



Цифровая обработка сигналов и изображений

Модуляция сигнала

Перцев Дмитрий

April 24, 2025



Белорусский государственный
университет
информатики и радиоэлектроники



Table of Contents

1 Гармонический детерминированный сигнал

► Гармонический детерминированный сигнал

► Модуляция

► Амплитудная модуляция

► Угловая модуляция

► Линейная частотная модуляция

► Манипуляция



Гармонический детерминированный сигнал

1 Гармонический детерминированный сигнал

- Гармонический сигнал задается уравнением:

$$s(t) = A \cdot \sin(2\pi ft + \phi)$$

- где
 - A - амплитуда колебания
 - f - частота сигнала
 - ϕ - начальная фаза
- Комплексная запись такого сигнала:

$$s = A \cdot e^{j(2\pi ft + \phi)}$$

- $j = \sqrt{-1}$ - комплексная единица



Гармонический детерминированный сигнал

1 Гармонический детерминированный сигнал

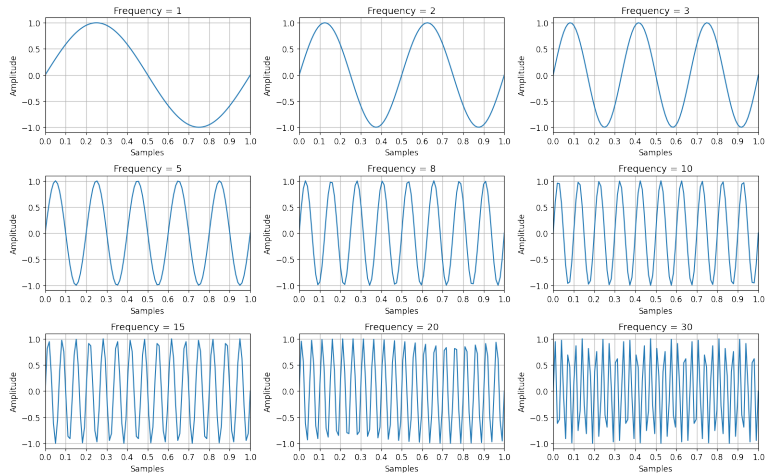




Table of Contents

2 Модуляция

► Гармонический детерминированный сигнал

► Модуляция

► Амплитудная модуляция

► Угловая модуляция

► Линейная частотная модуляция

► Манипуляция



Модуляция

2 Модуляция

- **модуляцией** называется процесс изменения одного или нескольких параметров сигнала
- для цифровых сигналов модуляция дискретными колебаниями иногда называется *манипуляция*
 - модулируемый сигнал называется **"несущим"** (на частоте этого сигнала передается модулируемое сообщение)
 - как правило, низкочастотный
 - информационный сигнал называется **модулирующим**
 - как правило, высокочастотный
- передача электромагнитного поля в пространстве выполняется с помощью антенн, размер которых зависит от длины волны λ
 - низкочастотные информационные сигналы во многих случаях просто физически невозможно передать от источника к получателю (требуется антенны огромных размеров)
 - в связи с этим применяются методы модуляции высокочастотных несущих колебаний



Модуляция

2 Модуляция

Использование модуляции позволяет:

- согласовать параметры сигнала с параметрами линии;
- повысить помехоустойчивость сигналов;
- увеличить дальность передачи сигналов;
- организовать многоканальные системы передачи.

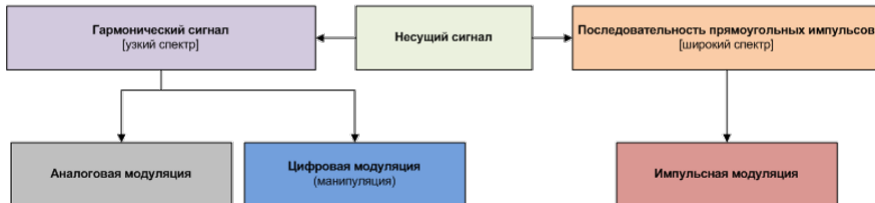
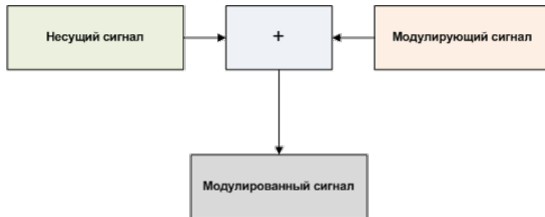
При модуляции на вход модулятора подаются сигналы:

- $u(t)$ - модулирующий, данный сигнал является информационным и низкочастотным (его частоту обозначают W или F);
- $S(t)$ - модулируемый (несущий), данный сигнал является неинформационным и высокочастотным (его частота обозначается w_0 или f_0);
- $S_{res}(t)$ - модулированный сигнал, данный сигнал является информационным и высокочастотным.



Модуляция

2 Модуляция





Модуляция

2 Модуляция

В качестве несущего сигнала может использоваться:

- гармоническое колебание, при этом модуляция называется *аналоговой* или *непрерывной*;
- периодическая последовательность импульсов, при этом модуляция называется *импульсной*;
- постоянный ток, при этом модуляция называется *шумоподобной*.



Table of Contents

3 Амплитудная модуляция

- ▶ Гармонический детерминированный сигнал
- ▶ Модуляция
- ▶ Амплитудная модуляция
- ▶ Угловая модуляция
- ▶ Линейная частотная модуляция
- ▶ Манипуляция



Амплитудная модуляция

3 Амплитудная модуляция

- Формула простейшего гармонического АМ-сигнала:

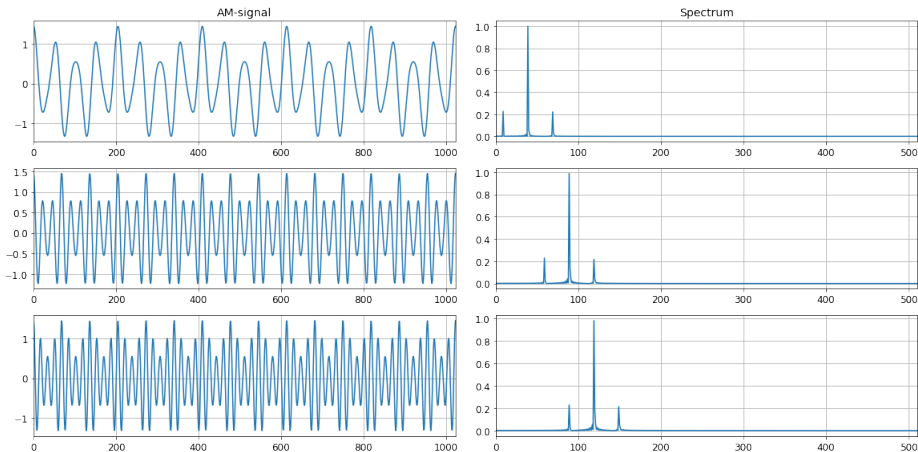
$$s(t) = A_c \cdot (1 + m \cdot \cos(\omega_m t + \phi)) \cdot \cos(\omega_c t)$$

- где
 - A_c - амплитуда несущего колебания
 - ω_c - частота несущего сигнала
 - ω_m - частота модулирующего (информационного) сигнала
 - ϕ - начальная фаза модулирующего сигнала
 - m - коэффициент модуляции
- в примере боковые полосы представляют собой синусоидальные сигналы и их частоты равны $\omega_c + \omega_m$ и $\omega_c - \omega_m$
- спектр АМ-сигнала всегда симметричен относительно центральной (несущей) частоты



Амплитудная модуляция (изменение несущей частоты f_c)

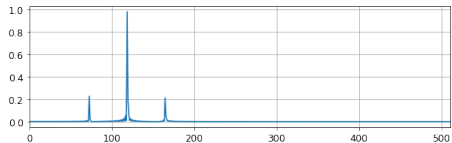
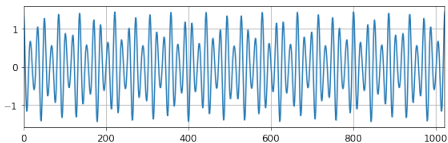
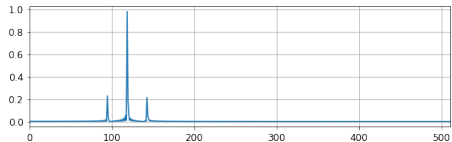
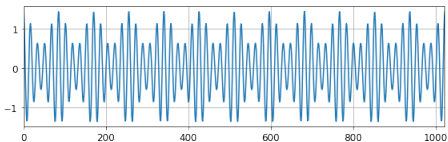
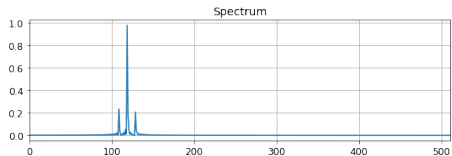
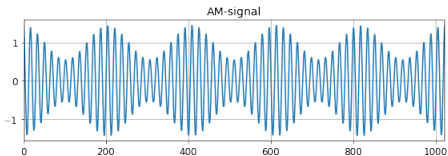
3 Амплитудная модуляция





Амплитудная модуляция (изменение частоты модулирующего колебания f_s)

3 Амплитудная модуляция





Амплитудная модуляция (изменение коэффициента модуляции m)

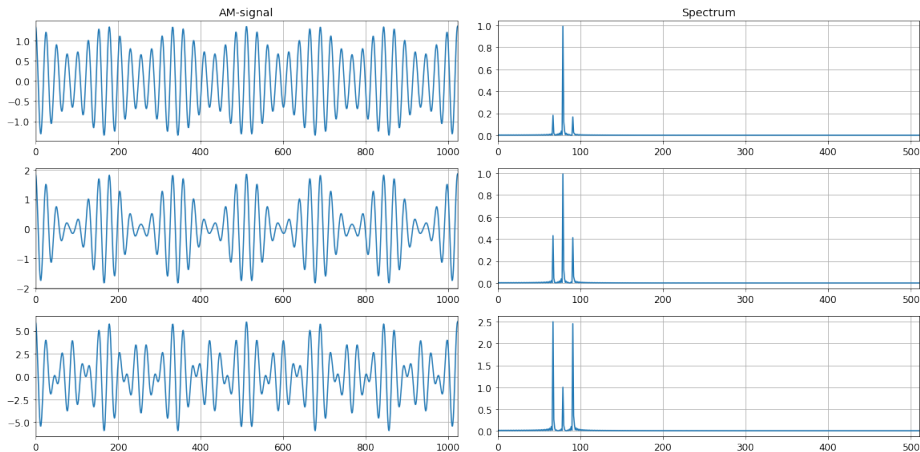
3 Амплитудная модуляция

- Амплитуда центральной гармоники равна амплитуде несущего колебания:
 $A_c = A_0$
- Амплитуда боковых составляющих равна $A_m = \frac{A_0 \cdot m}{2}$



Амплитудная модуляция (изменение коэффициента модуляции m)

3 Амплитудная модуляция





Амплитудная модуляция: разновидности

3 Амплитудная модуляция

- сигналы с *подавленной несущей* (балансная модуляция) относятся к классу АМ-сигналов, и позволяют производить передачу сообщений более экономно в плане энергетических спектральных характеристик
- модуляция с *одной боковой полосой* (single-sideband modulation, SSB), нашедшая применение в профессиональной и любительской радиосвязи
 - модуляция с *верхней* боковой полосой (upper sideband, USB)
 - модуляция с *нижней* боковой полосой (lower sideband, LSB)



Table of Contents

4 Угловая модуляция

- ▶ Гармонический детерминированный сигнал
- ▶ Модуляция
- ▶ Амплитудная модуляция
- ▶ Угловая модуляция**
- ▶ Линейная частотная модуляция
- ▶ Манипуляция



Угловая модуляция

4 Угловая модуляция

- понимается модуляция по фазе или по частоте (математически можно представить, что изменяется "угол" тригонометрической функции)
- делятся на
 - частотно-модулированные (ЧМ) сигналы
 - информационный сигнал управляет частотой несущего колебания
 - фазо-модулированные (ФМ) сигналы
 - значение угла фазы изменяется пропорционально информационному сообщению
- применяются в музыкальных синтезаторах, в телевидении для передачи звука и сигнала цветности, для качественной передачи звуковых сообщений (например, радиовещание в УКВ диапазоне)
- высокое качество в сравнении с АМ-сигналами достигается за счет лучшего использования частотного диапазона передаваемого сообщения (в полосе сигнала укладывается больше информации, чем в сигналах с АМ-модуляцией)
- менее подвержено серьёзному влиянию окружающей среды при передаче, поскольку информация содержится не в амплитуде



Угловая модуляция

4 Угловая модуляция

- формула сигнала с модуляцией гармоническим колебанием:

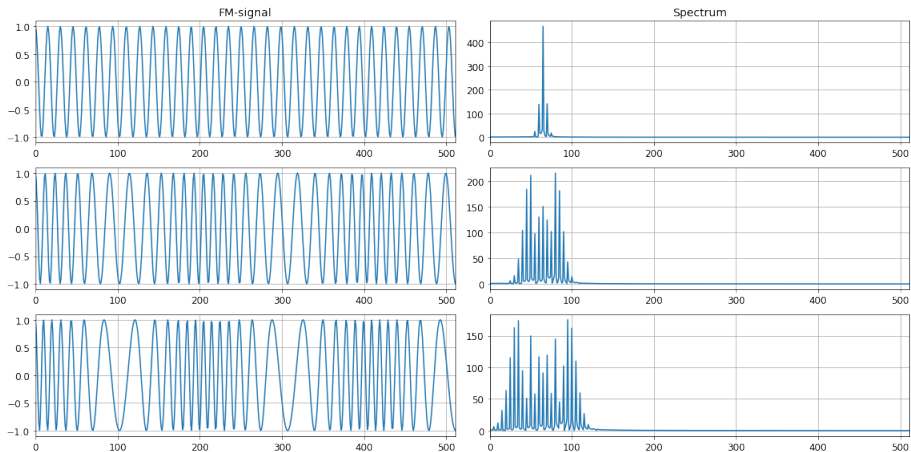
$$s(t) = A_c \cdot \cos(2\pi f_c t + \frac{A_m f_\delta}{f_m} \sin(2\pi f_s t))$$

- где
 - A_c - амплитуда несущего колебания
 - A_m - амплитуда модулирующего колебания
 - f_c - частота несущего сигнала
 - f_m - частота модулирующего (информационного) сигнала
 - f_δ - девиация частоты
- отношение девиации частоты к частоте модулирующего колебания называют *индексом частотной модуляции*
- модулирующая частота - низкочастотная относительно частоты несущей



Угловая модуляция (в зависимости от значения девиации частоты f_{δ})

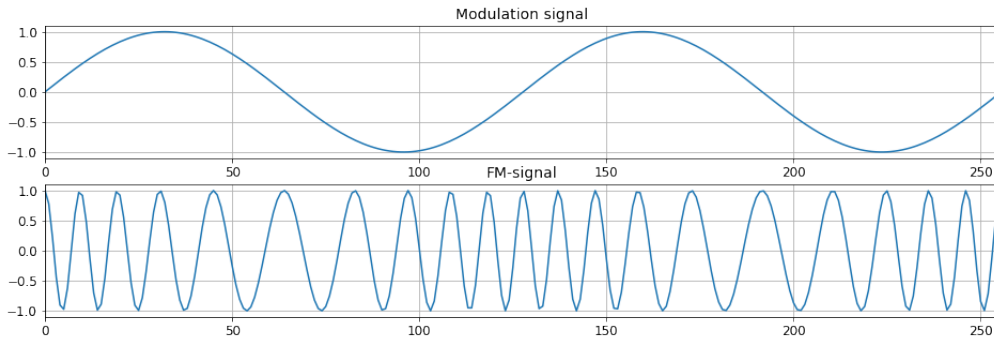
4 Угловая модуляция





Угловая модуляция (модулирующий и частотно-модулированный сигналы)

4 Угловая модуляция



- чем больше девиация по частоте, тем шире спектр сигнала с угловой модуляцией



Table of Contents

5 Линейная частотная модуляция

- ▶ Гармонический детерминированный сигнал
- ▶ Модуляция
- ▶ Амплитудная модуляция
- ▶ Угловая модуляция
- ▶ **Линейная частотная модуляция**
- ▶ Манипуляция



Линейная частотная модуляция

5 Линейная частотная модуляция

- это класс сигналов с частотной модуляцией, при которой частота несущего сигнала изменяется по линейному закону
- в задачах радиолокации часто требуется получить заданную разрешающую способность по дальности (минимальное расстояние между двумя целями, при которой дальность до каждой из целей определяется отдельно)
 - эта величина обратно пропорциональна ширине спектра сигнала
 - следовательно необходимо увеличивать ширину спектра для уменьшения значения разрешающей способности
 - уменьшения длительности сигнала (минус - уменьшение энергии сигнала и дальности обнаружения)



Линейная частотная модуляция

5 Линейная частотная модуляция

- функция изменения частоты линейна:

$$f(t) = f_0 + kt$$

- где
 - $f_0 = (F_{max} + F_{min})/2$ - центральное значение несущей частоты.
 - $k = (F_{max} - F_{min})/T_c$ - коэффициент модуляции
 - T_c - длительность сигнала
- база сигнала, которая характеризуется произведением ширины спектра и длительности импульса сигнала:

$$\beta = \delta f \cdot \tau$$

- $\beta \gg 1$ - спектр стремится к прямоугольному виду, а фазовый спектр имеет квадратичную зависимость от частоты



Линейная частотная модуляция

5 Линейная частотная модуляция

- пример функции ЛЧМ:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \pi \beta t^2)$$

- где
 - A - амплитуда сигнала
 - f_0 - начальное значение частоты
 - β - коэффициент ЛЧМ-модуляции



Линейная частотная модуляция

5 Линейная частотная модуляция

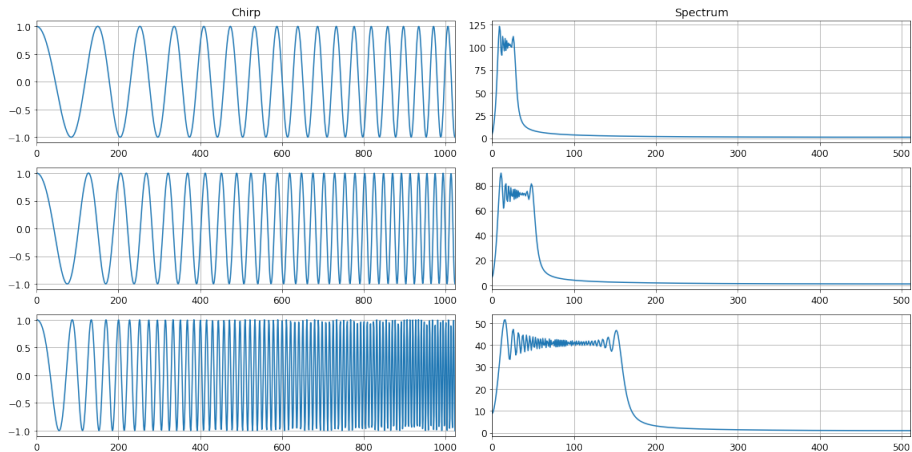




Table of Contents

6 Манипуляция

- ▶ Гармонический детерминированный сигнал
- ▶ Модуляция
- ▶ Амплитудная модуляция
- ▶ Угловая модуляция
- ▶ Линейная частотная модуляция
- ▶ Манипуляция



Манипуляция

6 Манипуляция

- при низкочастотной модуляции (baseband modulation) эти сигналы имеют вид импульсов заданной формы
- для полосовой модуляции (bandpass modulation) импульсы заданной формы модулируют синусоиду, называемую несущей (carrier frequency)
- виды манипуляций:
 - амплитудная (и квадратурная амплитудная) манипуляция (АМн и КАМ)
 - amplitude-shift keying, ASK - преобразование сигнала, при котором скачкообразно меняется амплитуда несущего колебания
 - квадратурная амплитудная манипуляция высоких порядков (Quadrature amplitude modulation, QAM)
 - частотная манипуляция (ЧМн, Frequency-shift keying, FSK)
 - преобразование сигнала, при котором скачкообразно меняется частота несущего сигнала в зависимости от значения цифрового сообщения
 - фазовая манипуляция (ФМн, Phase-shift keying, PSK)
 - процесс преобразования сигнала, при котором скачкообразно изменяется фаза несущего колебания
 - существует большой класс сигналов с фазовой манипуляцией: двоичная (BPSK, QPSK, 8-PSK и т.д.)



Амплитудная манипуляция

6 Манипуляция

- QAM-модуляция
- изменяется амплитуда и фаза сигнала, позволяет увеличить количество передаваемой информации
- сигнальное созвездие (constellation diagram) - все возможные значения комплексной амплитуды манипулированного сигнала в виде точек на комплексной плоскости
 - в идеале - прямоугольные, но на практике используются более гладкие импульсы в связи с тем, что для обеспечения строго прямоугольных модулирующих импульсов требуется недопустимо широкая полоса спектра сигнала



Амплитудная манипуляция

6 Манипуляция

- для обеспечения высокой скорости передачи и качественного уровня достоверности приёма использование сигналов только с амплитудной модуляцией - недостаточно
 - на практике - сигналы с модуляцией по нескольким параметрам (например, с амплитудно-фазовой манипуляцией)
 - путём комбинирования методов амплитудной и фазовой манипуляции
 - позволяет увеличить количество передаваемых бит в одном символе
 - позволяет повысить помехоустойчивость по сравнению с использованием только АМн или ФМн колебаний





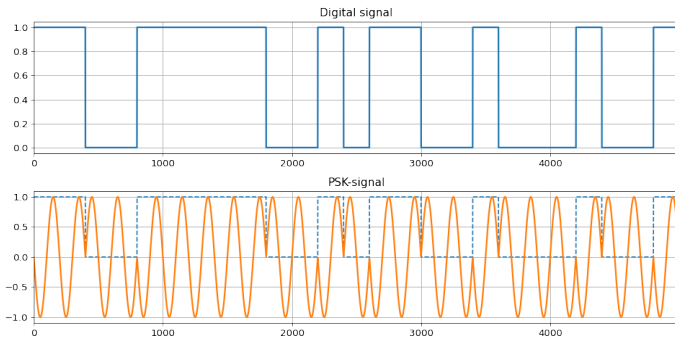
-
- The figure consists of two vertically stacked plots sharing a common x-axis representing time in samples, ranging from 0 to 3500.
- The top plot, titled "Digital signal", displays a blue square wave. The signal is at a high level (1.0) for the first 400 samples, then drops to a low level (0.0) for the next 400 samples. It then returns to high for 1000 samples, drops to low for 400 samples, returns to high for 400 samples, drops to low for 400 samples, and finally returns to high for the last 400 samples shown.
- The bottom plot, titled "FSK-signal", displays an orange sine wave. The frequency of this sine wave is modulated based on the digital signal. When the digital signal is high, the sine wave has a higher frequency (approximately 10 cycles per 1000 samples). When the digital signal is low, the sine wave has a lower frequency (approximately 5 cycles per 1000 samples). A dashed blue line indicates the reference frequency levels for the high and low states.



Фазовая манипуляция

6 Манипуляция

- BPSK, Binary phase-shift keying
- изменяемый параметр - фаза
- логическая '1' - нулевая начальная фаза
- логический '0' – противоположное значение π (для двухбитовой фазовой манипуляции)





Цифровая обработка сигналов и изображений

Thank you for listening!
Any questions?