

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

Л. И. Аверина

# **СИСТЕМЫ ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ**

Учебное пособие

Воронеж  
Издательский дом ВГУ  
2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ.....	5
1.1. Структура передающего тракта системы цифровой связи.....	7
1.1.1. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП).....	7
1.1.2. Кодер источника.....	9
1.1.3. Кодер канала.....	9
1.1.4. Модулятор.....	12
1.2. Структура приемного тракта цифровой системы связи.....	17
Глава 2. КАНАЛЫ СВЯЗИ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	19
2.1. Математические модели каналов связи.....	22
2.2. Выравнивание канальных искажений.....	23
Глава 3. ЦИФРОВЫЕ ВИДЫ МОДУЛЯЦИИ.....	26
3.1. Амплитудные виды модуляции.....	26
3.1.1. ООК- и ASK-манипуляции.....	26
3.1.2. Многопозиционная амплитудная модуляция (M-ASK).....	29
3.2. Фазовые виды модуляции.....	30
3.2.1. Двоичная фазовая модуляция (BPSK).....	30
3.2.2. Квадратурная фазовая модуляция (QPSK).....	31
3.2.3. Многопозиционная фазовая модуляция (M-PSK).....	34
3.3. Амплитудно-фазовые виды модуляции.....	34
3.4. Частотные виды модуляции.....	35
3.4.1. Двоичная частотная модуляция (FSK).....	35
3.4.2. Многопозиционная частотная модуляция (M-FSK).....	36
3.4.3. Частотная модуляция с минимальным сдвигом (MSK).....	36
3.4.4. Виды частотной модуляции с ограниченным спектром (GFSK, GMSK).....	38
3.5. OFDM-технология модуляции сигнала.....	39
3.5.1. Технология частотного разнесения.....	39
3.5.2. Технология OFDM.....	41
4. Глава 4. СРАВНЕНИЕ ВИДОВ МОДУЛЯЦИИ.....	44
Библиографический список.....	48

На этапе *форматирования* исходная информация преобразовывается в биты. Информация остается в форме *потока битов* вплоть до этапа импульсной модуляции.

*Импульсная модуляция* — преобразование информационных символов, подлежащих передаче, из двоичного представления (нули и единицы) в *видеосигнал* (baseband signal) — *модулированный сигнал*. Фильтрация, производимая в блоке импульсной модуляции, позволяет формировать импульсы, длительность которых больше времени передачи одного бита, что позволяет расширять импульсы на соседние временные интервалы передачи битов. Процесс формирования импульсов используется для поддержания полосы передачи в пределах некоторой желаемой области спектра.

*Полосовая модуляция* (bandpass modulation) необходима всегда, когда среда передачи не поддерживает распространения сигналов, имеющих форму импульсов. То есть среда требует *полосового сигнала*, формируемого путем сдвига видеосигнала несущей волной на частоту, гораздо большую частоты его спектральных составляющих.

*Передачик* состоит из схемы повышения частоты в область радиочастот (radio frequency), усилителя мощности и антенны. Далее сигнал проходит через *канал*, причем связь между входным и выходным сигналами канала полностью определяется *импульсной характеристикой канала*. (Более подробно виды модуляции и виды каналов будут рассмотрены в дальнейшем.)

*Приемник* состоит из антенны и малошумящего усилителя (low-noise amplifier). При обработке полученного сигнала в принимающем устройстве частота каждого полосового сигнала понижается. На этапе *демодуляции* (demodulation) полосовой сигнал восстанавливается в виде оптимальной огибающей видеосигнала. В случае если имеют место искажения принимаемого сигнала, вызванные неидеальной импульсной характеристикой канала, для их *компенсации* (то есть для удаления или ослабления) используется устройство выравнивания (*эквалайзер*).

На этапе *дискретизации* сформированный импульс преобразовывается в выборку для восстановления символов сообщения. Далее, на этапе *детектирования* (detection), принимается решение относительно цифрового значения сигнала. Блок *синхронизации* участвует во всех этапах обработки сигнала в системе цифровой связи.

Остальные блоки обработки сигнала, приведенные на рис. 1, являются необязательными. Они обеспечивают специфические системные нужды. Так, *кодирование источника* (source coding) — блок оцифровки и сжатия (удаления) избыточной информации. *Шифрование* обеспечивает секретность связи путем предотвращения несанкционированного доступа к передаваемой информации и введения в систему ложных сообщений. *Канальное кодирование* (channel coding) при данной скорости передачи информации

позволяет уменьшить отношение сигнал/шум или снизить вероятность ошибки  $P_E$  за счет увеличения передачи или усложнения декодера. Процедуры *уплотнения* (multiplexing) и *множественного доступа* (multiple access) объединяют сигналы, имеющие различные характеристики или поступающие из разных источников, для возможности совместного использования ими ресурсов связи (спектр, время). *Расширение частоты* (frequency spreading) позволяет получить сигнал, относительно неуязвимый для интерференции; может использоваться для повышения конфиденциальности сеанса связи или для множественного доступа.

## 1.1. Структура передающего тракта системы цифровой связи

При определенных физических характеристиках канала передачи эффективность системы связи определяется свойствами передатчика и приемника. Рассмотрим более подробно структуру передающей части системы цифровой связи (рис. 2).

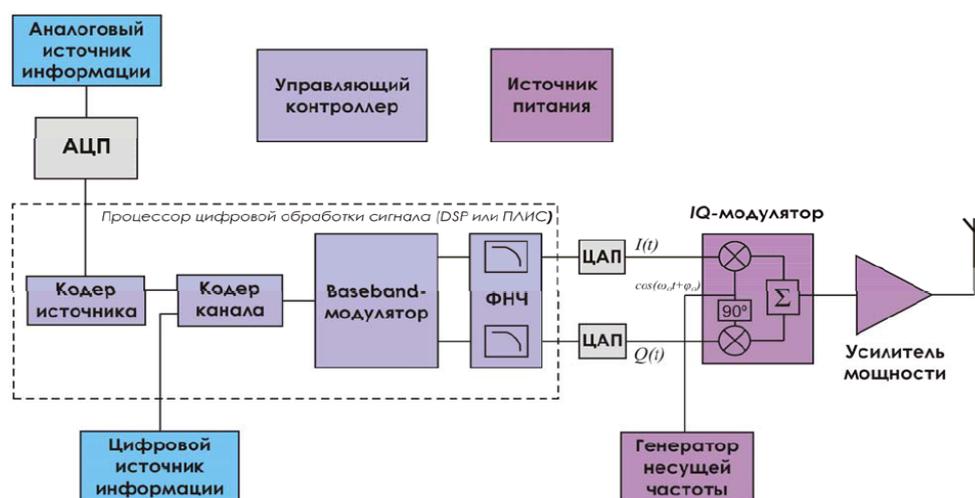


Рис. 2. Структурная схема передающего тракта системы цифровой связи

### 1.1.1. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)

В случае если источник информации формирует данные в аналоговом виде, выполняется их преобразование в цифровой с помощью АЦП (аналого-цифрового преобразователя). Преобразование производится путем осуществления двух операций: *дискретизации во времени* и *квантования по уровню* (рис. 3). Дискретизация во времени — взятие отсчетов (измерений) уровня аналогового сигнала в определенные моменты времени, разделяемые *интервалом дискретизации*. Полученный сигнал называется *дискретным сигналом*. Таким образом, значения уровня аналогового сигнала, опре-

деленного для всех моментов времени, сохраняются только для определенных (дискретных) моментов времени.

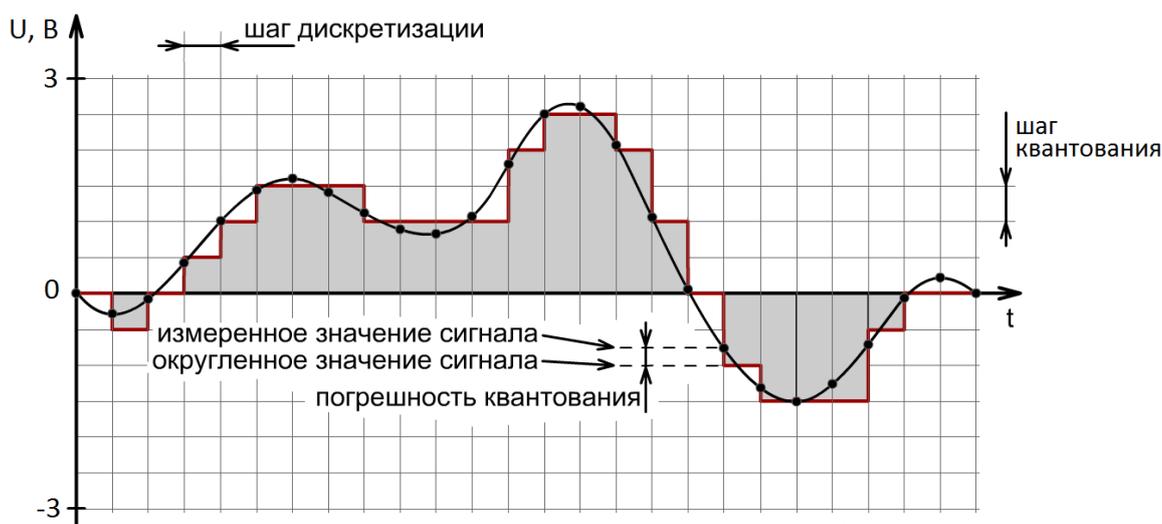


Рис. 3. Дискретизация сигнала

Дискретизация выполняется в соответствии с *теоремой Котельникова* (Найквиста), согласно которой сигнал может быть полностью восстановлен по последовательности своих отсчетов только в том случае, если они взяты с частотой дискретизации, равной или превышающей двойную максимальную частоту в спектре исходного сигнала:

$$f_d > 2f_{max}$$

Восстановление сигнала выполняется согласно следующей формуле:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s_k \frac{\sin(\omega_{max}t - k\pi)}{\omega_{max}t - k\pi},$$

где  $\omega_{max} = 2\pi f_{max}$ ,  $s_k$  — отсчеты сигнала. Отсюда видно, что сигнал может быть точно восстановлен, если он измерен на всей временной оси. Поэтому для реальных, ограниченных во времени сигналов будут иметь место ошибки восстановления, максимальные вблизи начала и конца сигнала. Ошибок можно избежать, применив сглаживание краев сигнала *оконной функцией*.

Необходимость квантования сигнала по уровню вытекает из ограниченной разрядности АЦП. С повышением разрядности аналого-цифрового преобразования резко возрастают сложность вычислений, затраты на память и время обработки сигнала. Квантование представляет собой разбиение интервала возможных значений уровня сигнала на эквидистантные интервалы. Затем для каждого измеренного значения уровня сигнала выбирается наиболее близкое дискретное значение уровня. Разность между измеренным и квантованным значением сигнала называется *ошибкой квантования*. Таким образом, цифровой сигнал является дискретным по времени и по уровню.

### 1.1.2. Кодер источника

Чем меньше объем информации, который необходимо передать в единицу времени, тем меньше ошибок произойдет при передаче, меньше требуемая полоса частот и энергия, которую необходимо затратить на передачу. Поэтому в случае необходимости сжатия информации с выхода аналого-цифрового преобразователя сигнал поступает на кодер источника.

Цифровые источники обычно не кодируются (исходная информация либо уже закодирована, либо тип информации заранее неизвестен и оптимальный метод кодирования выбрать трудно). Аналоговые же источники обладают значительной избыточностью. Поэтому объем передаваемой информации может быть сокращен без потери качества (либо с приемлемой потерей качества).

Существует два основных пути сжатия информации: устранение избыточности информации и создание физической модели источника информации.

В первом случае создается физическая модель избыточности информации. Например, если изменения амплитуды между последовательными отсчетами информационного сообщения в среднем малы, т. е. имеется значительная корреляция между последовательными отсчетами, то кодируется не абсолютное значение амплитуды, а ее изменение между соседними отсчетами. Для представления разностного сигнала потребуется меньший объем информации. Такой способ кодирования источника называется дифференциальной импульсно-кодовой модуляцией (ДИКМ).

В случае если имеется физическая модель источника информации, то вместо отсчетов сигнала передают параметры модели и их изменение. Такой способ кодирования (например, линейное кодирование с предсказанием — ЛКП, применяемое в системах GSM) снижает скорость передачи данных до нескольких порядков.

В таблице 1 приведены различные методы кодирования источника при скорости передачи несжатой информации 96 кбит/с (под импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ) подразумевается случай отсутствия кодирования).

### 1.1.3. Кодер канала

Кодер канала присутствует практически во всех современных системах цифровой связи. Процедура *канального кодирования* предназначена для повышения достоверности передаваемой информации и заключается в добавлении избыточности к передаваемому сообщению, которая может быть использована для обнаружения и коррекции ошибок при приеме. Это приводит к очевидному снижению скорости передачи. Так, например, если передавать каждый байт информации несколько раз и принимать решение по числу максимальных совпадений, то достоверность увеличится, но при существенном падении скорости.

Т а б л и ц а 1

Метод кодирования	Квантователь	Разрядность, бит	Скорость передачи, бит/с
ИКМ	Линейный	12	96000
ЛогИКМ	Логарифмический	7..8	56000..64000
ДИКМ	Логарифмический	4..6	32000..48000
АДИКМ	Адаптивный	3..4	24000..32000
ДМ	Двоичный	1	32000..64000
АДМ	Адаптивный двоичный	1	16000..32000
ЛКП	Линейное кодирование с предсказанием		2400..4800

Процесс добавления избыточности к исходной информации с целью повышения достоверности передачи называется *помехоустойчивым кодированием*. Выполнение помехоустойчивого кодирования является основной задачей кодера канала.

Достоверность передачи информации в цифровых системах характеризуется *вероятностью ошибки на бит* (BER — Bit Error Rate), то есть вероятностью ошибочного приема при передаче одного бита информации, усредненной для статистически большого объема передаваемой информации.

Величиной, описывающей эффективность цифровой системы связи, является *пропускная способность*, характеризующая количество информации, которое может быть передано в системе связи в единицу времени со 100 % достоверностью. Пропускная способность измеряется в бит/с. Верхняя граница пропускной способности в системе при заданном отношении сигнал/шум в доступной полосе передачи устанавливается *теоремой Шеннона*:

$$C = W \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right),$$

где  $C$  — пропускная способность (бит/с),  $W$  — доступная ширина полосы пропускания системы (Гц),  $S$  — средняя мощность принятого сигнала,  $N$  — средняя мощность шума. Средняя мощность шума зависит от ширины полосы следующим образом:  $N = N_0 W$ , где  $N_0$  — спектральная плотность мощности шума. Для того чтобы получаемые соотношения содержали как можно меньшее число вторичных величин, при исследовании систем связи оперируют не отношением сигнал/шум, а величиной *отношения энергии бита к плотности мощности шума* —  $E_b/N_0$ . Энергия бита — это энергия, необходимая для передачи одного бита информации, равная произведению длительности бита на мощность передатчика. Таким образом, соотношение для теоремы Шеннона преобразуется к виду, который устанавливает зависимость отношения пропускной способности к доступной полосе от отношения энергии бита к плотности мощности шума (энергетической характеристики системы):

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{W}{C} (2^{C/W} - 1).$$