



# Системы связи и сети передачи информации

Лекция №5

**Лекция 5. Виды модуляции сигналов.  
Детектирование**

# Литература

- Нефедов В.И.. Основы радиоэлектроники и связи. М.: Высш. шк., 2009.
- Скляр, Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. — М.: «Вильямс», 2007. — С. 1104.

# Назначение

При создании систем передачи информации в большинстве случаев оказывается, что спектр исходного сигнала, подлежащего передаче, сосредоточен отнюдь не на тех частотах, которые эффективно пропускает имеющийся канал связи.

# Назначение

Кроме того, во многих случаях требуется, чтобы передаваемый сигнал был *узкополосным*, то есть эффективная ширина его спектра должна быть намного меньше центральной частоты.

Перечисленные причины приводят к необходимости такой трансформации исходного сигнала, чтобы требования, предъявляемые к занимаемой сигналом полосе частот, были выполнены, а сам исходный сигнал можно было восстановить.

# Определение

**Модуляция** - это процесс, посредством которого сообщения преобразуются в сигналы, совместимые с требованиями, налагаемыми каналом передачи данных.

# Определение

**Модуляция** — процесс изменения одного или нескольких параметров высокочастотного несущего колебания по закону низкочастотного информационного сигнала (сообщения).

# Определение

Передаваемая информация заложена в управляющем (модулирующем) сигнале, а роль переносчика информации выполняет высокочастотное колебание, называемое несущим. Модуляция, таким образом, представляет собой процесс «посадки» информационного колебания на заведомо известную несущую.

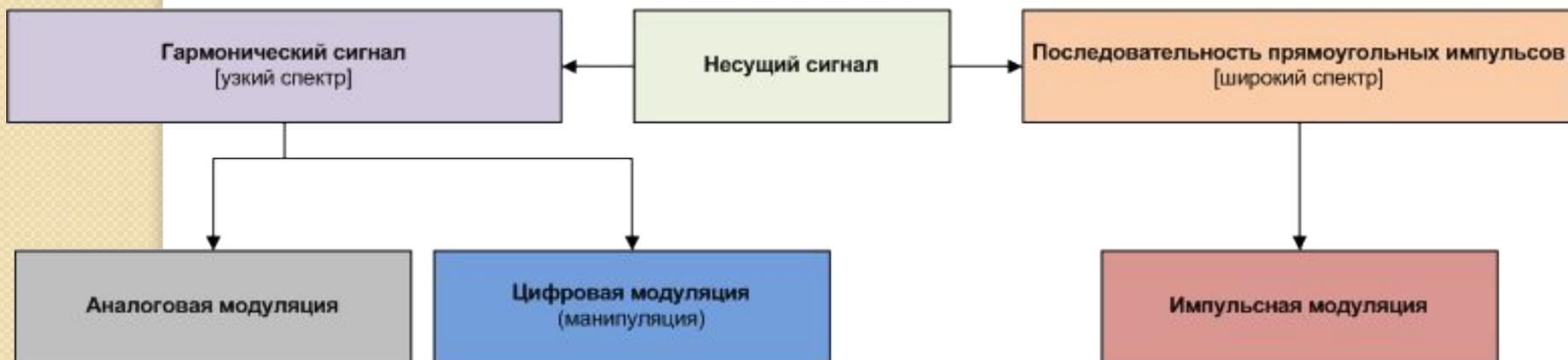
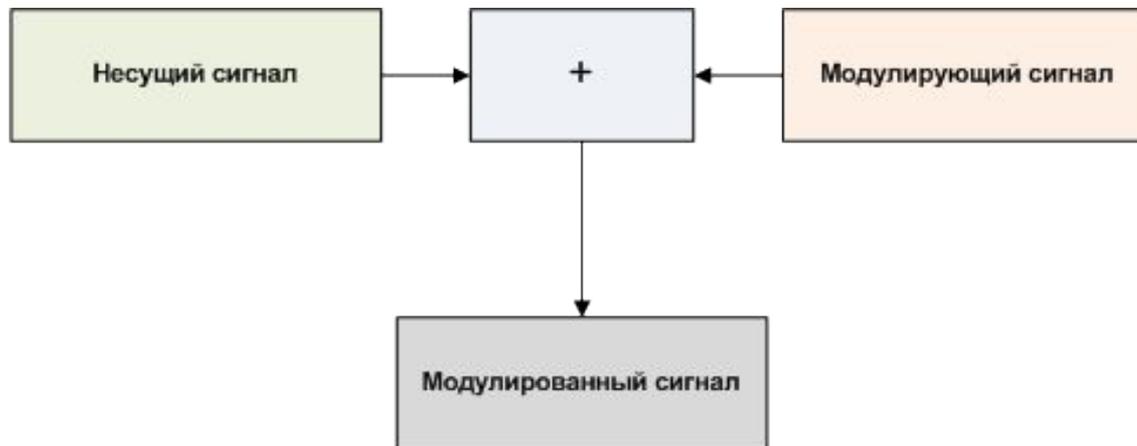
# Определение

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

# Определение

В качестве несущего могут быть использованы колебания различной формы (прямоугольные, треугольные и т. д.), однако чаще всего применяются гармонические колебания. В зависимости от того, какой из параметров несущего колебания изменяется, различают вид модуляции (амплитудная, частотная, фазовая и др.). Модуляция дискретным сигналом называется цифровой модуляцией или манипуляцией.

# Виды модуляции



# Аналоговая амплитудная модуляция

**Амплитудная модуляция** — вид модуляции, при которой изменяемым параметром несущего сигнала является его амплитуда.

# Аналоговая амплитудная модуляция

В процессе амплитудной модуляции несущего колебания:

$$u_n(t) = U_n \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

Его амплитуда должна меняться по закону:

$$U_n(t) = U_n + k_A e(t)$$

# Аналоговая амплитудная модуляция

$e(t)$  – модулирующий сигнал.

Если модулирующий сигнал является гармоническим

$$e(t) = E_0 \cos(\Omega t + \theta_0)$$

модулированный сигнал будет равен:

$$u_{ам}(t) = U_H [1 + M \cos(\Omega t + \theta_0)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

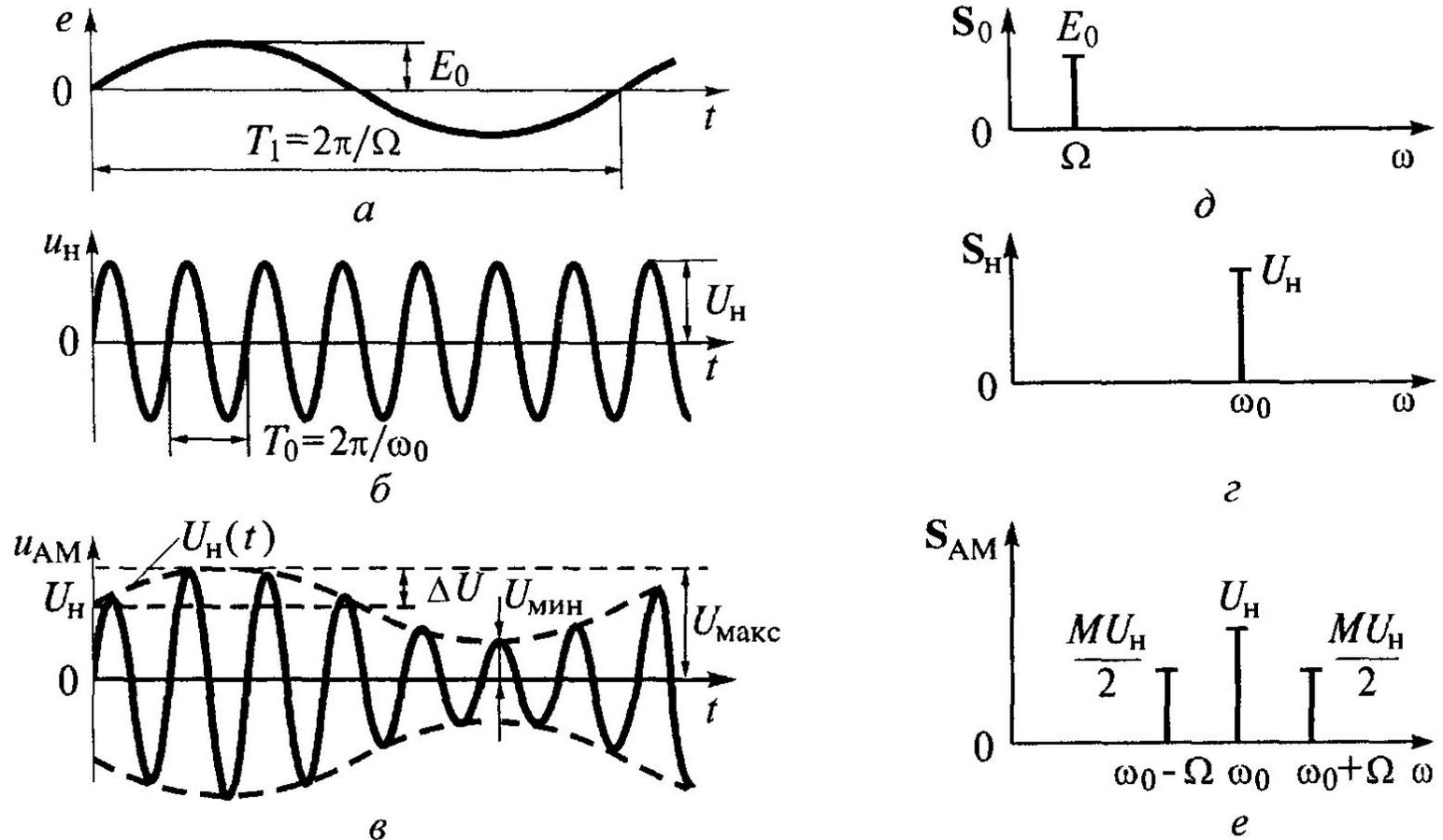
$M = k_A E_0 / U_H$  - коэффициент усиления.

# Аналоговая амплитудная модуляция

Спектр такого сигнала будет состоять из  
трех высокочастотных составляющих:

$$\omega_0, \omega_0 + \Omega, \omega_0 - \Omega$$

# Аналоговая амплитудная модуляция



**Рис. 2.28.** Амплитудная модуляция:  
*a* — модулирующий сигнал; *б* — несущее колебание; *в* — АМ-сигнал;  
*г* — *е* — соответствующие спектры

# Аналоговая частотная модуляция

При частотной модуляции значение несущей частоты  $\omega(t)$  связано с модулирующим сигналом  $e(t)$

$$\omega(t) = \omega_0 + k_v e(t)$$

Если модулирующий сигнал является гармоническим

$$e(t) = E_0 \cos(\Omega t + \theta_0)$$

# Аналоговая частотная модуляция

Частотно-модулированный сигнал запишется в виде:

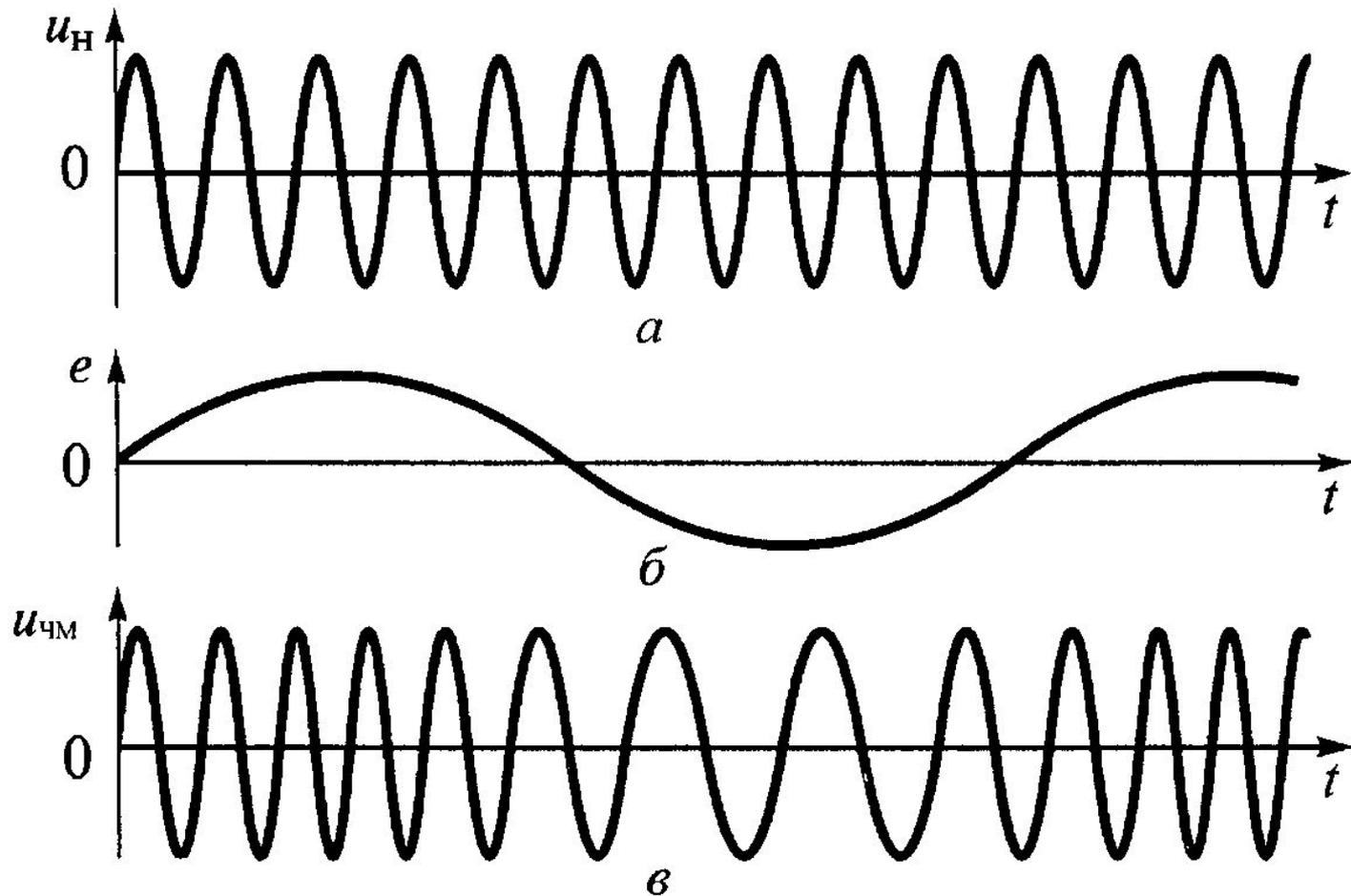
$$u_{чм}(t) = U_n \cos(\omega_0 t + m_\omega \sin \Omega t)$$

где:

$$m_\omega = k_\omega E_0 / \Omega$$

Спектр аналогичен АМ.

# Аналоговая частотная модуляция



**Рис. 2.38.** Частотная однотоновая модуляция:  
*a* — несущее колебание; *б* — модулирующий сигнал; *в* — ЧМ-сигнал

# Аналоговая фазовая модуляция

При фазовой модуляции полная фаза несущего колебания изменится пропорционально модулирующему сигналу:

$$\psi(t) = \omega_0 t + k_\phi e(t)$$

Если модулирующий сигнал является гармоническим

$$e(t) = E_0 \cos(\Omega t + \theta_0)$$

# Аналоговая фазовая модуляция

Соотношение для ФМ-сигнала:

$$u_{\text{фм}}(t) = U_n \cos(\omega_0 t + m_\phi \cos \Omega t)$$

$$m_\phi = k_\phi E_0$$

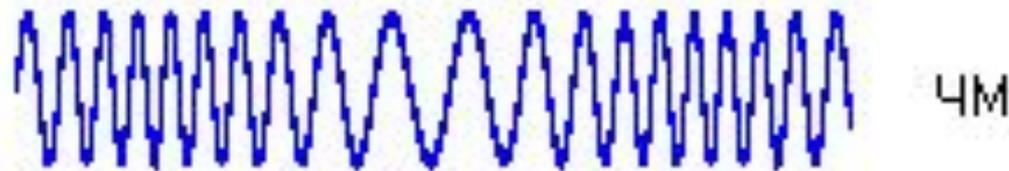
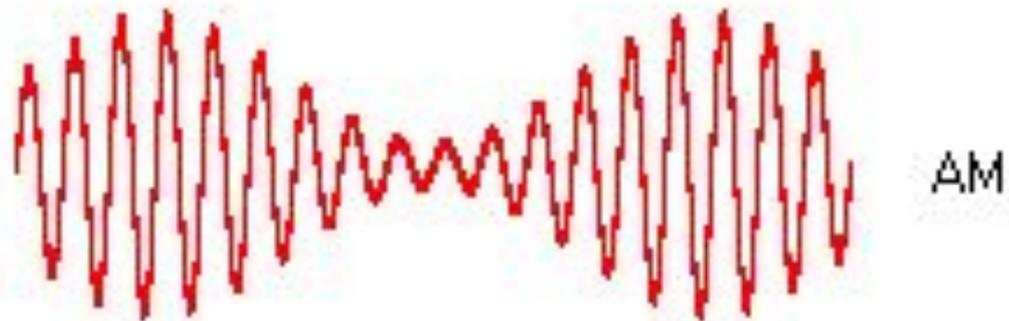
# Аналоговая фазовая модуляция

Для фазовой и частотной модуляции  
**девиация частоты** (максимальное отклонение частоты от частоты несущей):

$$\omega_{\partial\phi} = k_{\phi} E_0 \Omega$$

$$\omega_{\partial\omega} = k_{\omega} E_0$$

# Аналоговая фазовая модуляция



# Модуляция цифровых сигналов

Информация преобразовывается в двоичные цифры с помощью кодера (coder, АЦП).

Аналоговая информация форматируется с использованием трех отдельных процессов: дискретизации (sampling), квантования (quantization) и кодирования (coding). Во всех случаях после форматирования получается последовательность двоичных цифр.

# Модуляция цифровых сигналов

Цифры необходимо передать через некоторый канал, такой как пара проводников или коаксиальный кабель.

При этом никакой канал использовать нельзя, пока двоичные цифры не будут преобразованы в сигналы, **совместимые** с этим каналом.

# Модуляция цифровых сигналов

Для узкополосных каналов такими совместимыми сигналами являются **импульсы**.

Преобразование потока битов в последовательность импульсных сигналов называется **импульсная модуляция (узкополосная модуляция)**.

# Модуляция цифровых сигналов

В случае *радиопередачи* импульсы заданной формы модулируют синусоиду, называемую *несущей волной* (carrier wave), или просто *несущей* (carrier), затем следует передача на нужное расстояние с использованием радиочастот; для этого несущая преобразовывается в электромагнитное поле.

# Модуляция цифровых сигналов

Может возникнуть вопрос: зачем для радиопередачи узкополосных сигналов нужна несущая?

Ответ звучит следующим образом. Передача электромагнитного поля через пространство выполняется с помощью антенн.

Размер антенны зависит от длины волны  $\lambda$ , и текущей задачи. Для переносных телефонов размер антенны обычно равен  $\lambda/4$ , а длина волны  $c/f$ , где  $c$  — скорость света,  $3 \times 10^8$  м/с.

Для передачи узкополосного сигнала, скажем, имеющего частоту  $f=3000$  Гц  $\lambda/4 = 2,5 \times 10^4 = 25$  км.

# Модуляция цифровых сигналов

Если узкополосная информация модулируется несущей более высокой частоты, например 900 МГц, размер антенны будет составлять порядка 8 см.

Приведенные вычисления показывают, что модулирование несущей частоты, или полосовая модуляция, — это этап, необходимый для всех систем, использующих радиопередачу.

# Модуляция цифровых сигналов

**Полосовая модуляция** — это процесс преобразования цифрового информационного сигнала в синусоидальную волну; при цифровой модуляции синусоида на интервале  $T$  называется цифровым символом.

Термин «полосовой» (bandpass) используется для отражения того, что узкополосный сигнал сдвинут несущей волной на частоту, гораздо большую спектральных составляющих.

# Импульсная модуляция

К методам импульсной модуляции относятся:

- амплитудно-импульсная модуляция  
(pulse-amplitude modulation - PAM)
- импульсно-кодовая модуляция  
(pulse-code modulation PCM)
- фазово-импульсная модуляция  
(pulse-position modulation - PPM)
- широтно-импульсная модуляция  
(pulse-duration modulation - PDM или  
pulse-width modulation - PWM)

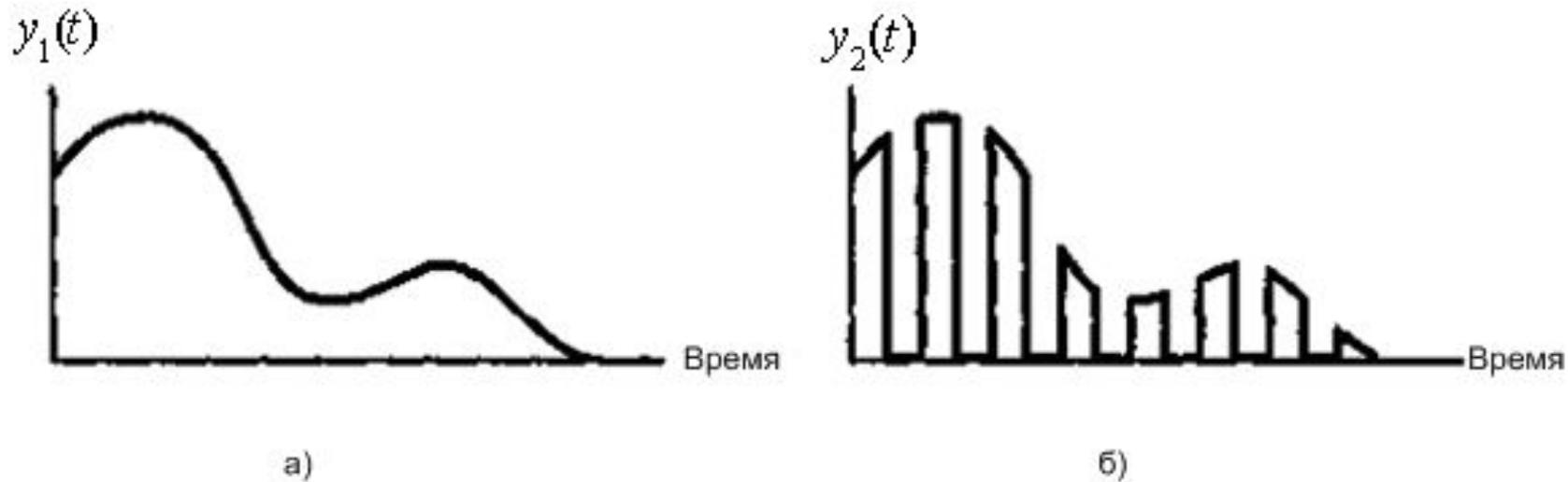
# Амплитудно-импульсная модуляция

Результатом процесса дискретизации является сигнал в амплитудно-импульсной модуляции (pulse-amplitude modulation - PAM).

# Амплитудно-импульсная модуляция

Такое название возникло потому, что выходящий сигнал можно описать как последовательность импульсов с амплитудами, определяемыми выборками входящего сигнала.

# Амплитудно-импульсная модуляция



Дискретные данные на рис. б не совместимы с цифровой системой, поскольку амплитуда каждой естественной выборки все еще может принимать бесконечное множество возможных значений, а цифровая система работает с конечным набором значений.

# Импульсно-кодовая модуляция

Импульсно-кодовая модуляция (pulse-code modulation - PCM) - это название, данное классу узкополосных сигналов, полученных из сигналов РАМ путем кодирования каждой квантованной выборки цифровым словом.

# Импульсно-кодовая модуляция

Исходная информация

дискретизируется и квантуется в один из  $L$  уровней; после этого каждая квантованная выборка проходит цифровое кодирование для превращения в  $I$ -битовое кодовое слово

# Импульсно-кодовая модуляция

Рассмотрим рис., на котором представлена бинарная импульсно-кодовая модуляция. Предположим, что амплитуды аналогового сигнала ограничены диапазоном от  $-4$  до  $+4$  В. Шаг между уровнями квантования составляет  $1$  В. Следовательно, используется  $8$  квантовых уровней; они расположены на  $-3.5$  -  $+3.5$  В. Уровню  $-3,5$  В присвоим кодový номер  $0$ , уровню  $-2,5$  -  $1$  и так до уровня  $3,5$  В, которому присвоим кодový номер  $7$ .

# Импульсно-кодовая модуляция

Каждый кодовый номер имеет представление в двоичной арифметике - от 000 для кодового номера 0 до 111 для кодового номера 7.

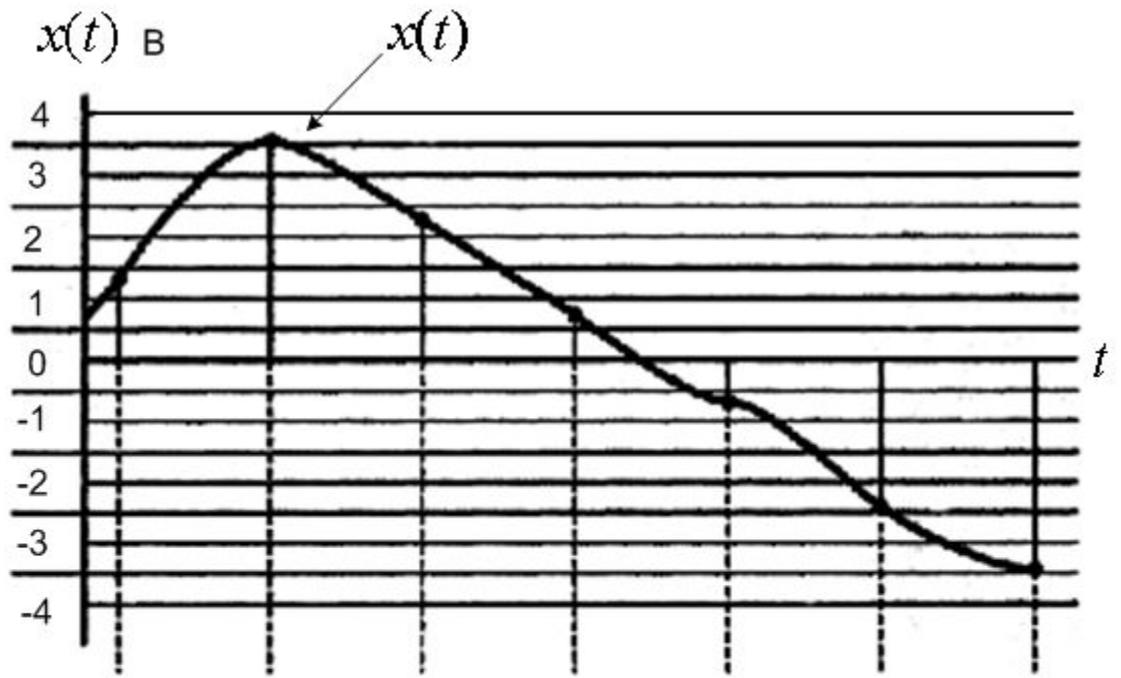
На оси ординат отложены уровни квантования и их кодовые номера. Каждая выборка аналогового сигнала аппроксимируется ближайшим уровнем квантования.

Под аналоговым сигналом изображены четыре его представления: значения выборок в естественной дискретизации, значения квантованных выборок, кодовые номера и последовательность РСМ.

# Импульсно-кодовая модуляция

Кодовый номер      Уровень квантования

7	3,5
6	2,5
5	1,5
4	0,5
3	-0,5
2	-1,5
1	-2,5
0	-3,5



Значения, полученные при естественной дискретизации РАМ

1.3	3.6	2.3	0.7	-0.7	-2.4	-3.4
-----	-----	-----	-----	------	------	------

Значения, полученные при квантовании

1.5	3.6	2.5	0.5	-0.5	-2.5	-3.5
-----	-----	-----	-----	------	------	------

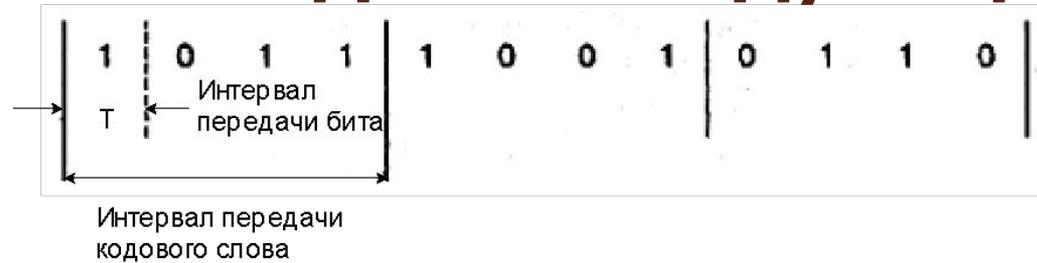
Кодовый номер

5	7	6	4	3	1	0
---	---	---	---	---	---	---

Последовательность РСМ

101	111	110	100	011	001	000
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

# Импульсно-кодовая модуляция



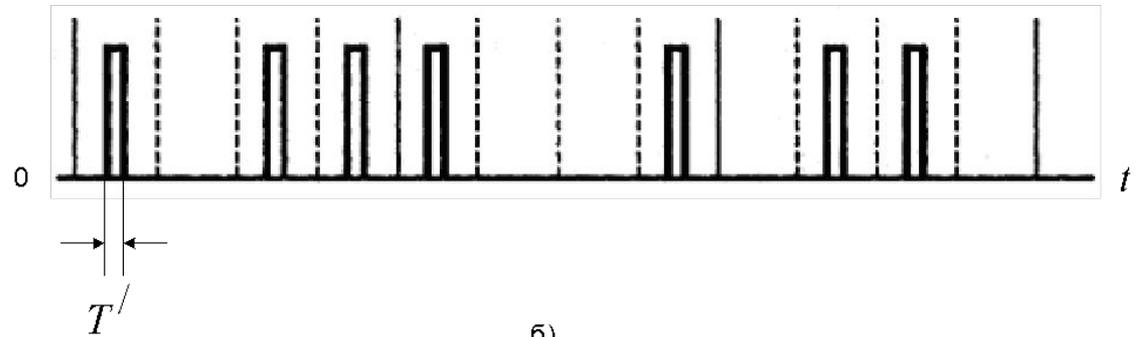
а)

Пример представления двоичных цифр в форме сигналов:

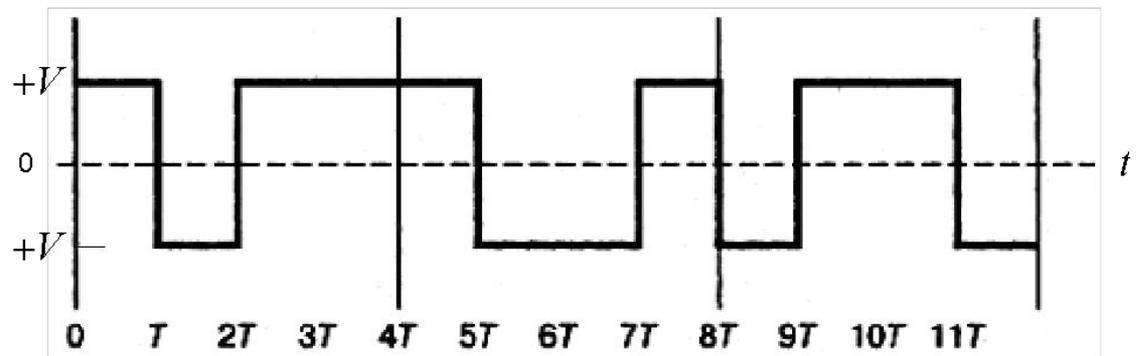
а) последовательность РСМ;

б) импульсное представление последовательности РСМ;

в) импульсный сигнал (переход между двумя уровнями)



б)



в)

# Импульсно-кодовая модуляция

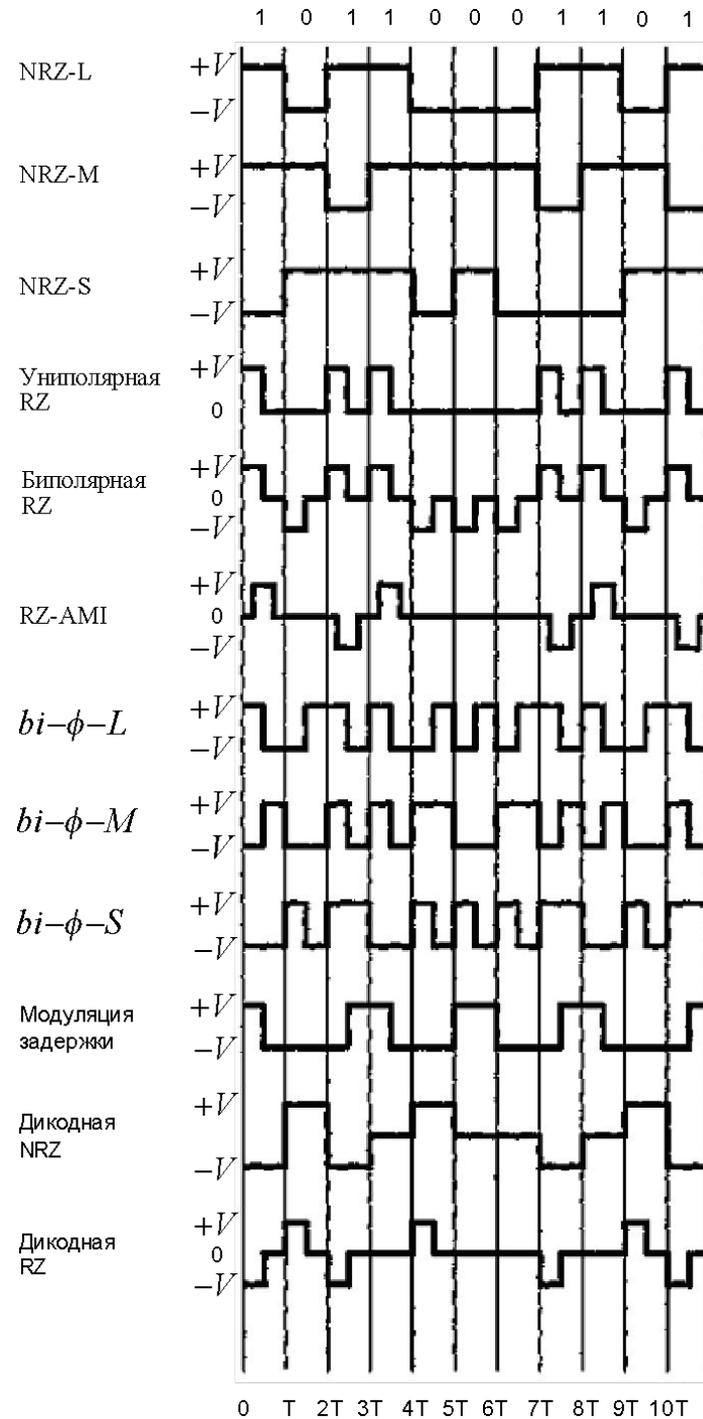
При применении импульсной модуляции к недвоичному символу получаем сигнал, называемый  $M$ -арным импульсно-модулированным

# Импульсно-кодовая модуляция

Сигналы РСМ делятся на четыре группы.

1. Без возврата к нулю  
(nonreturn-to-zero - NRZ)
2. С возвратом к нулю (return-to-zero - RZ)
3. Фазовое кодирование
4. Многоуровневое бинарное кодирование

# Импульсно- кодовая модуляция



# Импульсно-кодовая модуляция

Самыми используемыми сигналами РСМ являются, пожалуй, сигналы в кодировках NRZ. Группа кодировок NRZ включает следующие подгруппы: NRZ-L (L = level - уровень), NRZ-M (M = mark - метка) и NRZ-S (S = space - пауза). Кодировка NRZ-L (nonreturn-to-zero level - без возврата к нулевому уровню) широко используется в цифровых логических схемах. Двоичная единица в этом случае представляется одним уровнем напряжения, а двоичный нуль - другим.

# Импульсно-кодовая модуляция

Может возникнуть вопрос, почему так много различных сигналов РСМ? Неужели так много уникальных приложений требуют разнообразных кодировок для представления двоичных цифр? Причина такого разнообразия заключается в отличии производительности, которая характеризует каждую кодировку [5].

# Импульсно-кодовая модуляция

Если информационные выборки вначале квантуются, превращаясь в символы  $M$ -арного алфавита, а затем модулируются импульсами, получаемая импульсная модуляция является цифровой, и мы будем называть ее  $M$ -арной импульсной модуляцией. При  $M$ -арной амплитудно-импульсной модуляции каждому из  $M$  возможных значений символов присваивается один из разрешенных уровней амплитуды.

# Импульсно-кодовая модуляция

Ранее сигналы РСМ описывались как двоичные, имеющие два значения амплитуды (например, кодировки NRZ, RZ). Отметим, что такие сигналы РСМ, требующие всего двух уровней, представляют собой частный случай ( $M=2$ )  $M$ -арной кодировки PAM.

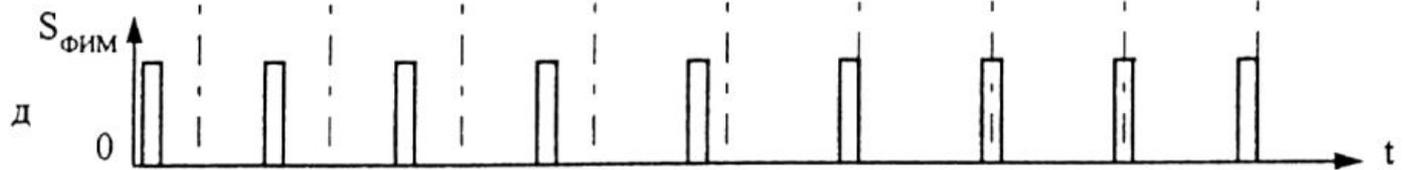
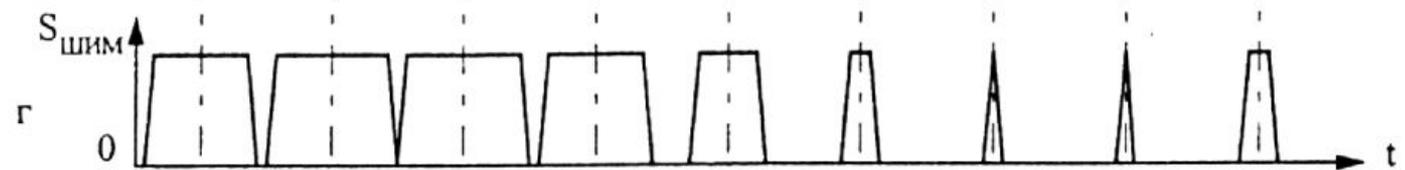
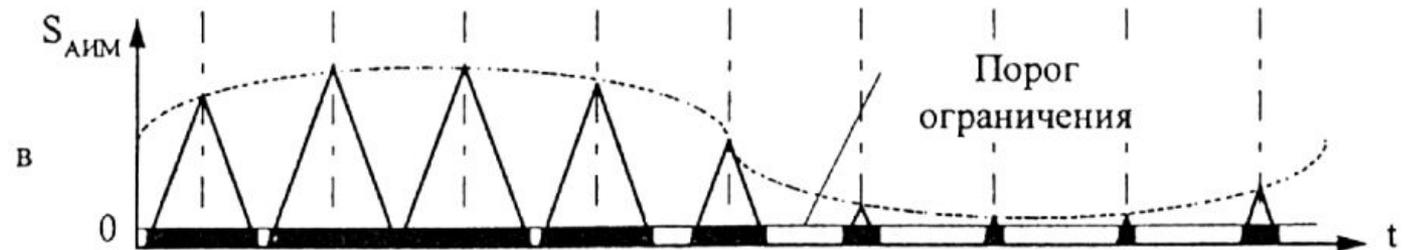
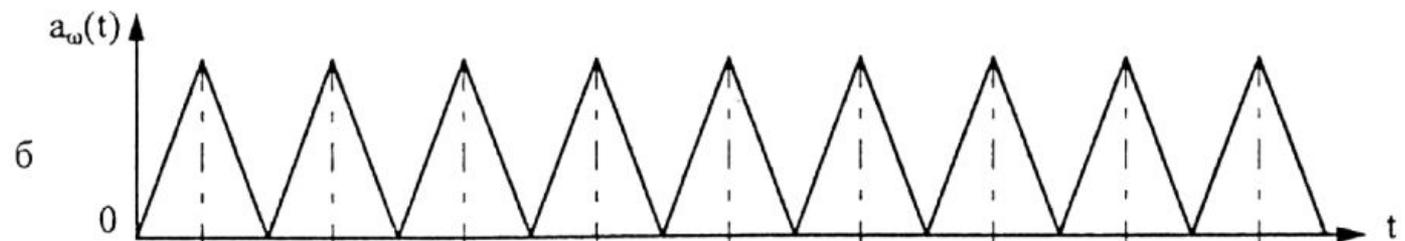
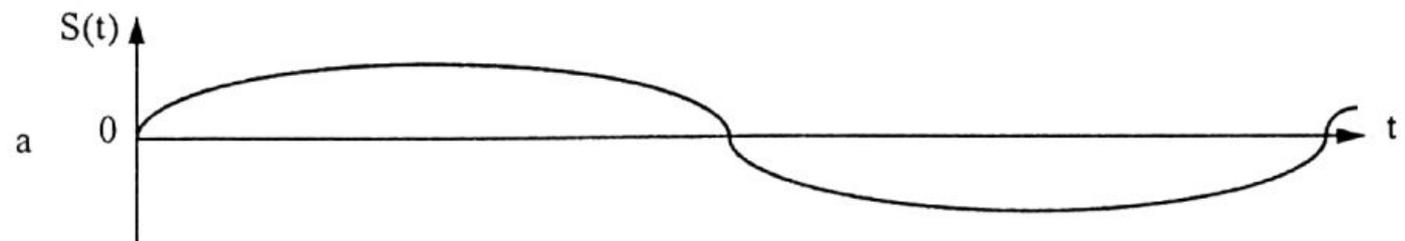
# Фазово- импульсная модуляция

*M*-арная фазово-импульсная модуляция (PPM) сигнала осуществляется через задержку (или упреждение) появления импульса на время, соответствующее значению информационных символов.

При этом импульсы имеют постоянную длительность и амплитуду.

# Широтно-импульсная модуляция

Широтно-импульсная модуляция (PDM) осуществляется посредством измерения ширины импульса на величину, соответствующую значению символа.



# Методы цифровой полосовой модуляции

При полосовой модуляции несущая представляет собой обычную синусоиду.

Как и в случае аналоговой модуляции, модулировать можно амплитуду, частоту и фазу.

Но модулирующий сигнал – цифровой,  
а модулированный – аналоговый!

# Методы цифровой полосовой модуляции

Если для обнаружения сигналов приемник использует информацию о фазе несущей, процесс называется *когерентным обнаружением* (coherent detection); если подобная информация не используется, процесс именуется *некогерентным обнаружением* (no coherent detection).

# Методы цифровой полосовой модуляции

При идеальном когерентном обнаружении приемник содержит прототипы каждого возможного сигнала. Эти сигналы-прототипы дублируют алфавит переданных сигналов по всем параметрам, даже по радиочастотной фазе. В этом случае говорят, что приемник *автоматически подстраивается* под фазу входящего сигнала. В процессе демодуляции приемник перемножает и интегрирует входящий сигнал с каждым прототипом (определяет корреляцию).

# Методы цифровой полосовой модуляции

Виды когерентной модуляции/демодуляции:

- фазовая манипуляция (phase shift keying — PSK),
- частотная манипуляция (frequency shift keying — FSK),
- амплитудная манипуляция (amplitude shift keying — ASK)
- модуляция без разрыва фазы (continuous phase modulation — CPM) и комбинации этих модуляций.

Существуют специализированные:

- квадратурная фазовая манипуляция, со сдвигом (onset quadrature PSK — OQPSK),
- манипуляция с минимальным сдвигом (minimum shift keying — MSK),
- квадратурная амплитудная модуляция (quadrature amplitude modulation — QAM)

# Методы цифровой полосовой модуляции

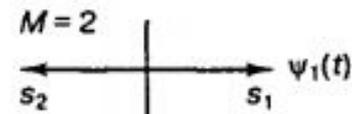
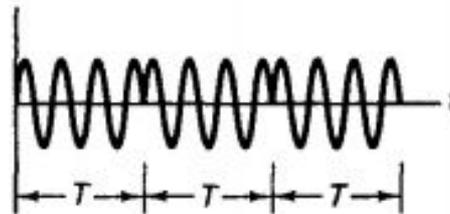
*Некогерентная демодуляция* относится к системам, использующим демодуляторы, спроектированные для работы без знания абсолютной величины фазы входящего сигнала; следовательно, определение фазы в этом случае не требуется. Таким образом, преимуществом некогерентных систем перед когерентными является простота, а недостатком — большая вероятность ошибки.

**a) PSK**

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega_0 t + 2\pi i/M)$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

$$0 \leq t \leq T$$

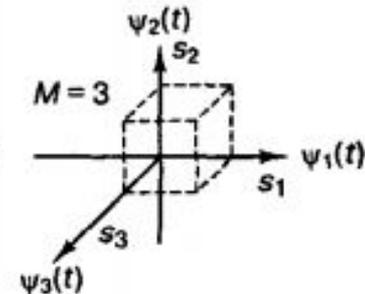
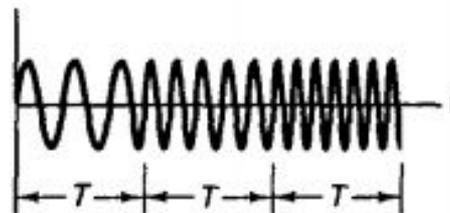


**б) FSK**

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega_i t + \phi)$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

$$0 \leq t \leq T$$

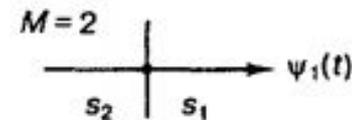
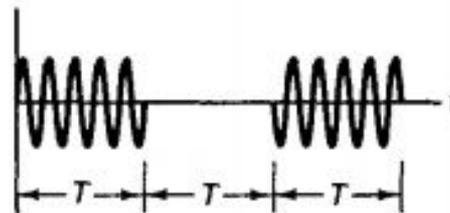


**в) ASK**

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}} \cos(\omega_0 t + \phi)$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

$$0 \leq t \leq T$$

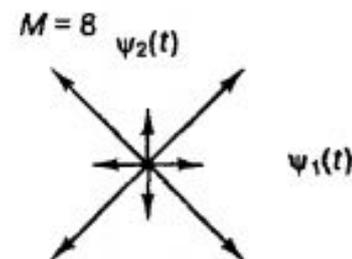
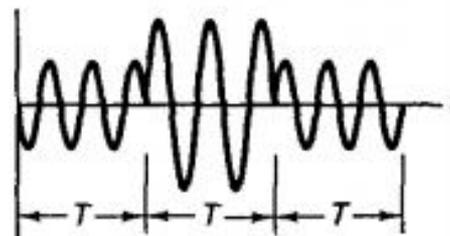


**г) ASK/PSK (APK)**

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}} \cos[\omega_0 t + \phi_i(t)]$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

$$0 \leq t \leq T$$



# Фазовая манипуляция (PSK)

Сигнал в модуляции PSK имеет следующий вид.

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos[\omega_0 t + \phi_i(t)] \quad 0 \leq t \leq T$$

Здесь фазовый член может принимать  $M$  дискретных значений, обычно определяемых следующим образом.

$$\phi_i(t) = \frac{2\pi i}{M} \quad i = 1, \dots, M$$

# Фазовая манипуляция (PSK)

Параметр  $E$  — это энергия символа,  $T$  — время передачи символа.

На рис. приведен пример двоичной ( $M = 2$ ) фазовой манипуляции (binary PSK — BPSK).

Явно видны характерные резкие изменения фазы при переходе между символами; если модулируемый поток данных состоит из чередующихся нулей и единиц, такие резкие изменения будут происходить при каждом переходе.

# Амплитудная манипуляция

Сигнал в амплитудной манипуляции (amplitude shift keying — ASK), изображенной на рис. описывается выражением

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}} \cos(\omega_0 t + \phi) \quad \begin{array}{l} 0 \leq t \leq T \\ i = 1, \dots, M \end{array}$$

# Амплитудная манипуляция

где амплитудный член может принимать  $M$  дискретных значений

$$\sqrt{2E_i(t) / T}$$

На рис.  $M$  выбрано равным 2, что соответствует двум типам сигналов амплитуды которых равны 0 и  $\sqrt{2E/T}$

# Частотная манипуляция

Выражение для сигнала в частотной манипуляции (frequency shift keying — FSK) имеет следующий вид

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega_i t + \phi) \quad \begin{array}{l} 0 \leq t \leq T \\ i = 1, \dots, M \end{array}$$

Здесь частота  $\omega_0$  может принимать  $M$  дискретных значений.

# Демодуляция и обнаружение

Пусть бинарная полосовая система передает один из двух возможных сигналов, обозначаемых как  $s_1(t)$   $s_2(t)$

Для любого канала двоичный сигнал, переданный в течение интервала  $(0, T)$ , представляется следующим образом

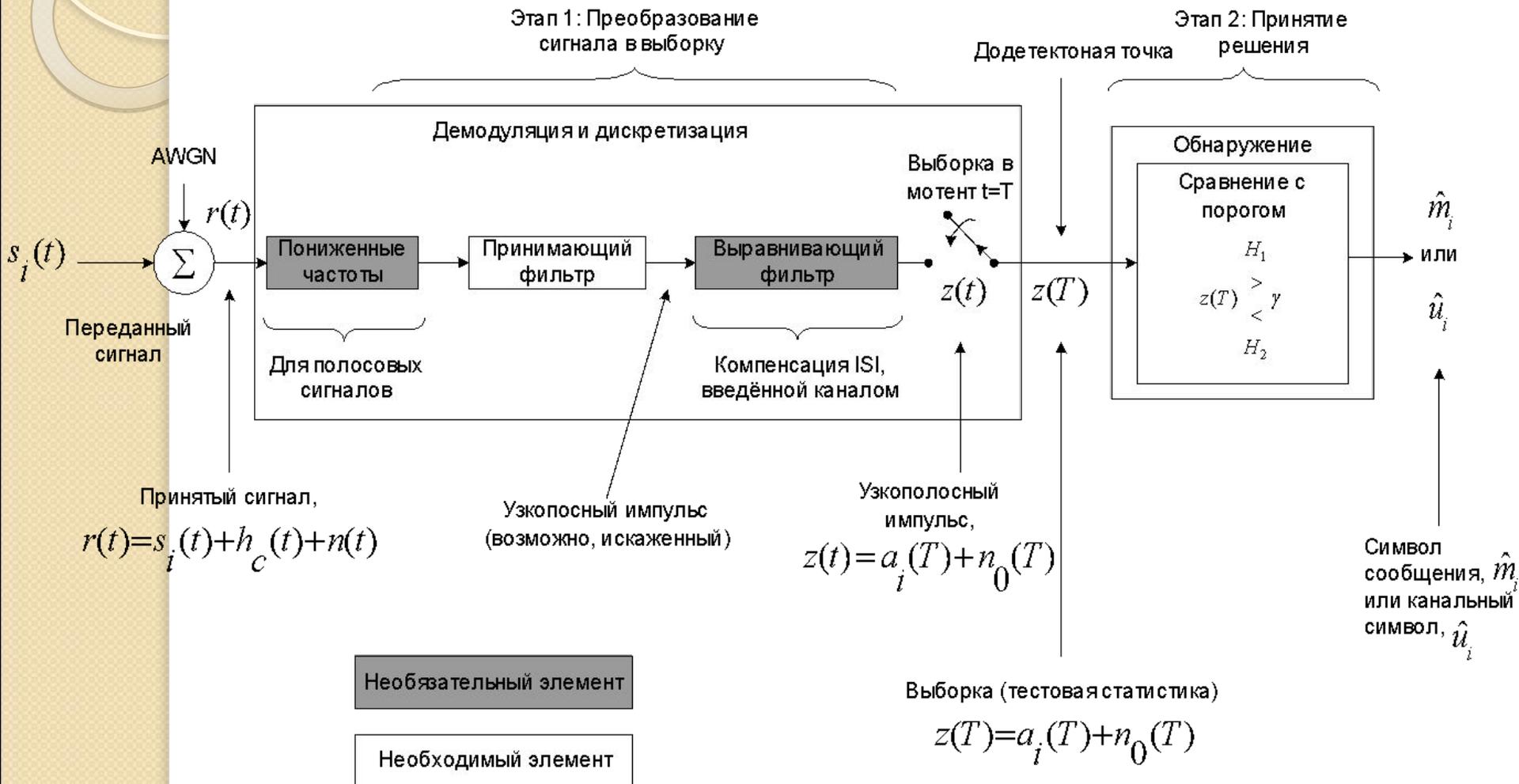
$$s_i(t) = \begin{cases} s_1(t) & 0 \leq t \leq T \text{ для символа } 1 \\ s_2(t) & 0 \leq t \leq T \text{ для символа } 0 \end{cases}$$

# Демодуляция и обнаружение

Принятый сигнал искажается вследствие воздействия шума и, возможно, неидеальной импульсной характеристики канала и описывается следующей формулой

$$r(t) = s_i(t) * h_c(t) + n(t)$$

# Демодуляция и обнаружение



# Демодуляция и обнаружение

В блоке демодуляции и дискретизации изображен принимающий фильтр (по сути, демодулятор), выполняющий восстановление сигнала в качестве подготовки к следующему необходимому этапу - обнаружению.

Фильтрация в передатчике и канале обычно приводит к искажению принятой последовательности импульсов, вызванному межсимвольной интерференцией, а значит, эти импульсы не совсем готовы к дискретизации и обнаружению.

Задачей принимающего фильтра является восстановление узкополосного импульса с максимально возможным отношением сигнал/шум (signal-to-noise ratio - SNR) и без межсимвольной интерференции.

# Демодуляция и обнаружение

За принимающим фильтром может находиться выравнивающий фильтр (equalizing filter), или эквалайзер (equalizer); он необходим только в тех системах, в которых сигнал может искажаться вследствие межсимвольной интерференции, введенной каналом.

# Демодуляция и обнаружение

Преобразование сигнала в выборку, выполняется демодулятором и следующим за ним устройством дискретизации.

В конце каждого интервала передачи символа  $T$  на выход устройства дискретизации, додетекторную точку, поступает выборка  $z(T)$

# Демодуляция и обнаружение

Далее принимается решение относительно цифрового значения выборки (выполняется обнаружение).

Предполагается, что шум является случайным гауссовым процессом, а принимающий фильтр демодулятора - линейным. Линейная операция со случайным гауссовым процессом дает другой случайный гауссов процесс

$$z(T) = a_i(T) + n_0(T)$$

# Демодуляция и обнаружение

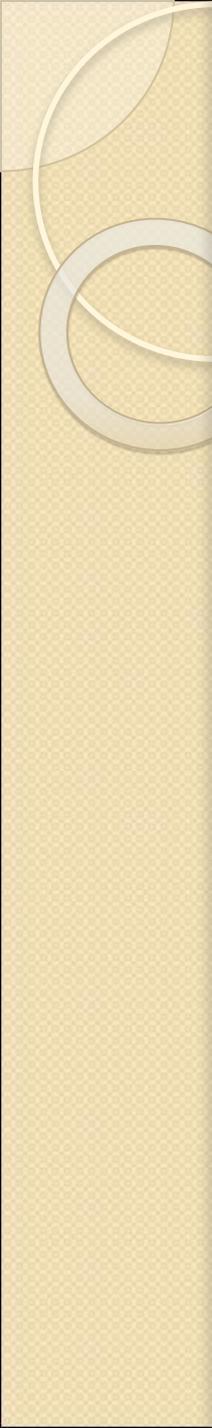
Поскольку  $z(T)$  является сигналом напряжения, пропорциональным энергии принятого символа, то чем больше амплитуда  $z(T)$ , тем более достоверным будет процесс принятия решения относительно цифрового значения сигнала.

Обнаружение выполняется посредством выбора гипотезы, являющейся следствием порогового измерения:

# Демодуляция и обнаружение

гипотеза  $H_1$  выбирается при  $z(T) > \gamma$ , а  $H_2$  - при  $z(T) < \gamma$ .

Выбор  $H_1$ , равносильно тому, что передан был сигнал  $s_1(t)$ , а значит, результатом обнаружения является двоичная единица. Подобным образом выбор  $H_2$  равносильно передаче сигнала  $s_2(t)$ , а значит, результатом обнаружения является двоичный ноль.



# Выводы