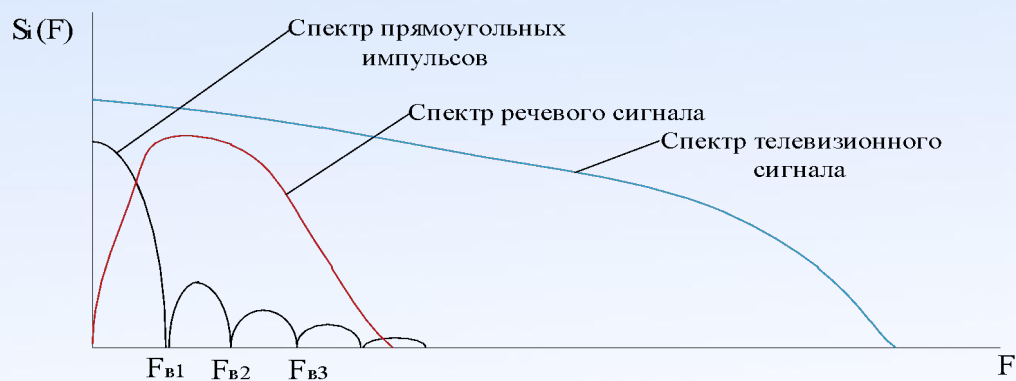


Лекция 4. Модуляция в системах связи

1. Общие сведения о первичных и модулированных сигналах.
2. Аналого-цифровое преобразование непрерывных сигналов.

1. Общие сведения о первичных и модулированных сигналах.

Первичные электрические сигналы (ПЭС) – это электрические сигналы на выходе кодеров источника (напряжение или ток), соответствующие передаваемому сообщению. По форме они могут быть самыми различными, но вот их спектры расположены практически в одной полосе частот от нуля до F_B , причём F_B определяется только длительностью сигнала



Основными и существенными недостатками ПЭС являются:

- взаимное перекрытие спектров и, как следствие, сильное влияние их друг на друга;
- рассогласование параметров сигналов с параметрами каналов передачи информации, откуда следует принципиальная невозможность передачи информации без значительных потерь;
- невозможность передачи информации на большие расстояния по радиоканалам;
- весьма большие размеры передающих и приёмных антенн. Например, передаваемый в сетях WiMax поток данных соответствует частоте в районе 11 кГц. Если мы попробуем передавать этот низкочастотный сигнал по воздуху, нам понадобится антенна следующих размеров:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ м/с}}{11 \times 10^3 \text{ Гц}} = 24 \text{ км}$$

Недостатки использования ПЭС для связи вытекают из формулы Введенского

$$E_{\text{пр}} = \frac{4\pi\sqrt{60P_{\text{изл}}Gh_1h_2}}{\lambda r^2},$$

где $E_{\text{пр}}$ – амплитуда напряжённости поля в точке приёма;

$P_{\text{изл}}$ – мощность излучения радиопередающего устройства;

G – коэффициент усиления передающей антенны;

λ – длина волны;

r – протяжённость линии радиосвязи – дальность радиосвязи;

h_1 и h_2 – высота подвеса передающей и приёмной антенн соответственно.

Для компенсации этих недостатков, повышения качества передачи информации и повышения скрытности, используется модуляция.

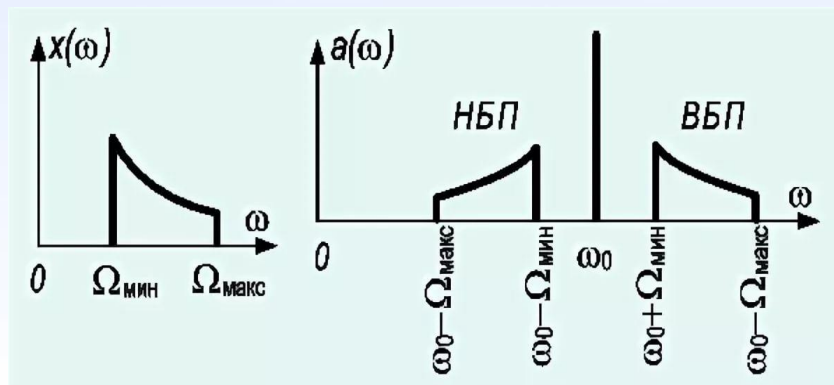
Модуляция (лат. *modulatio* — *размеренность, ритмичность*) - процесс изменения одного или нескольких параметров высокочастотного несущего колебания (амплитуда, частота или фаза) по закону низкочастотного информационного сигнала (сообщения).

Передаваемая информация заложена в управляющем (модулирующем) сигнале, а роль переносчика информации выполняет высокочастотное колебание, называемое несущим (модулируемым).

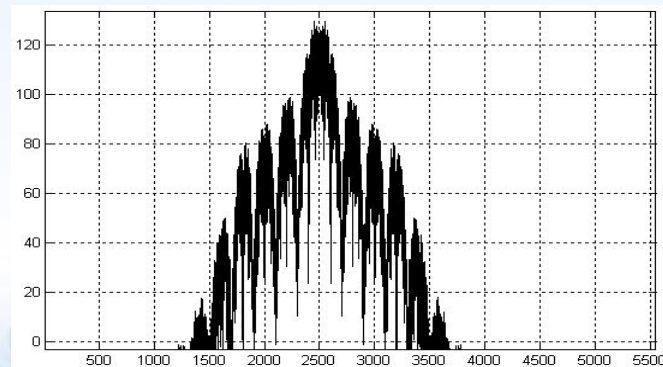
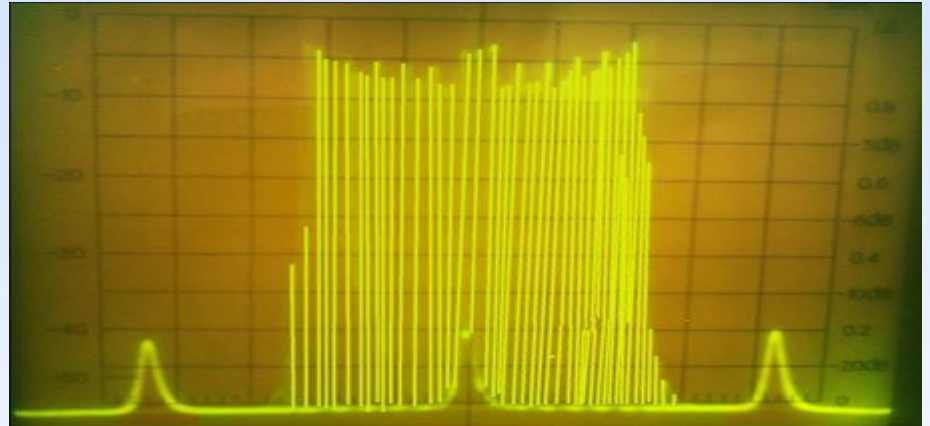
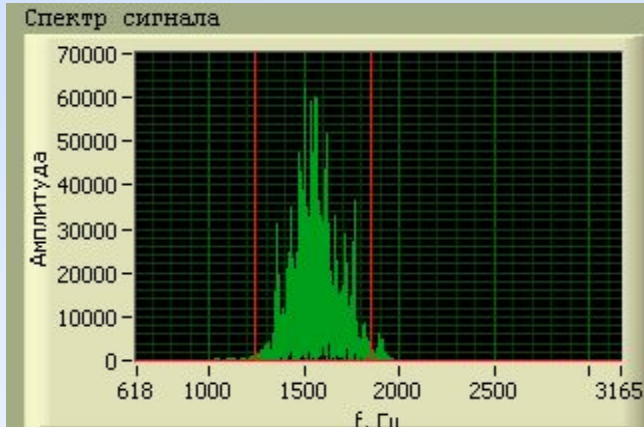
Модуляция, таким образом, представляет собой процесс «посадки» информационного колебания на заведомо известную несущую с целью получения нового, модулированного сигнала.

В результате модуляции спектр низкочастотного управляющего сигнала переносится в область высоких частот и преобразуется таким образом, чтобы обеспечить согласование сигнала с каналом передачи. Это позволяет при организации вещания настроить функционирование всех приёмопередающих устройств на разных частотах с тем, чтобы они «не мешали» друг другу.

Следует отметить, что при модуляции спектр ПЭС не только переносится на частоту несущей, но и появляется вторая (нижняя) боковая полоса, являющаяся зеркальным отражением первой (верхней), которая соответствует спектру ПЭС



Существует три вида модуляции – амплитудная (АМ), частотная (ЧМ) и фазовая (ФМ). Спектр сигналов с частотной и фазовой модуляцией принципиально не отличается от спектра АМ сигнала



Появление второй боковой полосы, в которой дублируется информация, заключённая в первой, снижает эффективную мощность передатчика, приходящуюся единицу информации (как минимум в два раза) и уменьшает эффективность использования полосы пропускания канала, тоже в два раза. Однако это неизбежная плата за повышение качества передачи информации.

В качестве несущего могут быть использованы колебания различной формы – синусоидальные, прямоугольные, треугольные и т.д.), причём для передачи информации применяются гармонические колебания. Импульсная несущая используется в основном на промежуточных этапах, например, на этапе преобразования аналогового сигнала в цифровой.

Модуляция дискретным сигналом называется цифровой модуляцией или манипуляцией.

Процесс модуляции

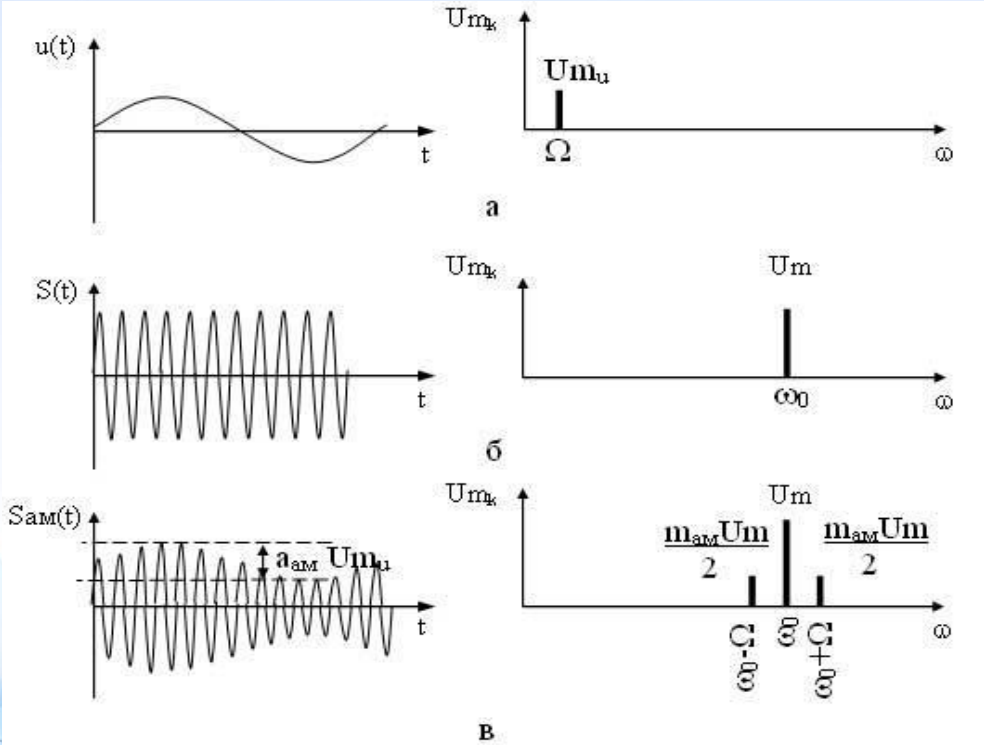
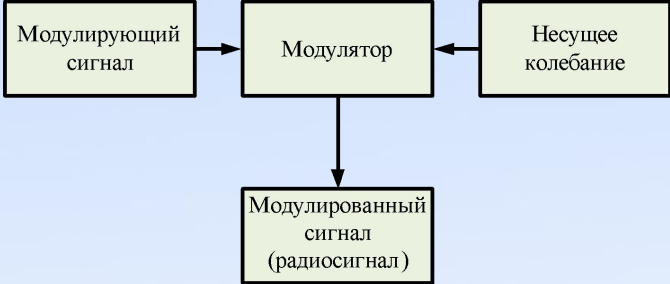
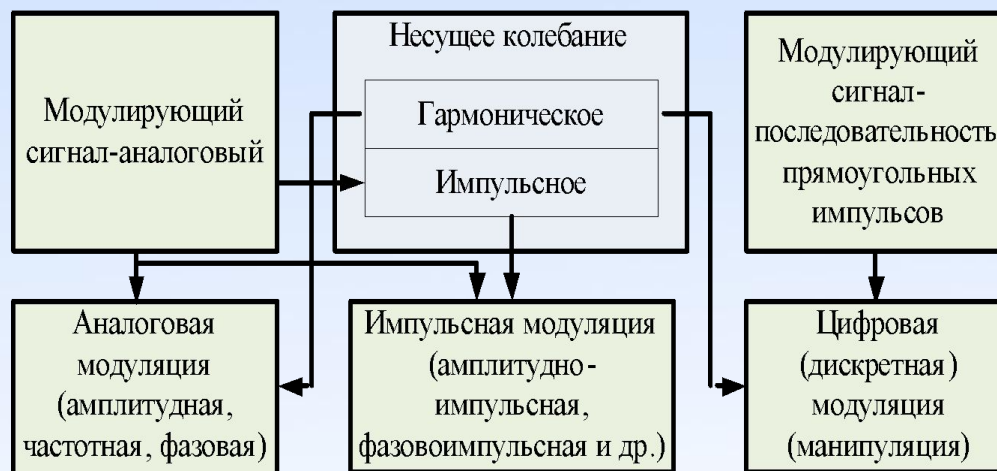
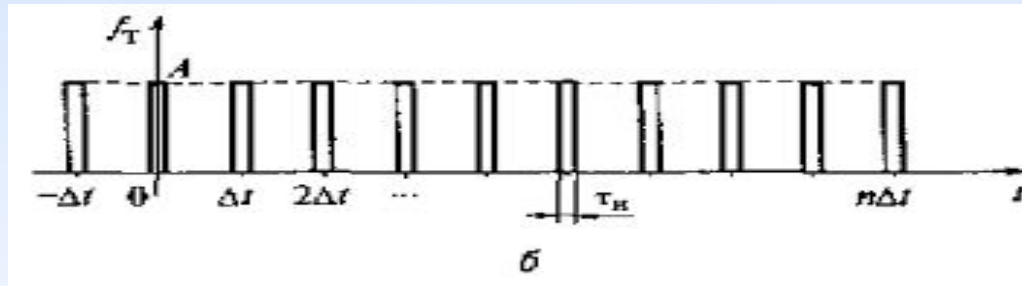


Схема процесса модуляции в зависимости от вида несущей и модулирующего сигнала



Два вида несущих колебания – синусоидальное и импульсное



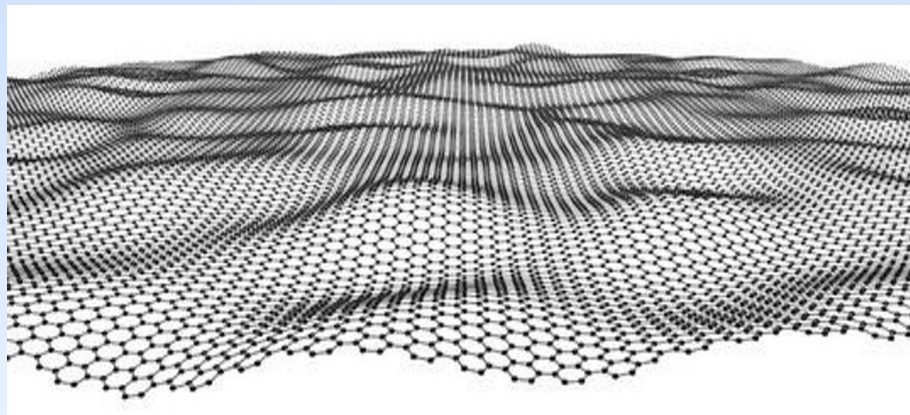
Использование модуляции позволяет:

- согласовать параметры сигнала с параметрами линии;
- повысить помехоустойчивость сигналов;
- увеличить дальность передачи сигналов;
- организовать многоканальные системы передачи (МСП с ЧРК);
- получить сигнал с базой $B \gg 1$, что позволяет передавать в одной полосе частот большое количество сигналов без их взаимного влияния, и существенно увеличить скрытность связи.

Нанотехнологии в модуляции

Группа физиков и инженеров из США и Республики Корея создала *наноразмерное устройство для частотной модуляции сигналов с частотой около ста мегагерц*. Это соответствует FM-диапазону. Добиться резкого уменьшения габаритов устройства удалось за счет замены кварцевого кристалла на **графеновый лист размером около миллиметра**. Он является **основой колебательной системы**, которая обеспечивает генерацию сигнала заданной частоты.

Графен — это двумерная аллотропная форма углерода, в которой объединённые в гексагональную кристаллическую решётку атомы образуют слой толщиной в один атом



Графен был открыт в 2004 году двумя выходцами из России - Андреем Геймом и Константином Новосёловым - которые, как это часто бывает, не смогли реализовать свой научный потенциал в родной стране и уехали работать в Нидерланды и Великобританию соответственно. За открытие графена Гейм и Новосёлов в 2010 году получили Нобелевскую премию по физике.

Графен обладает очень высокой прочностью. Лист графена площадью в один квадратный метр (и толщиной, напомним, всего лишь в один атом!) способен удерживать предмет массой 4 килограмма.

Вследствие двумерной структуры, графен является очень гибким материалом, что в будущем позволит использовать его, например, для плетения нитей (при этом тоненькая графеновая «верёвка» по прочности будет аналогична толстому и тяжёлому стальному канату).

Графен — это материал с очень высокой проводимостью электричества и тепла, что делает его идеальным для применения в различных электронных устройствах.

Ещё одно возможное применение графена — создание гибкой электроники и, в частности, гибких дисплеев. Широкое распространение графена наверняка даст хороший стимул развитию носимой электроники, поскольку позволит встраивать чипы в одежду, бумагу и другие повседневные вещи.

Также графеновая плёнка является отличным фильтром для воды, поскольку она пропускает молекулы воды и при этом задерживает все остальные.

2. Аналого-цифровое преобразование непрерывных сигналов.

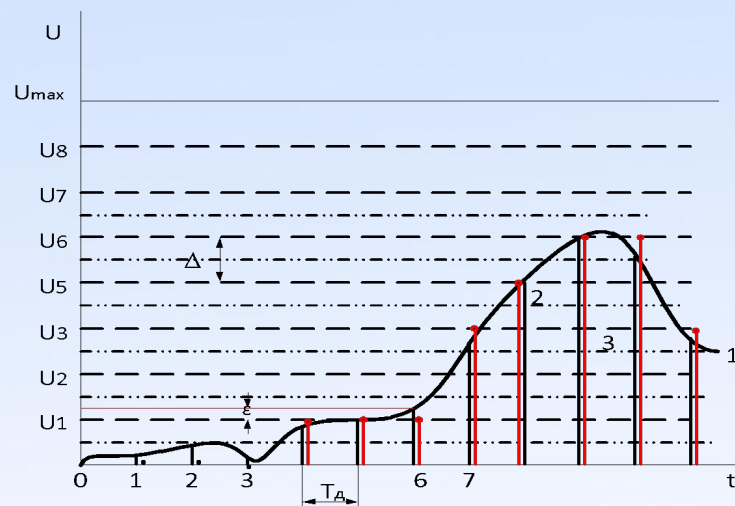
Аналого-цифровое преобразование непрерывных сигналов осуществляется методами ИКМ и дельта-модуляции и их разновидностями.

Исторически этот процесс называют модуляцией, поскольку такое преобразование можно трактовать как модуляцию импульсной несущей аналоговым сигналом с выхода кодера источника.

В процессе оцифровывания методом ИКМ процесс проходит три стадии:

- дискретизация во времени;
- квантование по уровню;
- кодирование.

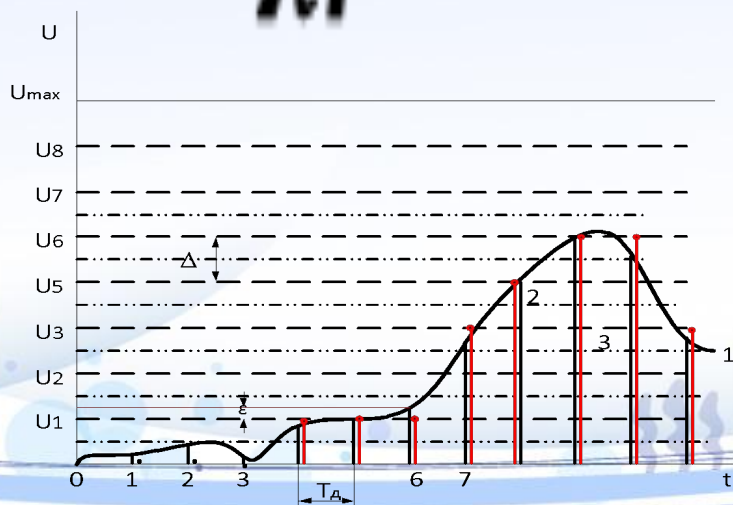
При квантовании весь динамический диапазон сигнала разбивается на ряд так называемых стандартных уровней с расстоянием между ними (шагом квантования) Δ



На этом рисунке:

- U_{\max} - максимальное значение динамического диапазона, в котором может изменяться входной сигнал;
- U_i – значения стандартных уровней;
- Δ – шаг квантования;
- ε - ошибка квантования;
- T_d - период дискретизации;
- 1 - функция, описывающая аналоговый сигнал;
- 2 - отсчёты сигнала после дискретизации;
- 3 - отсчёты сигнала после квантования;
- ε - ошибка квантования.

$$E_{\text{пр}} = \frac{4\pi \sqrt{60P_{\text{изл}} G h_1 h_2}}{\lambda r^2},$$



$$E_{\text{пр}} = \frac{4\pi \sqrt{60P_{\text{изл}}} G h_1 h_2}{\lambda r^2},$$

Двоичный код преобразуется в код Грея по следующему правилу. Преобразуемая кодовая комбинация двоичного кода суммируется по модулю 2 с кодовой комбинацией, полученной из исходной, путём сдвига влево (в сторону младшего разряда) на один разряд. В полученной сумме младший разряд отбрасывается, оставшаяся часть суммы представляет собой код Грея. Например, преобразование двоичных чисел 1101 и 1010 в код Грея производится следующим образом:

1101	1010
1101	1010
<hr/>	<hr/>
1011,1	1111,0

Преобразование кода Грея в двоичный код производится по следующему правилу.

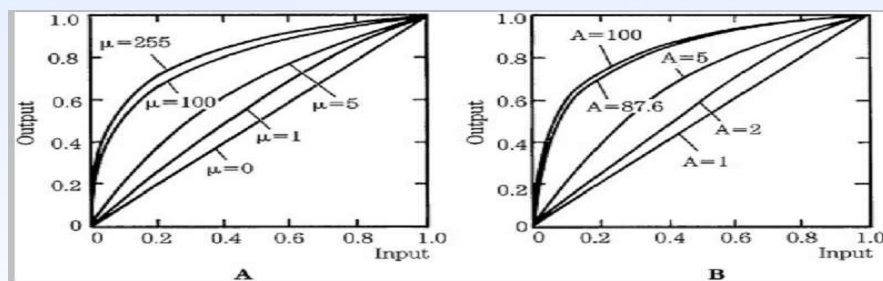
1. Преобразование выполняется поразрядно.
2. Преобразование начинается со старшего разряда, который остаётся неизменным.
3. Символ преобразуемого последующего разряда определяется суммой сложения по модулю 2 символов преобразуемой комбинации, начиная со старшего разряда и заканчивая преобразуемым разрядом. Если при сложении по модулю 2 сумма оказывается четной, то в преобразуемом разряде записывается 0, если нечетной – то записывается 1.

Неравномерное квантование.

При равномерном квантовании величина ошибки уменьшается при увеличении числа стандартных уровней и, соответственно, уменьшении шага квантования. Но при этом увеличивается длина кодовых комбинаций n , соответствующих номерам стандартных уровней. Для приемлемой ошибки ε величина $n = 10 \dots 13$. Естественно, что скорость передачи информации при этом уменьшается.

Разрешить эту проблему можно несколькими способами.

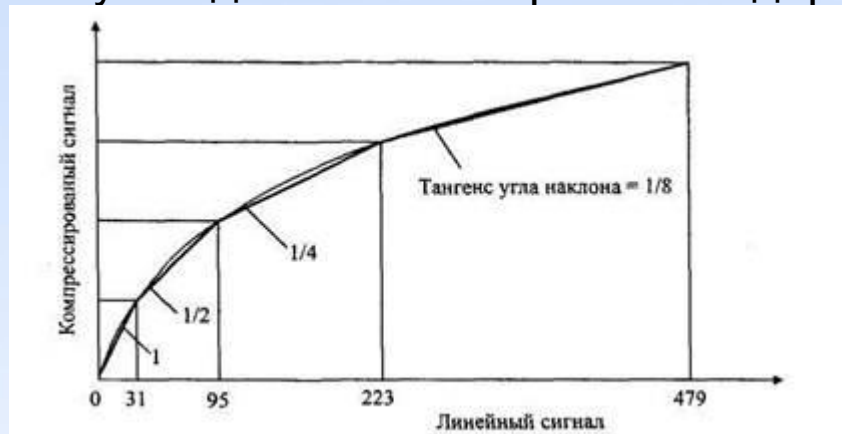
Первый и самый простой – командирование. Суть метода заключается в том, что перед аналого-цифровым преобразованием сигнал сжимается (компрессируется) в усилителе с нелинейной переходной характеристикой, описываемой A – законом (в Европе) и μ -закон (μ -закон) в США. Эти законы имеют вид



После компрессора включается обычный АЦП. При таком сжатии удаётся уменьшить разрядность кода до 8.

Однако в настоящее время этот метод почти не применяется.

Нелинейное кодирование. В этом методе кривая компрессии из предыдущего случая служит для описания работы кодера



Кривая компрессии аппроксимируется 8-ю сегментами (здесь показана только положительная часть кривой). Тангенс угла наклона отображает как бы коэффициент передачи сжимающего усилителя. Кодовая комбинация на выходе АЦП содержит 8 символов

Полярность сегмента	Номер сегмента			Номер отсчёта			

Этот метод находит достаточно широкое распространение и обеспечивает уменьшение длины кодовой комбинации с 11 (при равномерном квантовании) до 8.

Дифференциальные методы кодовой модуляции.

В обычной системе с ИКМ каждый отсчет входного сигнала кодируется независимо от всех остальных. В то же время анализ показывает, что речевой сигнал (РС) характеризуется сильной автокорреляцией - коэффициент корреляции (мера предсказуемости) между соседними отсчетами, следующими с частотой 8 кГц, составляет в общем случае 0,85 или больше. Это означает, что две соседних выборки не могут сильно отличаться друг от друга. Соответственно, если кодировать только разность между ними, то можно снизить скорость передачи двоичных данных, представляющих речевой сигнал. Более того, знание нескольких последовательных отсчетов и их корреляционных свойств позволяет предсказать последующий отсчет.

Таким образом, вместо кодирования следующих друг за другом отсчетов или даже их разности, можно кодировать разность между текущим и предсказанным значением, которое предсказатель (экстраполятор), вычисляет на основе информации о нескольких предыдущих отсчётах.

Первым примером «сжимающей» обработки считают дифференциальную ИКМ (ДИКМ). В этой системе предыдущий отсчет берется с определенным весом, формируя прогноз, а разница между предсказанным и реальным отсчетами речи подвергается квантованию по знаку и по величине, после чего формируются двоичные символы (кодированные слова) цифрового сигнала. По существу, здесь кодируется крутизна (производная) сигнала на передающей стороне и восстанавливается сигнал путем интегрирования на приемной стороне.

Простейшими средствами получения разности значений отсчетов являются запоминание предыдущего входного отсчета непосредственно в аналоговой памяти и использование аналогового вычитающего устройства для измерения изменения. Изменения сигнала затем квантуются и кодируются для передачи. Таким образом, в дифференциальных кодеках квантованию и передаче по цифровому каналу подвергается разность между текущим отсчетом (выборкой) реального сигнала (РС) $x(k)$ и его предсказанным значением $x_{пр}(k)$, т.е. **ошибка предсказания** $z(k) = x(k) - x_{пр}(k)$.

Предсказываемое значение формируется из восстановленного сигнала $x'(k) = x_{пр}(k) + z_q(k)$; здесь $z_q(k)$ – квантованная ошибка предсказания. В качестве предсказываемого значения РС $x_{пр}(k)$ в простейшем случае может быть использовано предыдущее отсчетное значение.

Дельта – модуляция.

Дельта-модуляция (ДМ) считается частным случаем ДИКМ-кодирования. В методе ДМ вычисляется разница между текущим и предыдущим отсчетами. Затем эта разница подвергается квантованию в одноразрядном (двухуровневом) квантователе. Этот единственный разряд просто показывает полярность отсчета разностного сигнала и посредством этого указывает на то, увеличился или уменьшился сигнал за время, прошедшее после последнего отсчета. За упрощение схемы кодирования приходится платить необходимостью увеличения частоты дискретизации по сравнению с минимально возможной частотой дискретизации, используемой в ИКМ-кодере.

В простейшем ДМ-кодере частота дискретизации представляет собой компромисс между скоростью выходного потока данных и приемлемым уровнем ошибок квантования. Наиболее значительные ошибки дискретизации сигнала вызываются двумя явлениями - перегрузкой по крутизне и шумом дробления.



В простейшем случае линейной ДМ-квантователь имеет только два уровня ($+\Delta$ и $-\Delta$) и фиксированный шаг квантования, а предсказатель представляет собой цифровое интегрирующее устройство, в котором сигнал $x'(k)$ задерживается на время δt и умножается на коэффициент α , где $0 < \alpha \leq 1$. На выходе интегратора образуется ступенчатое напряжение, крутизна которого не может превышать значение $F_{\delta} \Delta = \Delta / \delta t$, при котором кодированный сигнал отстоит от входного сигнала не более, чем на размер шага. Если дельта-модулятор не в состоянии отслеживать быстрые изменения во входном сигнале, то возникает «отставание» восстановленного сигнала от исходного (рис. 12), характеризуемое как искажение перегрузки по крутизне.

Фактически, ДМ-кодер не успевает отслеживать быстрые изменения уровня сигнала и генерирует линейно изменяющийся квантованный сигнал. Шум дробления или гранулярный шум возникает при квантовании квазистационарного сигнала. При ДМ-кодировании постоянного сигнала результат представляет собой неравномерно чередующиеся положительные и отрицательные двоичные импульсы. Для медленно меняющихся сигналов основное значение имеет гранулярный шум, в то время как для быстро меняющихся сигналов - шум перегрузки по крутизне. Последний достигает пиковых значений непосредственно перед тем, как достигает максимумов кодируемый сигнал. Поэтому шум перегрузки по крутизне эффективно маскируется энергией речи, вследствие чего он менее заметен, чем шумы дробления.

Системы с ДИКМ обеспечивают такое качество восстановления сигнала, которое сопоставимо с качеством ИКМ-кодирования, и на порядок более высокую помехоустойчивость. Для снижения погрешности передачи при ДИКМ и повышения эффективности ДМ параметры квантователя и предсказателя должны быть согласованы со статистическими характеристиками сигнала, а поскольку последние изменяются во времени - алгоритмы должны быть адаптивными.

Дельта-сигма модуляция.

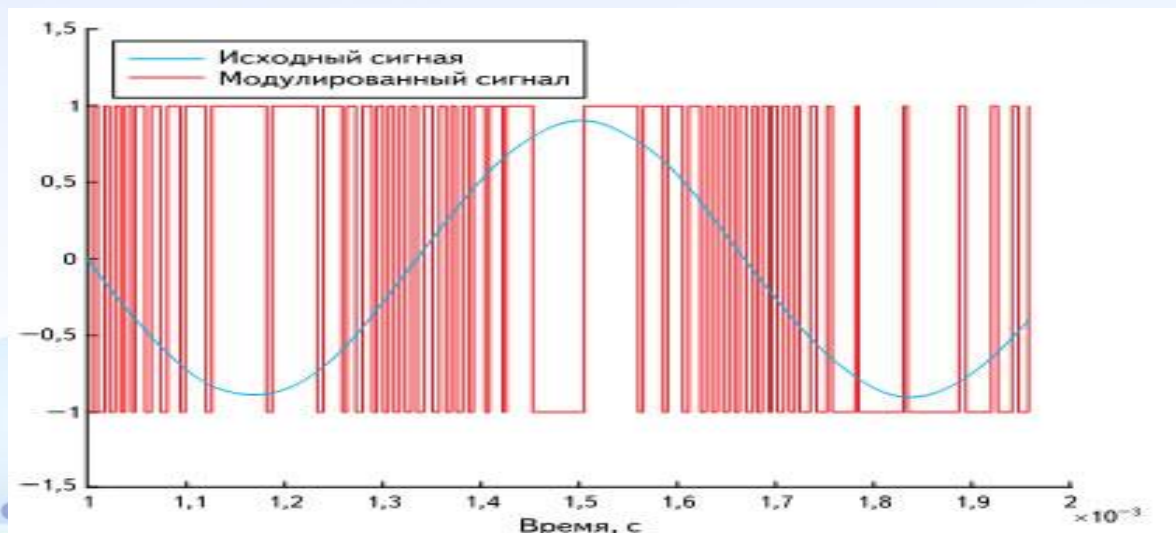
Модуляция **delta-sigma** ($\Delta\Sigma$, или sigma-delta $\Sigma\Delta$) это метод кодирования аналоговых сигналов с преобразованием их в цифровую форму.

Модуляция delta-sigma преобразует аналоговое напряжение в частоту импульсов, и её можно понимать как модуляцию плотности импульсов или импульсно-частотную модуляцию - в зависимости от реализации. Обычно частота может меняться гладко по бесконечно малым шагам, как может меняться напряжение, и оба могут служить аналогом бесконечно мало меняющейся физической переменной, такой как акустическое давление, интенсивность освещения, и т. д. Таким образом, замена частотой напряжения происходит совершенно естественно, и используется вместе с достоинством и простотой передачи потока импульсов.

При таком способе оцифровки данные представляют собой непрерывный двоичный поток, получаемый с гораздо большей частотой дискретизации - 2.8 или 5.6 МГц.

При сигма-дельта модуляции квантование осуществляется всего одним разрядом, но с частотой в десятки и сотни раз превышающей частоту Найквиста (F_H). В процессе такого преобразования анализируется не амплитуда сигнала, а направление её изменения. Если амплитуда возрастает, то результатом преобразования будет 1, а если уменьшается - то 0. Нулевой уровень кодируется чередующимися нулями и единицами.

Сигма-дельта модулятор можно условно рассматривать как синхронный преобразователь напряжение-частота, и теоретически возможно подсчитать удельное количество единиц в этом цифровом потоке, что и будет цифровым кодом простейшего сигма-дельта АЦП.



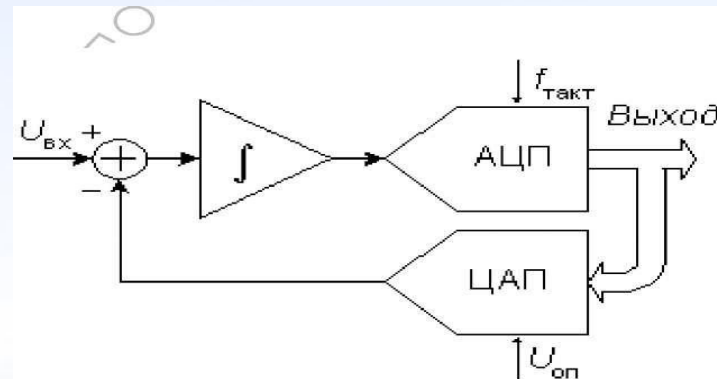
Особенности преобразования речевых сигналов в стандарте GSM (сотовая телефония).

Рассмотрим кратко основные характеристики речевых сигналов (согласно рекомендациям МККТТ) в стандарте GSM и особенности их аналого-цифрового преобразования:

- диапазон частот речевого сигнала ограничен: 300...3400 Гц;
- длительность звуков речевого сигнала составляет от нескольких десятков до нескольких сотен миллисекунд, при среднем значении 130 мс;
- для гласных звуков среднее значение длительности составляет 210мс, для согласных — 92 мс;
- спектр мощности речевого сигнала имеет максимум вблизи частоты 400 Гц и спадает на более высоких частотах со скоростью около 9 дБ на октаву;
- при телефонном разговоре уровень речевого сигнала изменяется в диапазоне 35...40 дБ, при этом уровень согласных в среднем на 20 дБ ниже уровня гласных;
- в аналого-цифровом преобразовании и цифровой обработке сигнала речи ограничиваются частотным интервалом обычного аналогового телефона 300...3400 Гц, при этом при кодировании речевого сигнала учитывают квазистационарный гауссовский процесс, у которого спектрально-корреляционные характеристики постоянны на интервале 20...30 мс.

В системах сотовой мобильной связи стандарта GSM используются 16-битовые сигма-дельта АЦП, при этом скорость цифрового выходного потока составляет 128 кбит/с.

Современные АЦП и ЦАП в мобильных станциях выполняются в виде интегральных микросхем. Широкое применение находят 16/18/20/22/24-битовые преобразователи на одной интегральной микросхеме. В системах сотовой мобильной связи используются такого рода АЦП-ЦАП, входной цифровой поток в которых имеет скорость 128 кбит/с. Такие ЦАП преобразуют цифровые потоки в речевые сигналы, которые в передающей части были преобразованы в цифровые сигналы в АЦП при 16-битовом сигма-дельта преобразовании



Дополнительно следует отметить, что на входе АЦП и на выходе ЦАП обязательно должны быть фильтры нижних частот, которые нужны для ограничения спектра сигнала на частоте 4 кГц. В настоящее время они реализуются программным способом, в том числе и в мобильных телефонах.