

Часть 4. Технологии битовых потоков

1. Передача цифровых данных электромагнитными сигналами

1.1 Элементы теории

Сигнал характеризуется информационным параметром (и.п.): амплитудой, частотой, фазой или их комбинацией. Количество возможных состояний и.п. в передаваемом сигнале (M) задается как $M = 2^n$, где n – целое число от 1. Число изменений и. п. сигнала в секунду измеряется *бодами* (*бодрейт*). Величина сигнала – разница между соседними состояниями и.п.

Скорость передачи данных C определяется в *бит/с* (*битрейт*). Число битов, задаваемых одним состоянием и.п., равно n . Если $n > 1$, то значение скорости в бит/с превышает значение в бодах.

Проводная передача двоичных данных (витая пара, коаксиальный и оптический кабели)

Чувствительность приемника рассчитана на определенную величину сигнала, поэтому реальное значение C зависит от:

- ослабления сигнала при удалении от передатчика,
- искажения из-за различных скоростей распространения частотных составляющих сигнала (две причины использования повторителей),
- помех (причина использования методов обнаружения и исправления ошибок).

В частности, с учетом теплового шума сформулирована теорема Шеннона:

$$C_T = B \times \log_2(1 + P_C / P_{\text{ш}}),$$

где C_T – теоретическая скорость передачи данных, B – частотная полоса канала, P_C – мощность сигнала, $P_{\text{ш}}$ – мощность шума.

(Таким образом, чем больше M , тем выше C , но, с другой стороны, тем «тоньше» P_C и меньше $P_C / P_{\text{ш}}$. Это справедливо для всех типов помех.)

Беспроводная передача данных (атмосфера, космос)

Сигнал данных от передающей к приемной антенне имеет несущую частоту f и формируется в спектре F при модуляции f источником дискретных данных. Чем больше C , тем шире F . Но расширение F требует увеличения мощности передатчика и/или чувствительности приемника. Реальная скорость п.д. в значительной степени определяется балансом этих факторов.

1.2 Основные типы физической среды

Проводная передача данных

Витая пара

Дешевизна, технологичность укладки.

Неэкранированная (unshielded twisted pair, UTP) и экранированная (shielded twisted pair, STP).

Дальняя связь – 5-15 Мбит/с, до 2 км; ближняя связь – 10-40 Гбит/с, до 15 - 50 -100 метров.

Оптоволокно (волоконно-оптические линии связи, ВОЛС, fiber).

Широкая полоса, малое затухание, отсутствие помех, долговечность.

Многомодовое (относительная дешевизна): 100 Мбит/с – до 2 км, 1 Гбит/с – 220 – 550 м.

Одномодовое (широкая полоса): до 50 Гбит/с при расстояниях до 100 км.

Беспроводная передача данных

Связь через труднодоступную или не подлежащую деформации территорию, мобильность узлов сети, широкополосность.

Микроволновой частотный диапазон от 300 МГц.

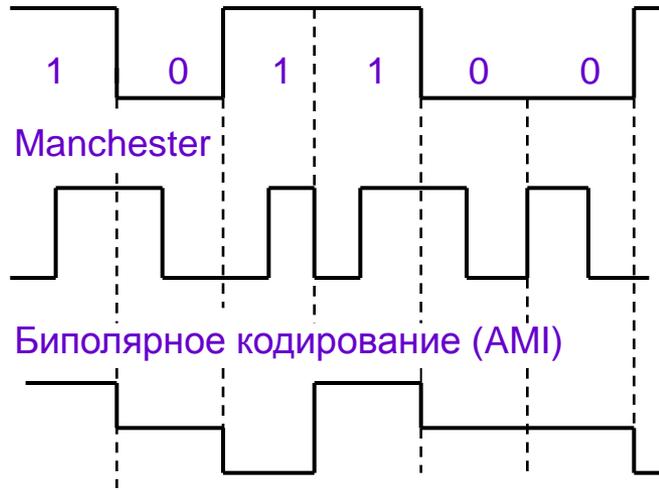
Возможность передачи данных со скоростью от единиц до нескольких десятков Гбит/с.

1.3 Кодирование цифровых сигналов

1.3.1 Цифровые данные, цифровые сигналы

Электрические сигналы

NRZ-L



Non-Return-to-Zero-Level

Невозможность самосинхронизации (все «0» или 1»)

Постоянная составляющая спектра сигнала.

Решение проблемы NRZ-L в локальных сетях.

Манчестерское кодирование и его модификации.

Расширение спектра, дорого в глобальных сетях.

Amplitude Mark Invasion (инверсия - pseudo-ternary)

Сужение спектра, обнаружение ошибок.

Проблема потери синхронизации:

(длинные «0» - AMI, длинные «1» - pseudo-ternary)

Скремблирование B8ZS для AMI (США):

Октет «0» с предшествующим положительным импульсом: 0 0 0 + - 0 - +

отрицательным импульсом: 0 0 0 - + 0 + -

} два нарушения
в 8 разрядах

Оптические сигналы (2 уровня)

Логическое кодирование, избыточные коды.

Исходный код разбивается на группы по N битов, которые при передаче преобразуются в группы по M битов, где $M > N$.

Пример: 4В / 5В (N=4, M=5). Из 32 комбинаций по 5 битов выбираются 16, в которых не встречается больше 3-х последовательных нулей для минимизации постоянной составляющей в цепях передатчика и приемника. Необходимо увеличение скорости в 1.25 раз.

Возможны и другие комбинации. Например, широко используется кодировка 8В/10В.

1.3.2 Цифровые данные / аналоговый сигнал (модуляция / демодуляция)

Необходимость передачи цифровых данных через абонентские линии ТФ-сети с полосой 300-3400 гц. Спектр сигнала в кодировке NRZ-L не вписывается в эту полосу. Решение – сужение спектра за счет модуляции информационного параметра цифровым сигналом (shift keying, SK):

амплитудная модуляция (ASK),

частотная модуляция (FSK),

фазовая модуляция (PSK).

Повышение скорости передачи данных достигается при увеличении числа уровней модуляции. Основные технологии:

- «утонышение» разницы значений информационного параметра, например, при фазовой модуляции $A \times \cos(2\pi f_c t + \varphi)$ сигнала с несущей частотой f_c :

BPSK ($\varphi = \pi$)	кодирование 1-го бита
QSPK	$\pi/2$ 2-х битов
8-PSK	$\pi/4$ 3-х битов
16-PSK	$\pi/8$ 4-х битов

и более совершенные.

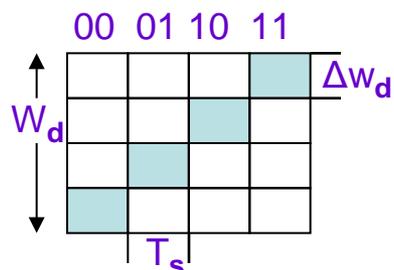
- многочастотная модуляция (Multiple FSK, MFSK) – разбиение единого потока данных на несколько потоков с меньшей скоростью, каждый из которых модулируется своей несущей.
- комбинированные виды модуляции – сочетание фазовой и амплитудной модуляции (quadrature amplitude modulation, QAM): от 16-QAM до 256-QAM.

1.3.3 Цифровые данные / аналоговый сигнал с расширением спектра (беспроводная связь)

Расширение спектра скачкообразной перестройкой частоты (frequency-hopping spread spectrum, FHSS)

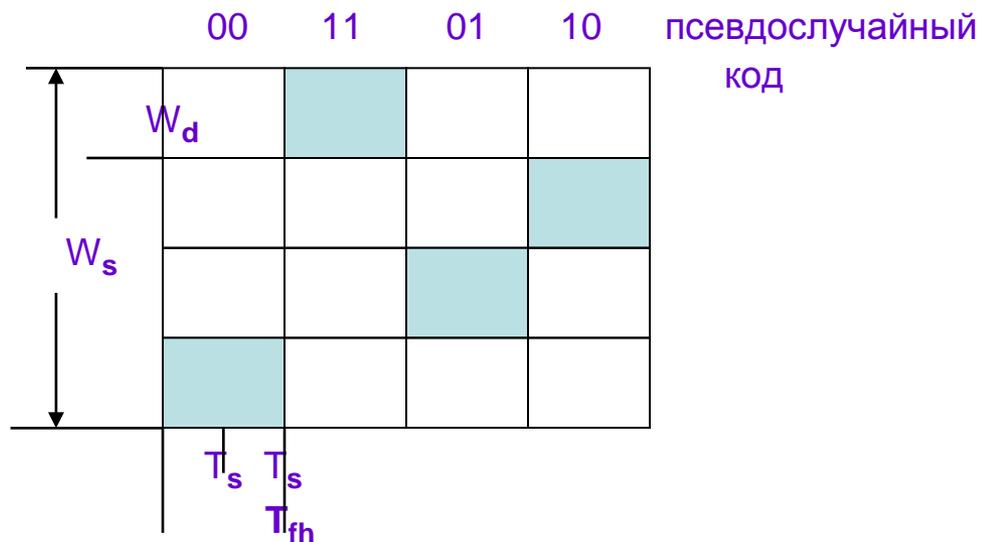
Пример:

MFSK-модуляция



- Δw_d – спектр 2-х битового сигнала
- W_d – общий спектр сигналов MFSK
- T_s – такт сигналов MFSK
- W_s – общий спектр сигналов FHSS
- T_{fh} – такт сигналов FHSS

FHSS - модуляция



Генератор псевдослучайного кода в передатчике вырабатывает два бита, задающие смещение спектра W_d в диапазоне $W_s = 4W_d$. Смещение изменяется после каждой последовательной передачи четырех битов данных.

В приемнике генератор, формирующий тот же псевдослучайный код, управляет FHSS – демодулятором, после которого сигнал восстанавливается MFSK-демодулятором.

Расширение спектра методом прямой последовательности (direct sequence spread spectrum, DHSS)

Пример: DHSS при использовании фазовой модуляции BPSK

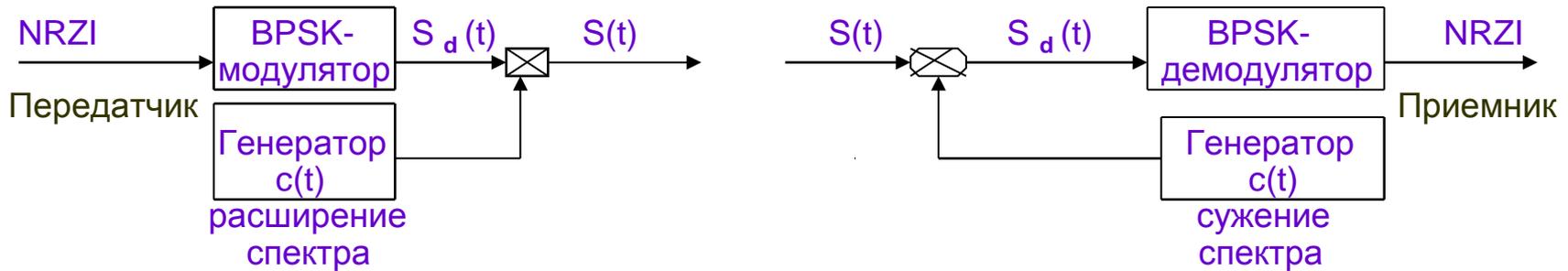
Модуляция BPSK: $S_d(t) = A \times d(t) \times \cos 2\pi f_c t$ $d(t) = 1$ (бит 1) / -1 (бит 0).

Модуляция DHSS: $S(t) = A \times d(t) \times c(t) \times \cos 2\pi f_c t$,

где $c(t)$ – m -разрядная псевдослучайная последовательность двоичных сигналов (чипов).

В приемнике $S(t)$ еще раз модулируется сигналом $c(t)$, компенсируя модуляцию в передатчике:

$S(t) \times c(t) = A \times d(t) \times \underbrace{c(t)}_1 \times \underbrace{c(t)}_1 \times \cos 2\pi f_c t = C_d(t)$ – восстановление.



Δf_d – спектр $S_d(t)$ – узкий

Δf_c - спектр $c(t)$ – широкий

$\Delta f_d + \Delta f_c$ – расширенный спектр $S(t)$

Преимущества технологий беспроводной передачи данных с расширением спектра:

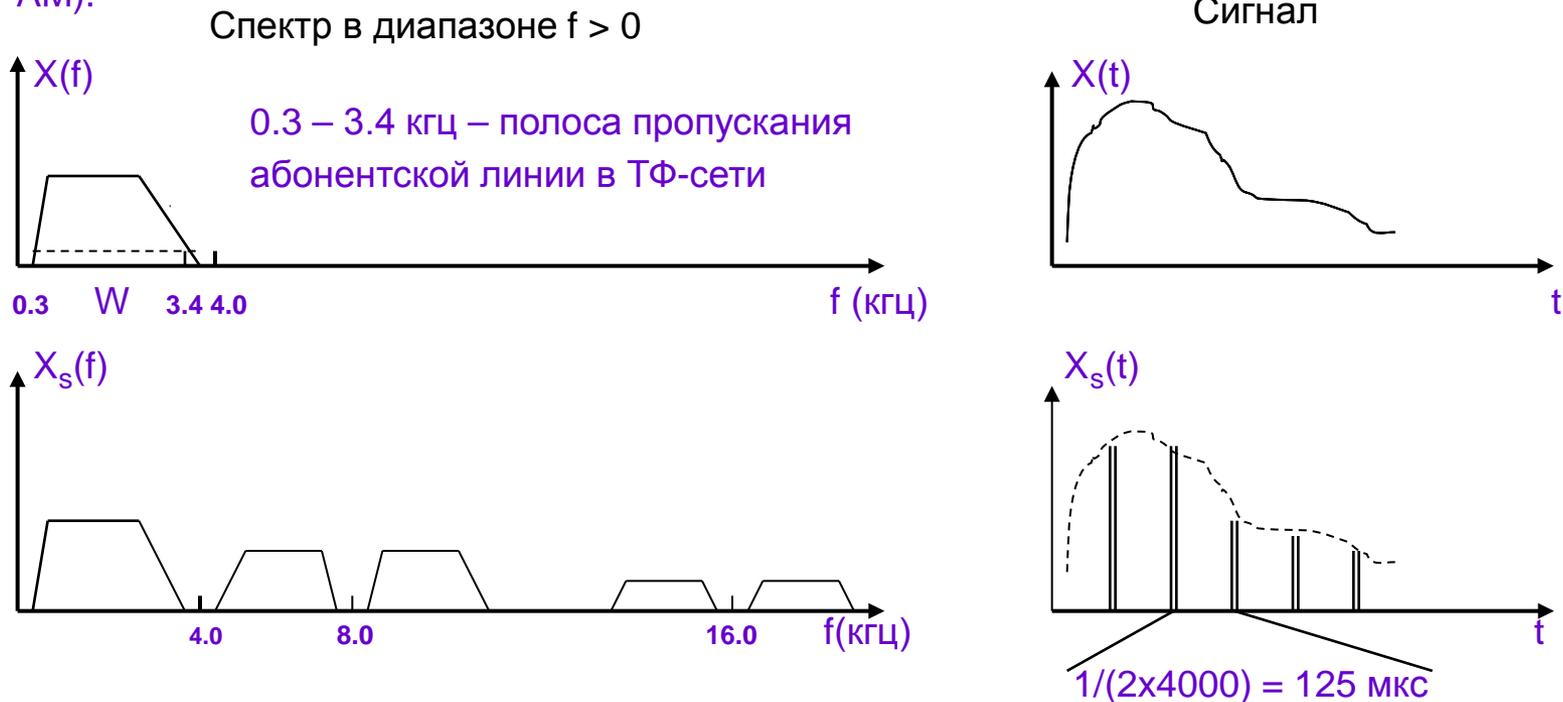
1. Шифрование путем использования генераторов псевдослучайного кодирования
2. Мощность сигнала помехи в приемнике при демодуляции FHSS и DHSS распределяется по расширенному спектру. Следующие далее фильтры низкочастотных демодуляторов отсекают его большую часть.

1.3.4. Аналоговые данные / цифровой сигнал

1.3.4.1 Теорема о дискретном представлении (The Sampling Theorem)

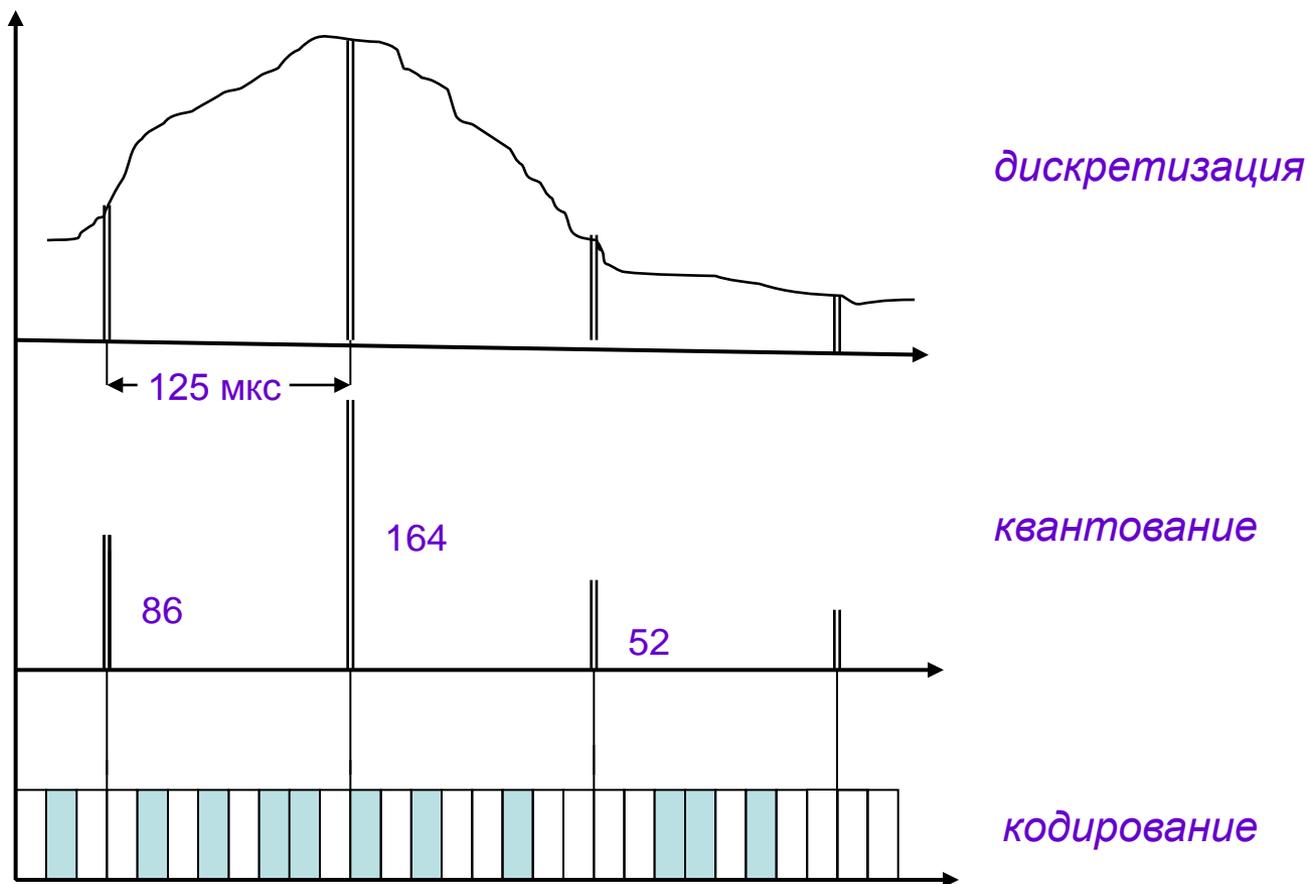
Если из входного сигнала $X(t)$ со спектром $X(f)$ шириной W брать импульсные выборки (дискретизация с частотой $f_s = 1/T_s$), образующие сигнал $X_s(t)$, то сигнал $X(t)$ можно восстановить непосредственно из сигнала $X_s(t)$ тогда и только тогда, когда $f_s \geq 2W$ ($T_s \leq 1/2W$).

Импульсная выборка называется амплитудно-кодовой модуляцией (pulse-amplitude modulation, PAM).



Прохождение результирующего после дискретизации сигнала $X_s(t)$ через фильтр с полосой f_s (4000 гц) восстанавливает входной сигнал.

1.3.4.2 Принцип импульсно-кодовой модуляции
(pulse-code modulation. PAM),
используемый при цифровой передаче голоса в ТФ-сетях



$$C = 8 / (125 \times 10^{-6}) = 64 \text{ кбит/с}$$