

Физический уровень

10 апреля 2026 г.

Максимальная скорость передачи данных по каналу

В 1924 Гарри Найквист доказал, что если произвольный сигнал проходит через низкочастотный фильтр с полосой пропускания B , то для его полного восстановления понадобится произвести $2B$ дискретных измерений в секунду.

Максимальная скорость передачи данных по каналу

Если сигнал состоит из V дискретных уровней, то теорема Найквиста гласит:

Максимальная скорость передачи данных = $2B \log_2 V$ бис/с.

Например, по свободному от шумов каналу с полосой пропускания 3 кГц нельзя передавать двоичные (то есть двухуровневые) сигналы со скоростью выше 6000 бит/с.

Максимальная скорость передачи данных по каналу

S-мощность сигнала, N-мощность шума.

$$10 \log S/N$$

Децибелы. Отношение S/N для 10 равно 10 дБ, 100 – 20 дБ, 1000 – 30 дБ и т. д.

Максимальная скорость передачи данных (пропускная способность) зашумленного канала с полосой пропускания B Гц и отношением сигнал/шум S/N равна:

$$B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

бит/с

Например, полоса пропускания ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line — асимметричная цифровая абонентская линия), используемой для доступа в интернет по обычной телефонной линии, равна примерно 1 МГц. На SNR сильно влияет расстояние от квартиры до АТС; для коротких каналов связи (от 1 до 2 км) SNR около 40 дБ считается очень неплохим. При таких характеристиках канал связи не может передавать со скоростью выше 13 Мбит/с,

Процесс преобразования битов в сигналы и наоборот называется **цифровой модуляцией** (digital modulation).

Непосредственное преобразование битов в сигнал. В этом случае происходит **передача сигналов в базовой полосе** (baseband transmission): сигнал занимает частоты от нуля до максимума, возможного при данной скорости передачи.

При передаче за счёт изменяющие амплитуды, фазы или частоты несущего сигнала происходит **передача сигналов в полосе пропускания** (passband transmission): сигнал занимает полосу частот, близкую к частоте несущего сигнала.

В простейшем варианте цифровой модуляции 1 бит выражается положительным напряжением, а 0 бит — отрицательным, в случае оптоволоконна есть свет - 1, нет - 0. Схема носит название NRZ (Non-Return-to-Zero, «без возврата к нулю»). Оно лишь означает, что сигнал формируется в соответствии с данными.

Цифровая модуляция

(а) Битовый поток

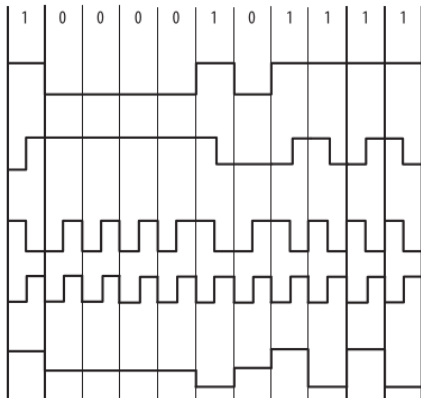
(б) «Без возврата к нулю» (NRZ)

(в) Инвертированный NRZ (NRZI)

(г) Манчестерское кодирование

(Исключающее ИЛИ тактового сигнала с битами)

(д) Биполярное кодирование
(Кодирование с чередованием полярности импульсов, AMI)



На другом конце приемник преобразует сигнал в биты, производя выборку через равные промежутки времени. Этот сигнал не будет в точности похож на отправленный сигнал. Он ослабляется и искажается каналом и шумом на стороне приемника.

При использовании NRZ сигнал может перескакивать между положительным и отрицательным уровнями чуть ли не каждые 2 бита (когда единицы и нули меняют друг друга). Поэтому для скорости передачи данных в B бит/с необходима полоса пропускания минимум $B/2$ Гц, как следует из уравнения Найквиста

Для всех схем, кодирующих биты в символы, приемник должен знать, когда заканчивается один символ и начинается следующий, чтобы правильно декодировать биты.

Одна из возможных стратегий — отправка на приемник отдельного синхросигнала. Еще одна тактовая линия не проблема для компьютерных шин или коротких кабелей, и так содержащих множество параллельных линий связи. Но в большинстве сетевых подключений она станет напрасной тратой ресурсов — по дополнительной линии разумнее отправлять данные.

Чтобы обойтись без нее, можно воспользоваться хитростью: соединить синхросигнал с информационным, применив к ним операцию XOR («исключающее ИЛИ»).

Уровень тактового сигнала меняется при каждой передаче бита, поэтому тактовый генератор должен работать со скоростью, вдвое превышающей битрейт. Логический «0» кодируется (с помощью XOR) тактовым переходом с низкого уровня на высокий, то есть просто самим тактовым сигналом. А при операции XOR с высоким уровнем он меняется на противоположный и происходит тактовый переход с высокого уровня на низкий. Этот переход соответствует логической «1».

Такая схема, применявшаяся в классических сетях Ethernet, называется манчестерским кодированием (Manchester encoding)

Недостаток этой схемы в том, что из-за тактового генератора полоса пропускания должна быть в два раза больше по сравнению с NRZ (а мы помним, что полоса пропускания — ценный ресурс).

Еще одна стратегия — закодировать данные, обеспечив достаточное количество тактовых переходов в сигнале. Ведь у схемы NRZ возникают проблемы с восстановлением тактового сигнала только в случае длинных цепочек нулей и единиц. При частых тактовых переходах синхронизировать приемник с поступающим потоком символов будет несложно.

Для начала можно упростить задачу, закодировав «1» в виде тактового перехода, а «0» — в виде его отсутствия, либо наоборот. Это вариация NRZ — **инвертированный NRZ** (Non-Return-to-Zero Inverted, NRZI).

Он используется в популярном стандарте подключения периферийных устройств — USB (Universal Serial Bus, универсальная последовательная шина). При такой схеме длинные последовательности единиц не проблема.

Остается решить вопрос с длинными цепочками нулей. Телефонная компания могла бы потребовать от абонента не отправлять слишком много нулей подряд. В США старые цифровые телефонные каналы T1 (мы обсудим их далее) имели ограничение в 15 последовательных нулей.

Передача в полосе пропускания

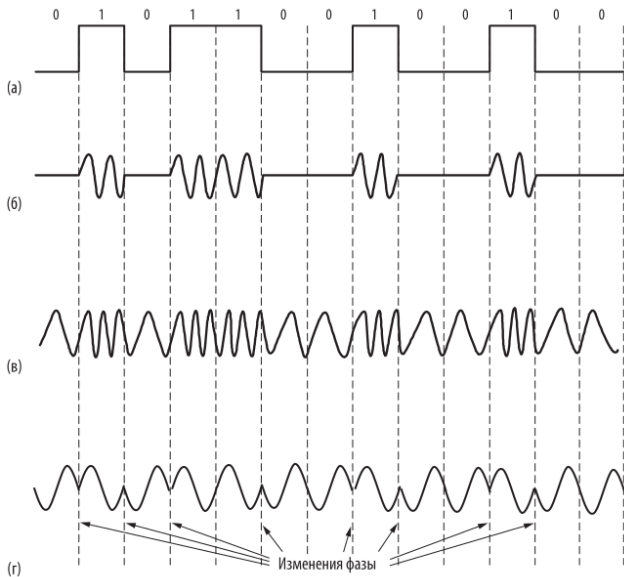
При сдвиге сигнала, занимающего основную полосу частот от 0 до B Гц, на полосу частот от S до $S+B$ Гц объем информации в сигнале не поменяется, хотя сам он будет выглядеть иначе. А чтобы обработать сигнал на приемнике, его можно сдвинуть назад до основной полосы частот, где удобнее находить символы.

Передача в полосе пропускания

При полосовой передаче сигналов цифровая модуляция производится путем модуляции несущего сигнала таким образом, чтобы он располагался в нужной полосе частот. Модулировать можно амплитуду, частоту и фазу несущего сигнала. У всех этих методов есть названия.

При кодировании со сдвигом амплитуды (Amplitude Shift Keying, ASK) «0» и «1» соответствуют две различные амплитуды.

Передача в полосе пропускания



Аналогично при **кодировании со сдвигом частоты** (Frequency Shift Keying, FSK) используется две или более различные тональности.

В простейшем варианте **кодирования со сдвигом фазы** (Phase Shift Keying, PSK) фаза несущей волны периодически смещается на 0 или 180 градусов на границе каждого символа. Этот вариант называется двоичным кодированием со сдвигом фазы (Binary Phase Shift Keying, BPSK), поскольку фаз две.

Мультиплексирование с частотным разделением каналов (Frequency Division Multiplexing, FDM) использует преимущества передачи в полосе пропускания.

Спектр делится на диапазоны частот, и каждый пользователь получает эксклюзивный доступ к определенной полосе для отправки сигналов.

АМ-радиовещание хорошо иллюстрирует FDM. Выделенный на него спектр частот составляет около 1 МГц (примерно от 500 до 1500 кГц). Логическим каналам (станциям) выделяются разные частоты, и каждый из них работает только в своей части спектра. При этом каналы достаточно разделены между собой для предотвращения взаимных помех.

Ниже показаны три голосовых телефонных канала, мультиплексированных при помощи FDM. Доступная полоса пропускания ограничена фильтрами: примерно до 3100 Гц на каждый голосовой канал. При мультиплексировании нескольких каналов вместе на каждый выделяется полоса 4000 Гц. Избыточная полоса пропускания называется защитной полосой частот (guard band) и служит для более надежного разделения каналов.

Сначала голосовые каналы поднимаются по частоте, каждый — на свою величину. Затем их можно объединить, поскольку теперь они все занимают различные части спектра частот. Несмотря на наличие промежутков между каналами благодаря защитным полосам, смежные каналы немного пересекаются. Это происходит потому, что на практике фильтры не производят четкого среза частот. А значит, сильный всплеск на границе одного канала будет ощущаться как нетепловой шум в смежном с ним.

Одна из альтернатив FDM — мультиплексирование по времени (Time Division Multiplexing, TDM). Пользователям по очереди (циклически) предоставляется полная полоса пропускания на определенный интервал времени.

Мультиплексирование



TDM широко применяется в качестве ключевого метода работы телефонных и сотовых сетей.

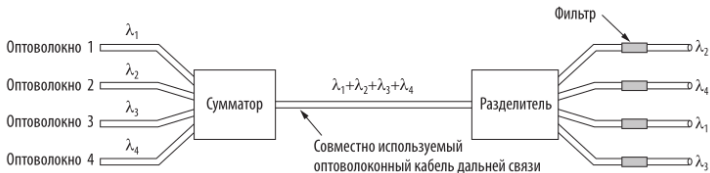
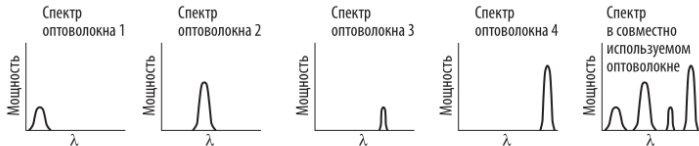
Метод мультиплексирования со статистическим разделением по времени (Statistical Time Division Multiplexing, STDM). Слово «статистический» здесь указывает, что отдельные потоки вносят свой вклад в общий поток не по фиксированному расписанию, а согласно статистике их потребностей. По сути, STDM представляет собой коммутацию пакетов, только под другим названием.

Существует и третий вид мультиплексирования, работающий совершенно иначе, чем FDM и TDM. **Мультиплексирование с кодовым разделением каналов** (Code Division Multiplexing, CDM) представляет собой разновидность связи с расширением спектра, при которой узкополосный сигнал «размывается» по более широкой полосе частот.

несколько сигналов от разных пользователей могут совместно использовать одну полосу частот. Именно для этого CDM чаще всего и используется, поэтому обычно его называют **множественным доступом с кодовым разделением каналов** (Code Division Multiple Access, CDMA).

Мультиплексирование по длинам волн (Wavelength Division Multiplexing, WDM) — разновидность FDM, при которой несколько сигналов мультиплексируется в одном оптоволокне при помощи различных длин волн света.

Мультиплексирование



Четыре оптоволокна объединяются в оптическом сумматоре; энергия в каждом из них транслируется на своей длине волны. Четыре пучка света объединяются в одном общем оптоволокне для передачи в некую удаленную точку. На дальнем конце системы луч разделяется на исходное число оптических волокон. Сердечник каждого из них на выходе специально подбирается так, чтобы отфильтровывать все длины волн, кроме одной.

В этом методе ничего нового для нас нет. Это просто FDM на очень высоких частотах, а термин WDM описывает оптоволоконные каналы через длины волн («цвета»), а не частоты. Для мультиплексирования каналов в оптоволоконном кабеле дальней связи достаточно выделить каждому каналу свой диапазон частот (то есть длин волн).

Мультиплексирование

Мультиплексирование

Мультиплексирование

Мультиплексирование