



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.

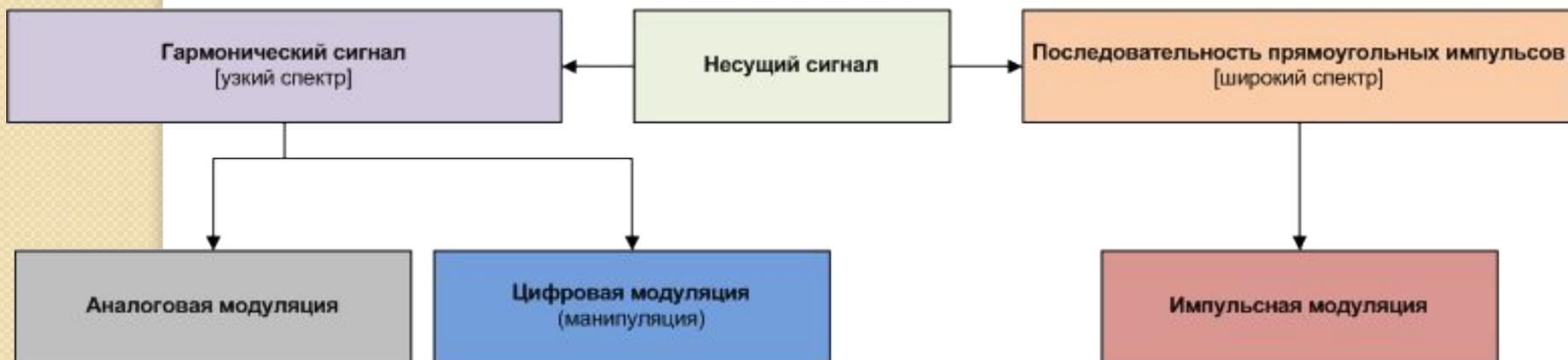
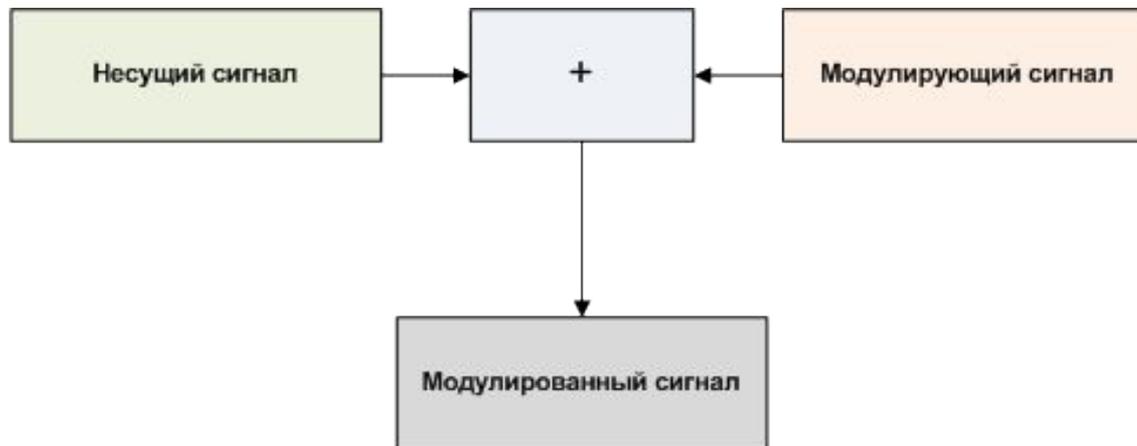
Определение

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

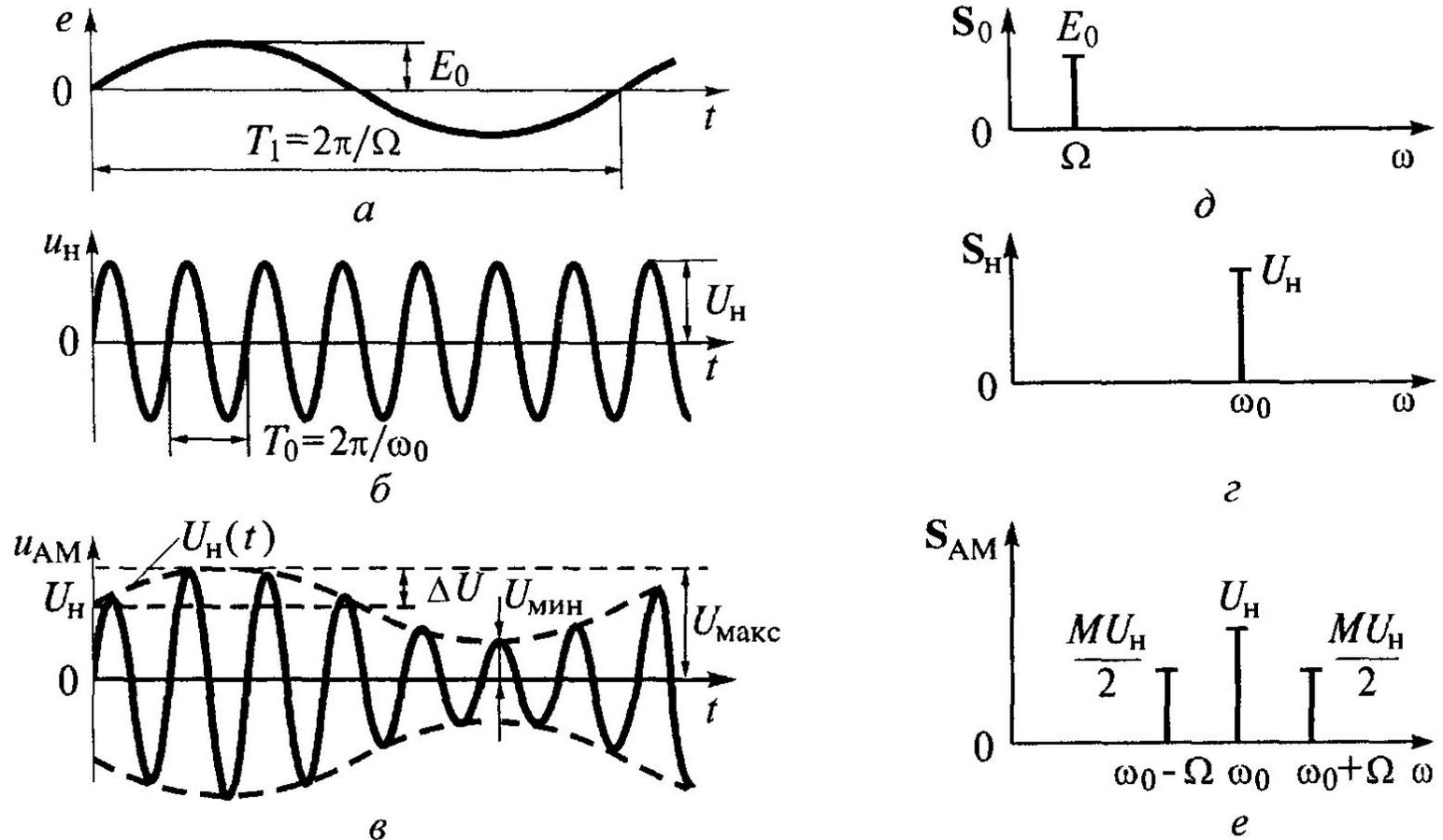


Рис. 2.28. Амплитудная модуляция:
a — модулирующий сигнал; *б* — несущее колебание; *в* — АМ-сигнал;
г — *д* — соответствующие спектры

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

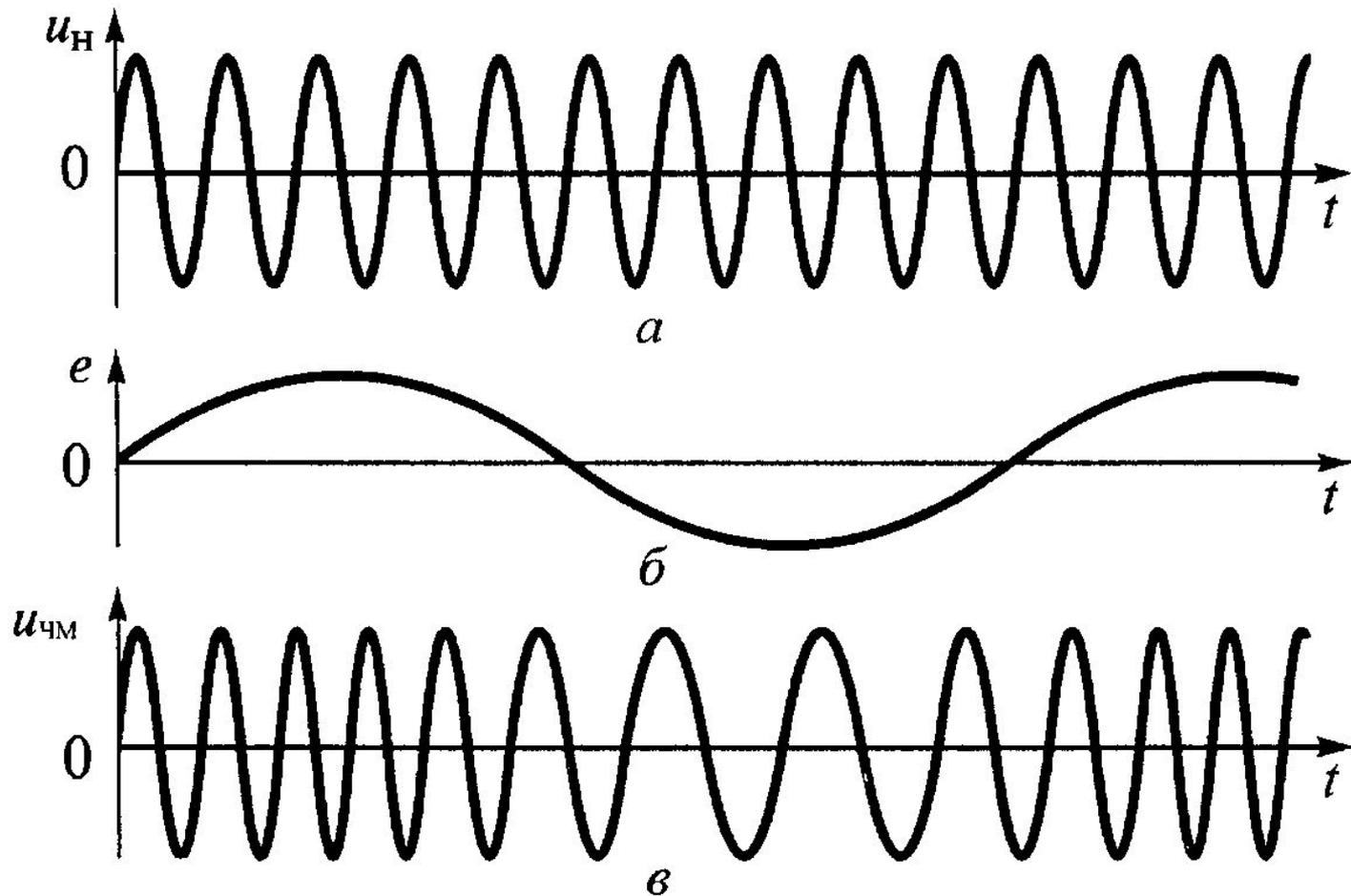


Рис. 2.38. Частотная однотоновая модуляция:
a — несущее колебание; *б* — модулирующий сигнал; *в* — ЧМ-сигнал

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:

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

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

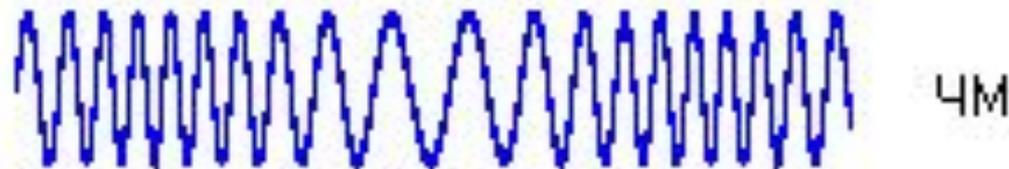
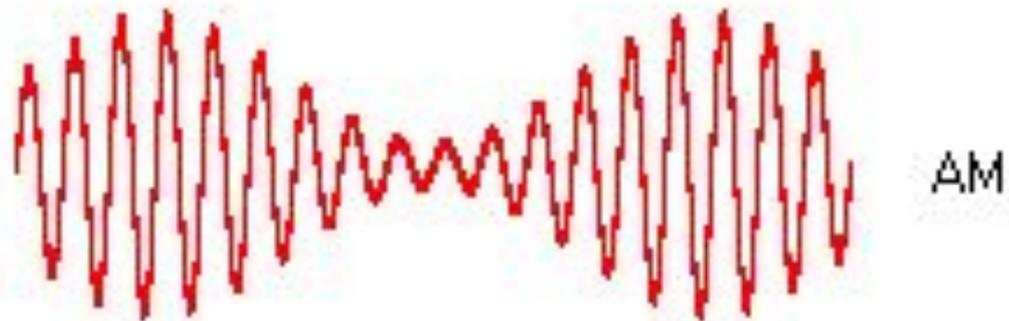
Аналоговая фазовая модуляция

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 λ , и текущей задачи. Для переносных телефонов размер антенны обычно равен $\lambda/4$, а длина волны c/f , где c — скорость света, 3×10^8 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)

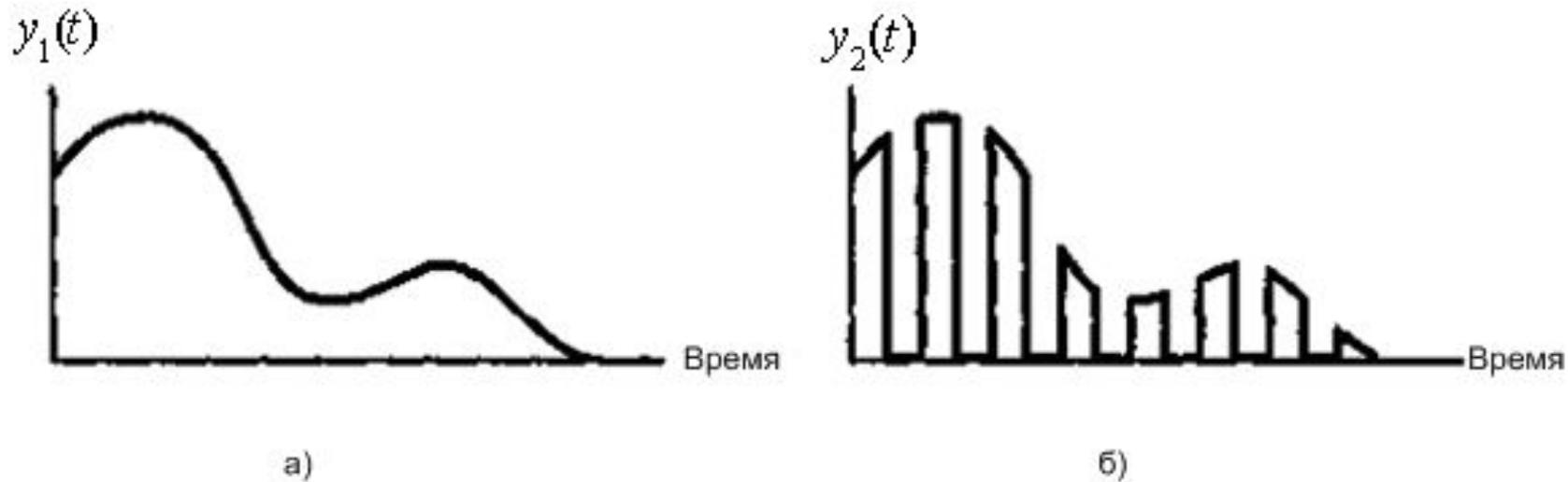
Амплитудно-импульсная модуляция

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 РЧМ 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.

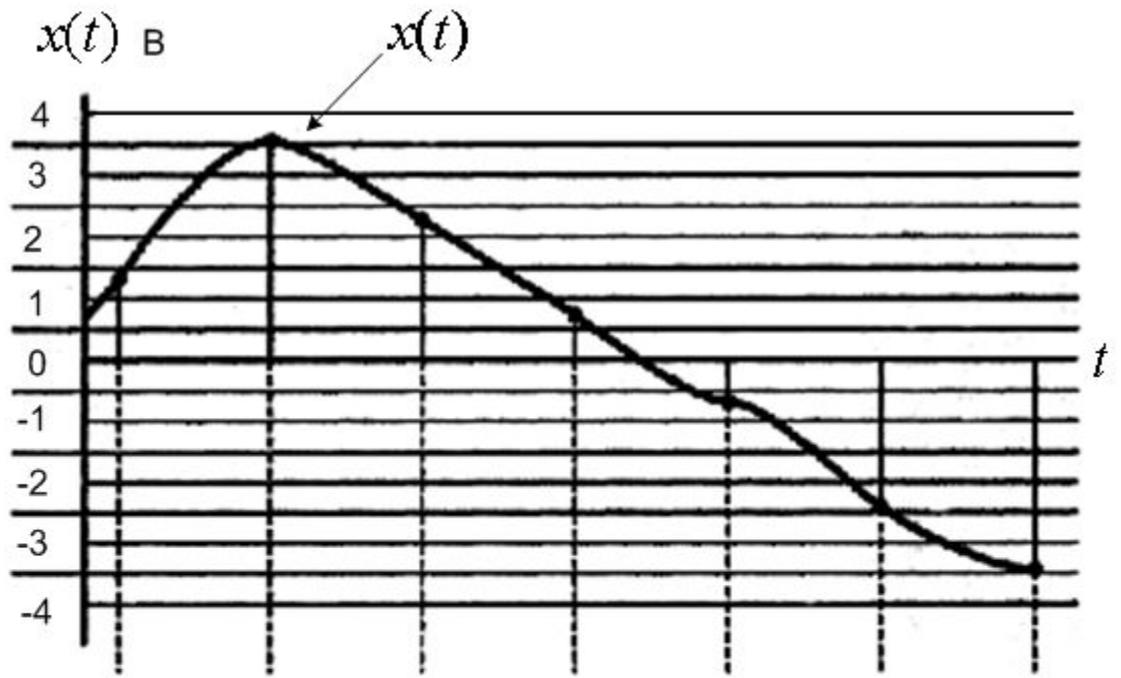
На оси ординат отложены уровни квантования и их кодовые номера. Каждая выборка аналогового сигнала аппроксимируется ближайшим уровнем квантования.

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
-----	-----	-----	-----	------	------	------

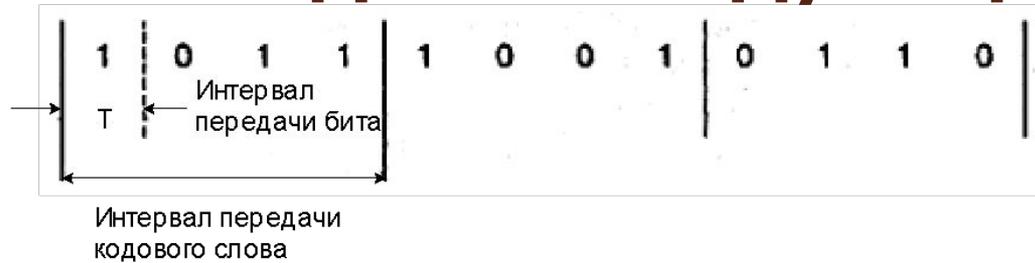
Кодовый номер

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

Последовательность РСМ

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

Импульсно-кодовая модуляция



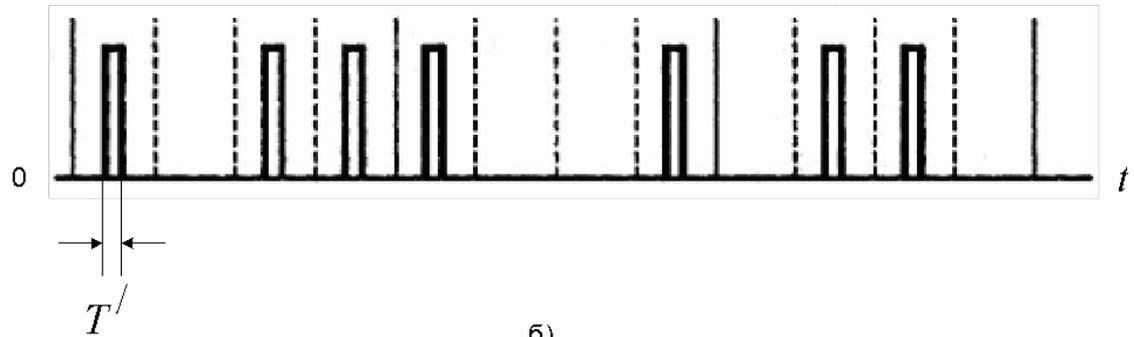
а)

Пример представления двоичных цифр в форме сигналов:

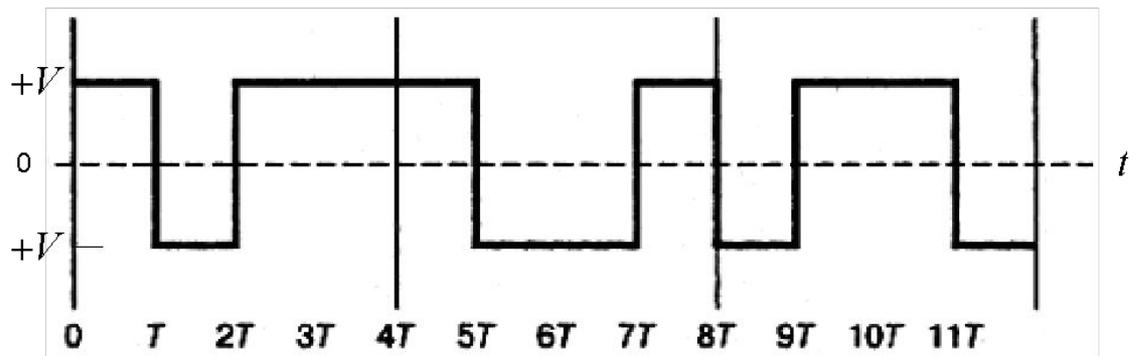
а) последовательность РСМ;

б) импульсное представление последовательности РСМ;

в) импульсный сигнал (переход между двумя уровнями)



б)



в)

Импульсно-кодовая модуляция

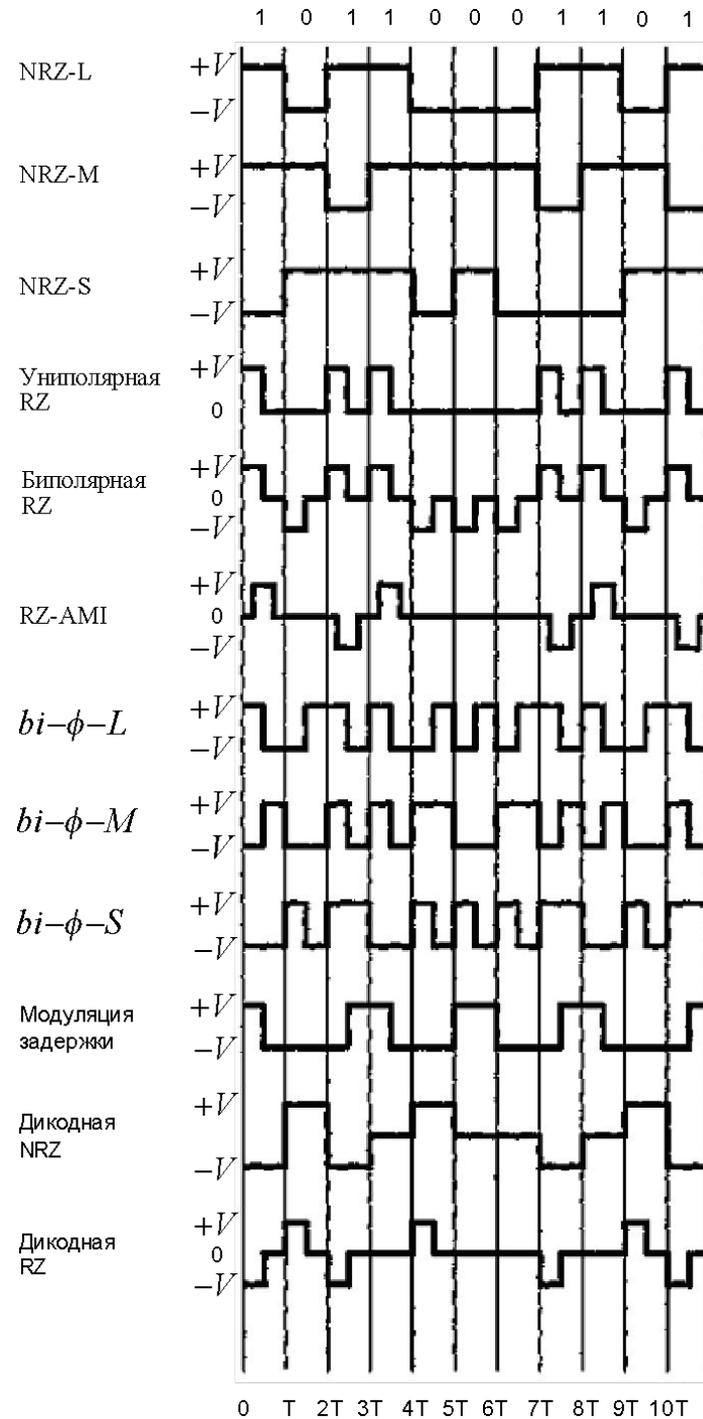
При применении импульсной модуляции к недвоичному символу получаем сигнал, называемый M -арным импульсно-модулированным

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.

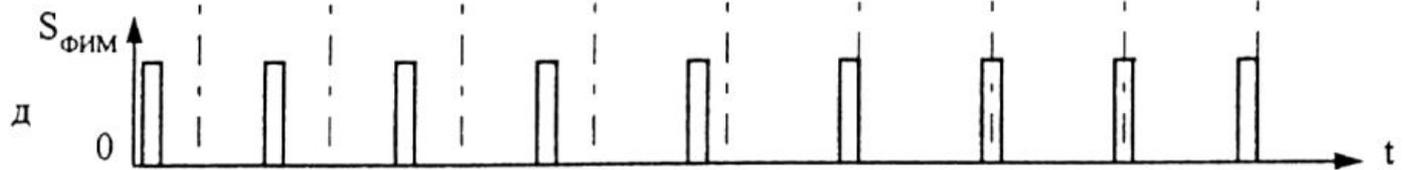
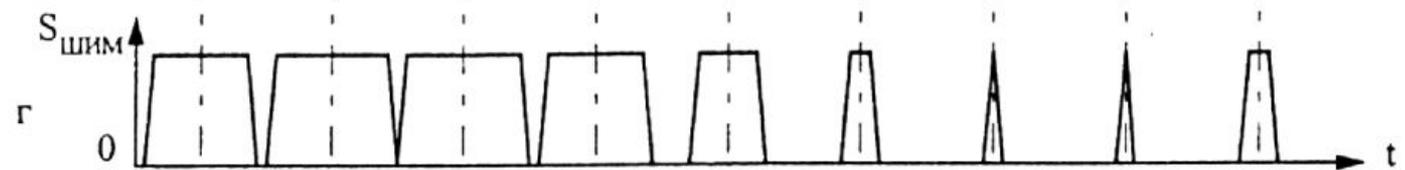
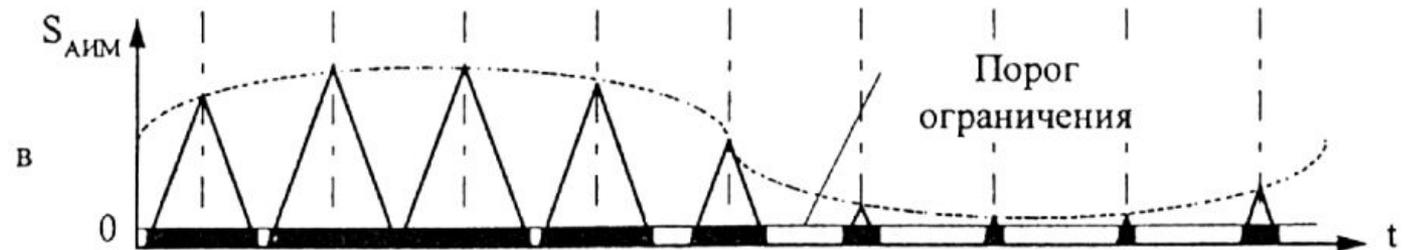
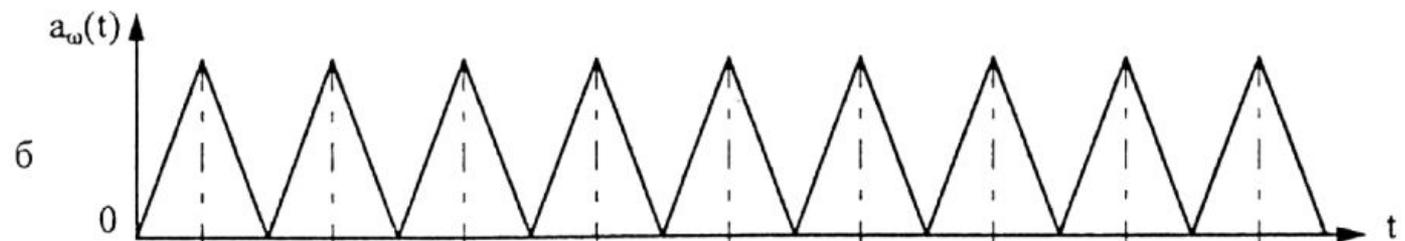
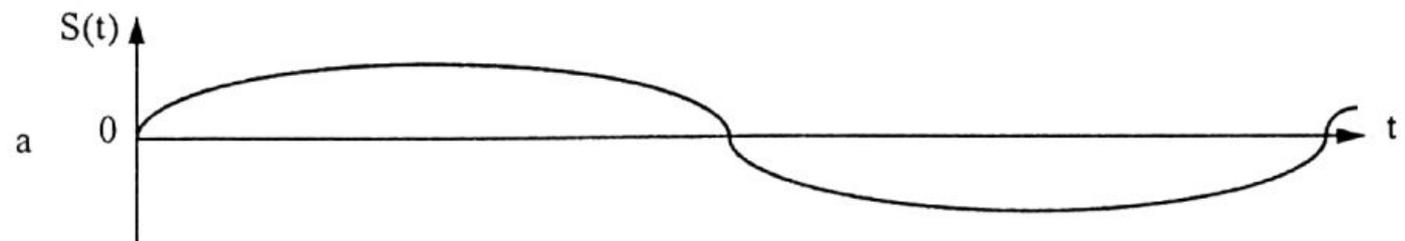
Фазово- импульсная модуляция

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

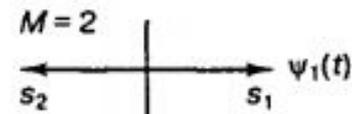
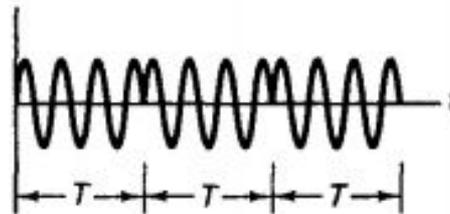
Некогерентная демодуляция относится к системам, использующим демодуляторы, спроектированные для работы без знания абсолютной величины фазы входящего сигнала; следовательно, определение фазы в этом случае не требуется. Таким образом, преимуществом некогерентных систем перед когерентными является простота,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

a) PSK

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

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

$$0 \leq t \leq T$$

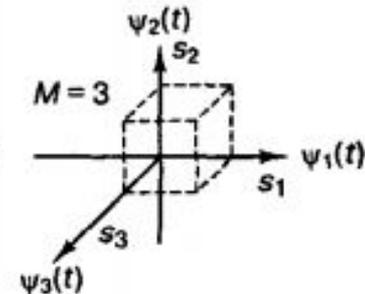
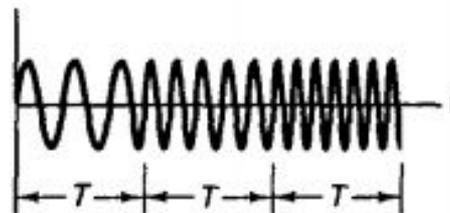


б) FSK

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

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

$$0 \leq t \leq T$$

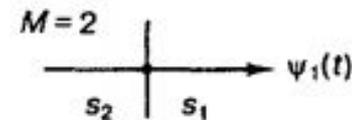
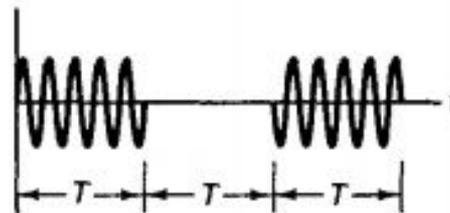


в) ASK

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

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

$$0 \leq t \leq T$$

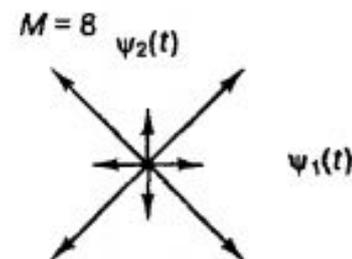
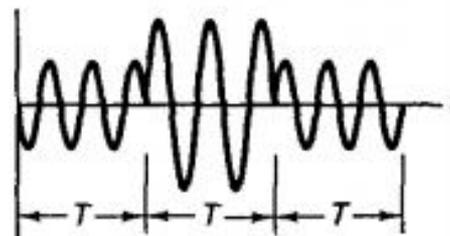


г) ASK/PSK (APK)

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

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

$$0 \leq t \leq T$$



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 ω_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

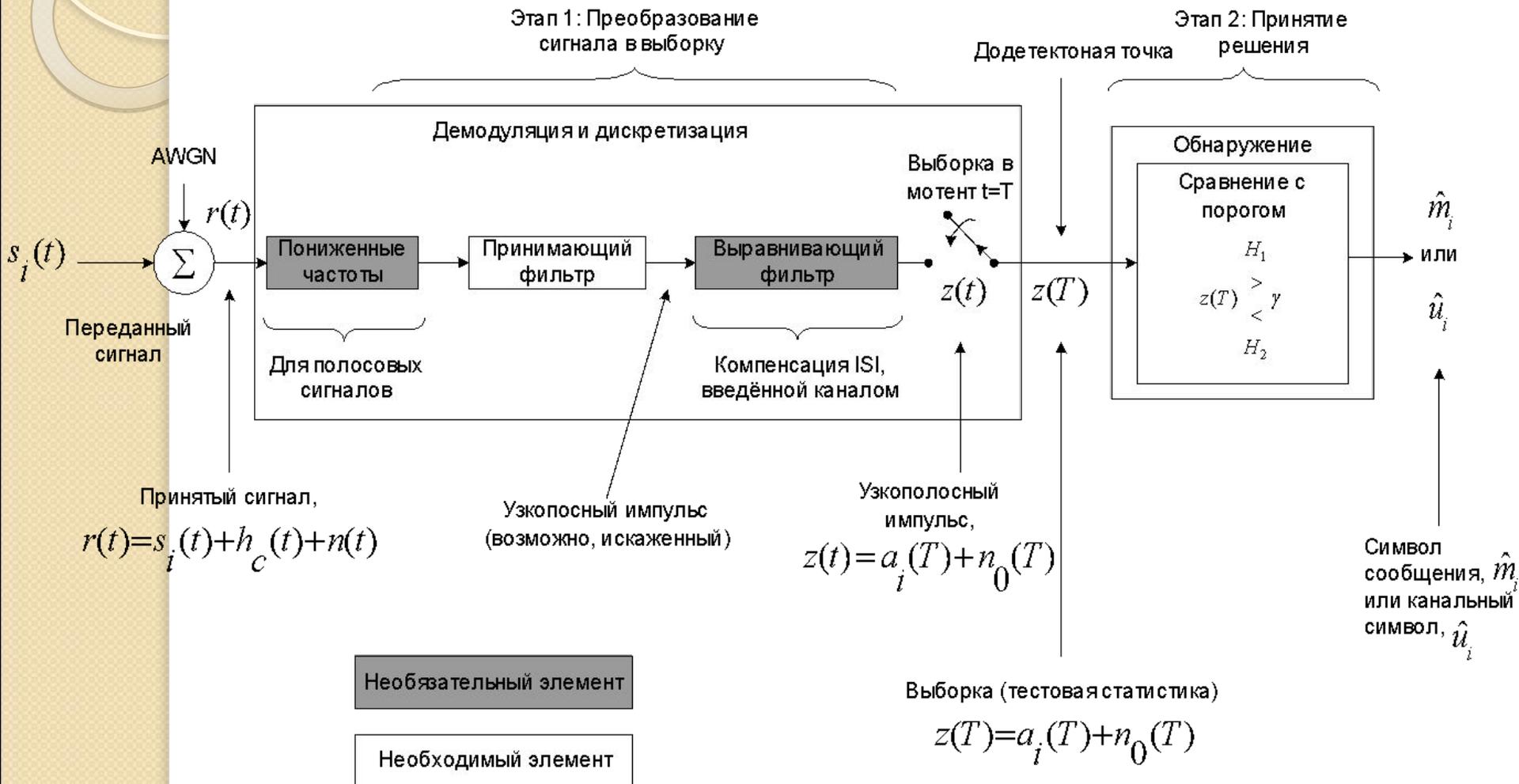
$$s_i(t) = \begin{cases} s_1(t) & 0 \leq t \leq T \text{ для символа } 1 \\ s_2(t) & 0 \leq t \leq T \text{ для символа } 0 \end{cases}$$

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

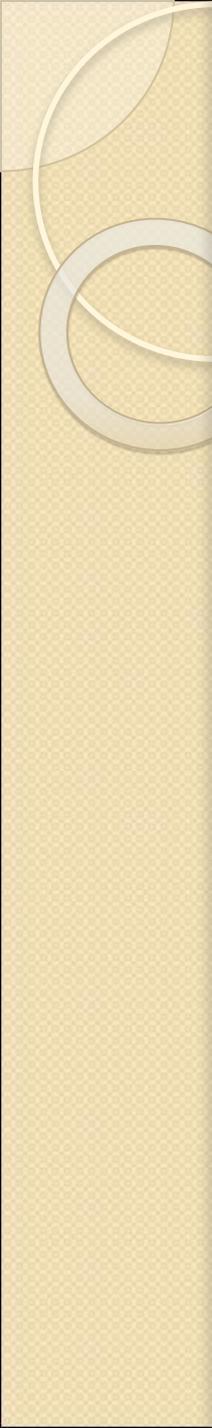
Поскольку $z(T)$ является сигналом напряжения, пропорциональным энергии принятого символа, то чем больше амплитуда $z(T)$, тем более достоверным будет процесс принятия решения относительно цифрового значения сигнала.

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