей определить, какие данные должны были прийти.

ОБНАРУЖЕНИЕ И КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК

FEC применяется в зашумленных каналах, поскольку вероятность ошибки при повторной передаче так же велика, как и при первой.

Корректирующие коды

- Коды Хэмминга.
- Двоичные сверточные коды.
- Коды Рида — Соломона.
- Коды с малой плотностью проверок на четность.

Корректирующие коды

Фрейм состоит из битов данных, то есть информационных битов (m), и избыточных, или контрольных, битов (r).

Корректирующие коды

Допустим, полная длина фрейма равна n (то есть $n = m + r$). Обозначим это как (n, m)-код. Набор из n бит, содержащий информационные и контрольные биты, часто называют n-битным **кодовым словом**, или **кодовой комбинацией** (codeword).

Корректирующие коды

Частота кодирования (code rate), или просто частота, — это отношение числа битов несущих информацию, без избыточных битов, к полной длине блока (m/n).

Корректирующие коды

Например, для зашумленного канала обычной нормой считается 1/2, то есть половина полученной информации будет избыточной. В каналах высокого качества норма близка к единице и к большим сообщениям добавляется лишь несколько контрольных битов.

Корректирующие коды

Если рассмотреть два кодовых слова, например 10001001 и 10110001, можно определить, сколько соответствующих разрядов в них отличаются. В данном примере различаются 3 бита.

Корректирующие коды

Чтобы это узнать, нужно сложить два кодовых слова по модулю 2 (операция XOR) и сосчитать количество единиц в результате:

$$\begin{array}{r} 10001001 \\ \underline{10110001} \\ 00111000 \end{array}$$

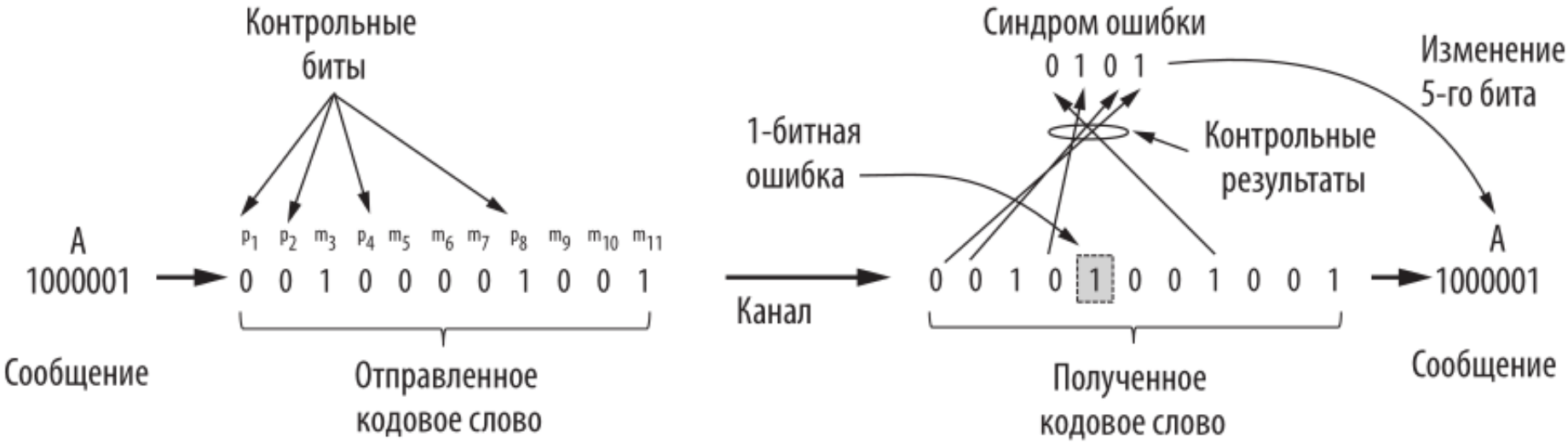
Корректирующие коды

Количество битов, различающихся в двух кодовых словах, называется **расстоянием Хэмминга** (Hamming distance) или **минимальным кодовым расстоянием**.

Корректирующие коды

В кодах Хэмминга биты кодового слова нумеруются последовательно слева направо, начиная с 1. Биты с номерами, равными степеням 2 (1, 2, 4, 8, 16 и т. д.), являются контрольными. Остальные биты (3, 5, 6, 7, 9, 10 и т. д.) заполняются m битами данных.

Код Хэмминга (11, 7)



Коды для обнаружения ошибок

Корректирующие коды широко применяются в беспроводных системах связи, известных зашумленностью и ненадежностью по сравнению с оптоволокном. Передать что-либо, не используя эти коды, практически невозможно. Однако при отправке данных по оптоволокну или высококачественному медному проводу уровень ошибок гораздо ниже, поэтому их обнаружение и повторная передача данных — более подходящий метод.

Корректирующие коды

- Код с проверкой на четность.
- Код с контрольными суммами.
- Циклический избыточный код.

Код с проверкой на четность.

Рассмотрим байт, состоящий из 8 бит. Для обнаружения единичных ошибок можно добавить бит четности (также называемый контрольным битом), преобразуя 8-битную строку в 9-битную.

Код с проверкой на четность.

Добавленный бит будет равен 1, если количество битов, равных 1, нечетное, и 0 в противном случае. Таким образом, строка из 9 бит всегда будет содержать четное количество битов, равных 1.

Код с проверкой на четность.

В этом случае декодер просто подсчитает количество единичных битов, и если оно окажется нечетным, то поймет, что произошла ошибка (или, в более общем случае, нечетное количество ошибок).

Код с проверкой на четность.

Расстояние Хэмминга у кода с единственным битом четности равно двум, так как любая однобитовая ошибка меняет четность кодового слова на неправильную. Это означает, что данный код позволяет распознавать однобитовые ошибки.

Код с проверкой на четность.

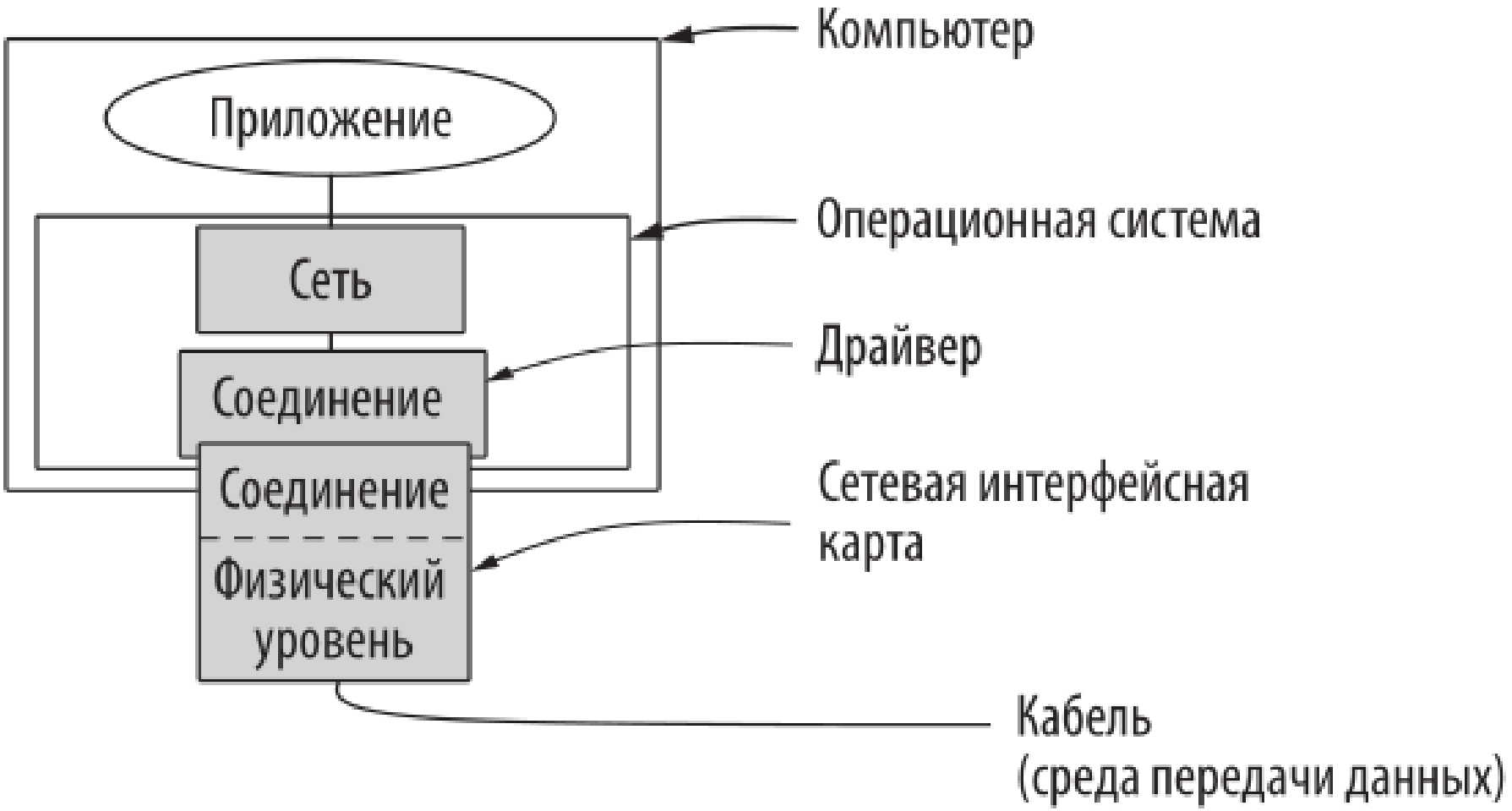
Рассмотрим канал с изолированными ошибками, возникающими с вероятностью 10^{-6} на бит. Такое значение может показаться очень небольшим, но для длинного кабельного канала, в котором распознавать ошибки довольно сложно, оно в лучшем случае считается допустимым. Типичные LAN характеризуются вероятностью ошибки 10^{-10}.

Код с проверкой на четность.

Пусть блок данных состоит из 1000 бит. Как видно из представленного выше уравнения (3.1), чтобы создать код, исправляющий однократные ошибки в 1000-битном блоке, потребуется 10 контрольных битов. Для 1 Мбит данных это составит 10 000 проверочных бит.

Код с проверкой на четность.

Чтобы просто обнаружить одиночную однобитную ошибку, достаточно одного бита четности на блок. На каждые 1000 блоков будет выявляться одна ошибка, и придется переслать повторно еще один блок (1001 бит), чтобы исправить ее. Таким образом, суммарные накладные расходы на обнаружение ошибки и повторную передачу составят всего 2001 бит на 1 Мбит данных против 10 000 бит, необходимых для кода Хэмминга.


Компьютер
Приложение
Операционная система
Сеть
Драйвер
Соединение
Соединение
Сетевая интерфейсная карта
Физический уровень
Кабель
(среда передачи данных)

Процесс физического уровня и часть процесса канального уровня выполняются на специальном оборудовании: сетевой интерфейсной карте (Network Interface Card, NIC). Остальная часть процесса канального уровня и процесс сетевого уровня осуществляются на центральном процессоре (ЦП), являясь частью операционной системы. При этом программное обеспечение процесса канального уровня зачастую принимает вид драйвера устройства.