

5. Модуляция

За пренос на информация на големи разстояния чрез ЕМ вълни с малки загуби.

1. Определение: Промяна на един от параметрите на периодичен сигнал, като функция на амплитудата на друг сигнал.

А. Хармонична модуляция – периодичният сигнал е синусоида

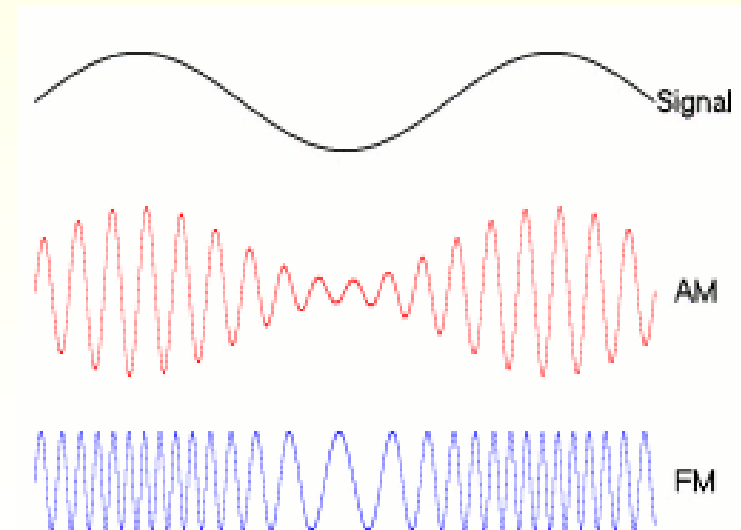
$$s(t) = S_m \sin(\omega_0 \cdot t + \phi)$$

Носещ сигнал-висока честота

$$s_i(t) = S_{mi} \sin(\Omega t) \Rightarrow \omega_0 \gg \Omega$$

Модулиращ (информационен) сигнал с ниска честота

- Амплитудна (АМ) модуляция
- Честотна (FM) модуляция
- Фазова (PM) модуляция

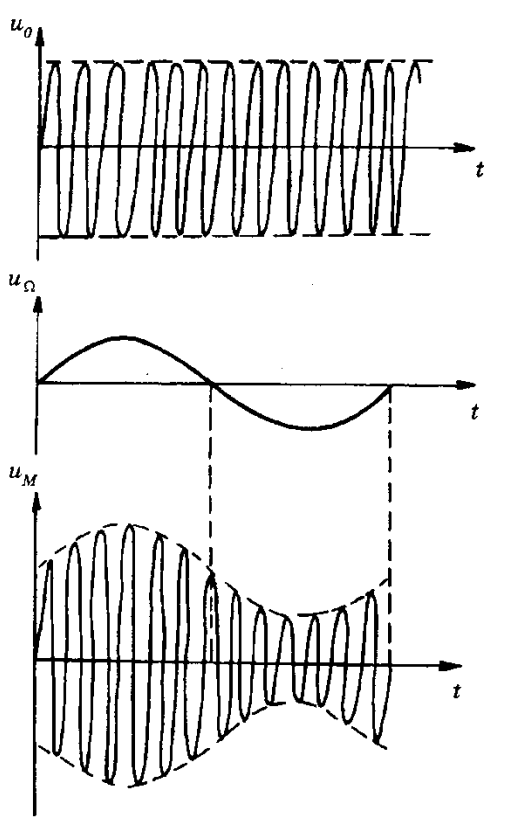


В. Импульсна модуляция – периодичният сигнал е правоъгълни импулси

5. Модуляция

2. Хармонична модуляция

2.А Амплитудна (АМ) модуляция



$$u_0 = U_{0m} \cos(\omega_0 t) \quad - \text{носещ сигнал (carrier)}$$

$$u_{\Omega} = U_{\Omega m} \cos(\Omega t) \quad - \text{модулиращ сигнал} \quad \Omega \ll \omega_0$$

(Base-Band Signal –BBS)

- модулиран сигнал (Pass Band Signal-PBS)

$$u_M = (U_{0m} + U_{\Omega m} \cos(\Omega t)) \cos(\omega_0 t)$$
$$= U_{0m} (1 + m \cdot \cos(\Omega t)) \cos(\omega_0 t)$$

$$m = \frac{U_{\Omega m}}{U_{0m}}$$

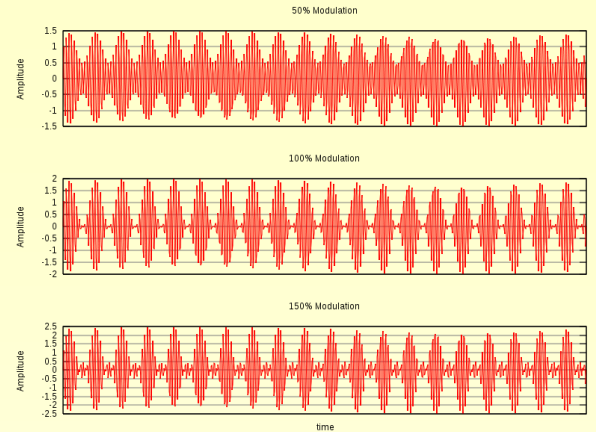
- коэффициент на АМ (дълбочина на АМ)

5. Модуляция

Амплитудна (AM) модулация

- $m \leq 50\%$
- $m \leq 100\%$
- $m \geq 100\%$

- недълбока модулация
- дълбока модулация
- премодулация



Спектър на AM сигнал

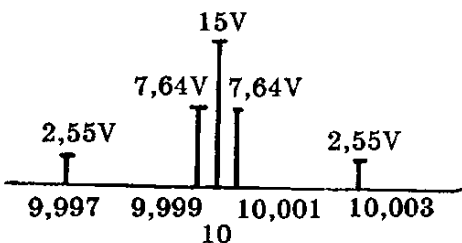
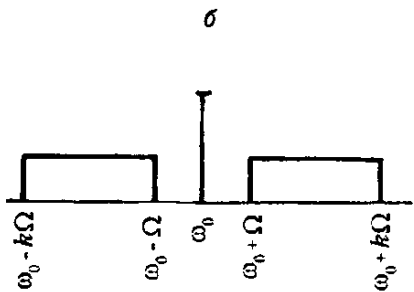
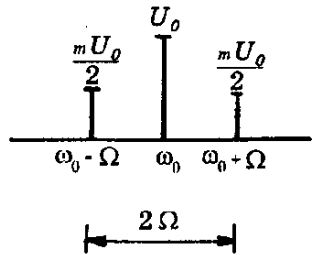
$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)]$$

$$\begin{aligned}
 u_M &= U_{0m} (1 + m \cdot \cos(\Omega t)) \cos(\omega_0 t) = \\
 &= U_{0m} \cos(\omega_0 t) + U_{0m} \cdot m \cdot \cos(\Omega t) \cdot \cos(\omega_0 t) \\
 &= U_{0m} \cos(\omega_0 t) + \frac{U_{0m} \cdot m}{2} \cos((\omega_0 - \Omega) t) \\
 &\quad + \frac{U_{0m} \cdot m}{2} \cos((\omega_0 + \Omega) t)
 \end{aligned}$$

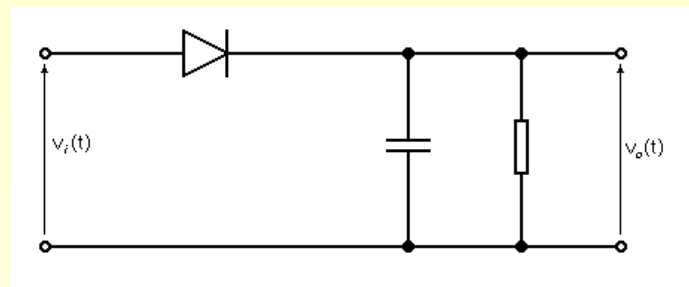
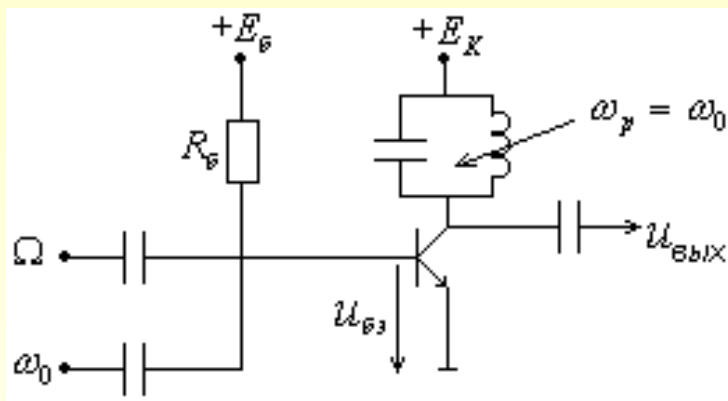
$\omega_0,$ $\omega_0 - \Omega,$ $\omega_0 + \Omega,$

- носеща, долна и горна странични честоти

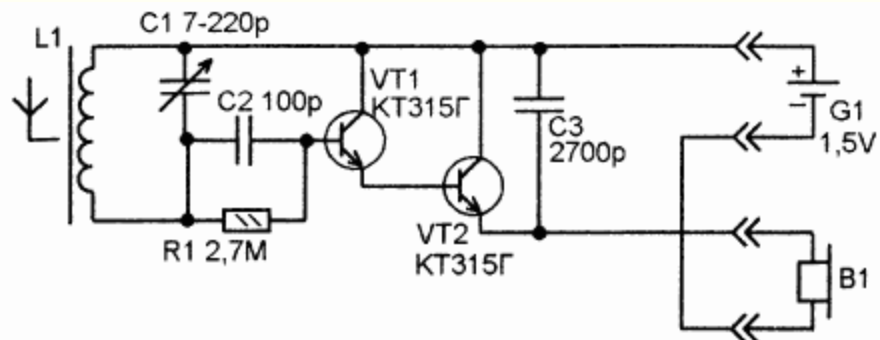
$$W = (\omega_0 + \Omega) - (\omega_0 - \Omega) = 2 \cdot \Omega \quad \text{широчина на спектъра}$$



Амплитуден модулатор и демодулатор



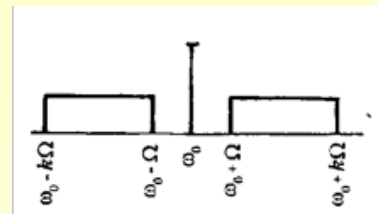
АМ- радио-приемник на СВ и ДВ



5. Модуляция

Ако **модулиращият сигнал** (говор, музика) не е синусоиден сигнал, той ще съдържа в спектъра си **хармонични до $k \cdot \Omega$** .

$\omega_0 - k \cdot \Omega, \omega_0 - \Omega, \quad W = 2 \cdot k \cdot \Omega$ -широчина на спектъра
 $\omega_0 + \Omega, \omega_0 + k \cdot \Omega,$



2 странични ленти на спектъра

Модулиращ сигнал- меандър с $f=1$ kHz и $U_{max}=6$ V, носеща $f_0=10$ MHz, $m=0.8$,

Ограничаваме се до $k=3 \rightarrow U_{m1}=7.64$ V, $U_{m3}=2.55$ V,

долна странична лента 9997 kHz-9999 kHz и горна 10001 kHz -10003 kHz.

Примери на приложение на АМ:

1. Радиоразпръскване- ДВ, СВ, КВ-

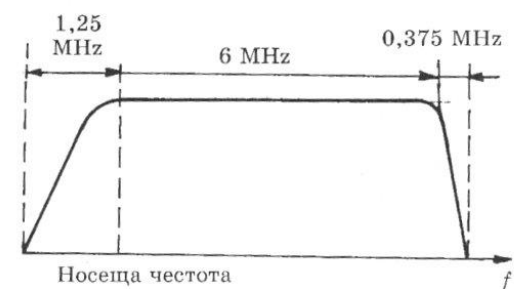
$$W = 2 \cdot 4500 = 9 \text{ kHz}$$

2. Телевизия- предаване на изображение чрез частично подтискане на долна странична лента.

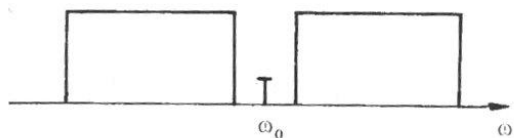
3. Модуляция с **подтискане на носещата честота** се използва за предаване на стереосигнали.

← Балансна модуляция – двулентова с амплитуда на носещия сигнал 10% от стандартната АМ.

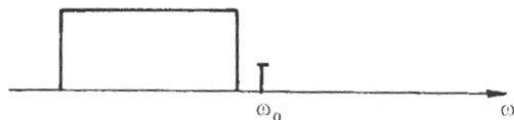
← Еднолентова модуляция



а



б



в

5. Модулация

2Б. Честотна (FM) модулация

$$u_{\Omega} = U_{\Omega m} \cos(\Omega t)$$

Модулиращият сигнал променя честотата на носещия сигнал.

$$\omega_M = \omega_0 + \kappa \cdot U_{\Omega m} \cos(\Omega t)$$

$$= \omega_0 + (\Delta\omega) \cdot \cos(\Omega t)$$

- **честотна девиация** на модулирания сигнал ~ амплитудата на модулиращия!

$$\Delta\omega = \kappa \cdot U_{\Omega m}$$

- честотен спектър $W \approx 2(\Delta\omega + \Omega)$

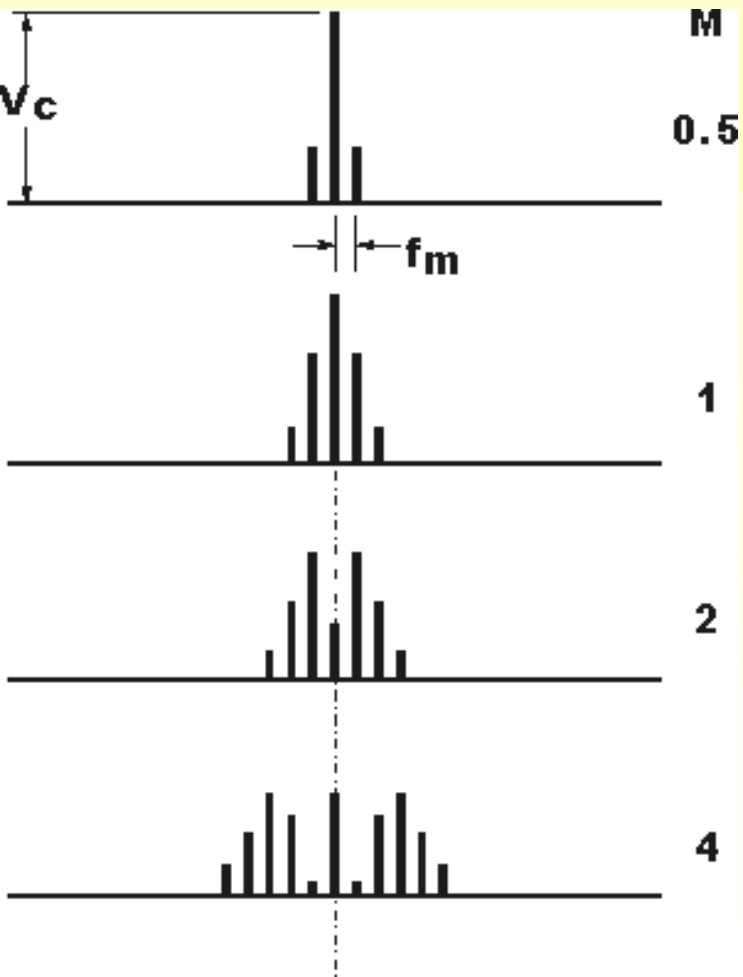
$$u_M = U_{0m} \cos(\omega_0 t + m_f \cdot \sin(\Omega t))$$

$$m_f = \frac{\Delta\omega}{\Omega}$$

- **индекс на честотната модулация**

- В радиоразпръскването в УКВ диапазона и на звука в TV - $\Delta f = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = 75\text{kHz}$
(2 x 75) + 15 kHz -> 175 kHz
- SECAM - двата сигнала за цвят се предават с ЧМ с $\Delta f = 850\text{kHz}$

Спектър на честотно-модулиран сигнал



Разпределение на честотите
на радиостанциите (MHz)

91.80

[Бистрица \(Бл\)](#)

[БНР Хоризонт](#)

91.80

[Враца](#)

[Радио Веселина](#)

91.80

[Копревщица](#)

[БНР Христо Ботев](#)

1 91.80

[Севлиево](#)

*Свободна честота
по план Женева '87*

91.90

[Добрич](#)

[Радио Добруджа](#)

2 91.90

[Петрич](#)

[Радио Vega+](#)

91.90

[София](#)

[БГ Радио](#)

91.90

[Шумен](#)

[Радио Fresh!](#)

4 92.00

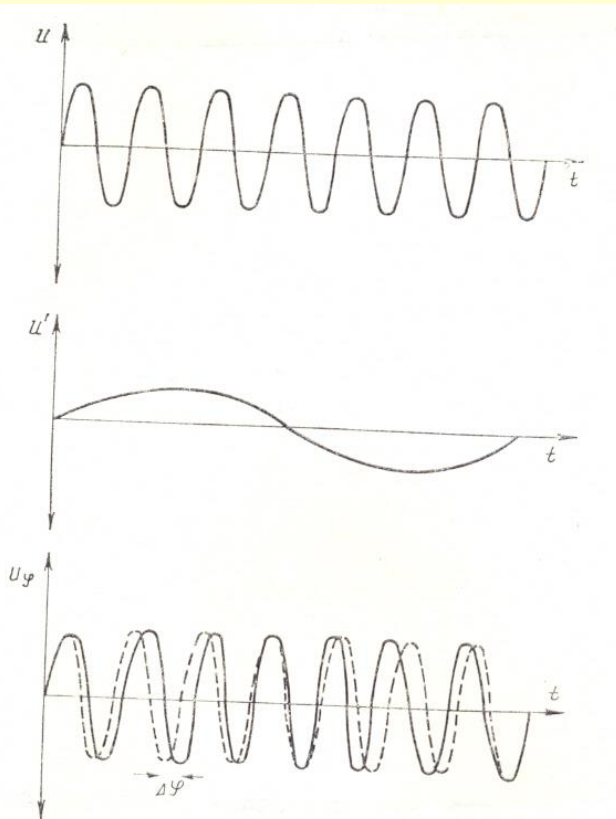
[Гоце Делчев](#)

[Радио В-99](#)

5. Модулация

2. В. Фазова модулация $u_{\Omega} = U_{\Omega m} \cos(\Omega t)$

Модулиращият сигнал променя **фазата на носещия сигнал.**



$$\Phi(t) = \omega_0 t + \varphi = \omega_0 t + \varphi(t)$$

$$= \omega_0 t + \Delta\varphi_p \cos(\Omega t)$$

$$u_M = U_m \cos(\omega_0 t + p U_{\Omega m} \cos(\Omega t))$$

$$= U_m \cos(\omega_0 t + m_p \cdot \cos(\Omega t))$$

Модулиран сигнал с променяща се начална фаза.

$$m_p = \Delta\varphi_p = p \cdot U_{\Omega m}$$

**-индекс на фазова
модулация**

$$(\Delta\omega)_p = m_p \cdot \Omega \quad \text{- девиация на честотата при фазова модулация}$$

- С нарастване на $U_{\Omega m}$, фазата $\varphi(t)$, расте по-бързо с времето отколкото линеен закон, а с намаляване на $U_{\Omega m}$ по-бавно.

5. Модулация

- Различия между честотната и фазова модулации:

1. Индексът на честотната модулация зависи от амплитудата и честотата на модулиращия сигнал а индексът на фазовата модулация само от амплитудата му.

$$m_f = \frac{\Delta\omega}{\Omega} \quad \Delta\omega = k \cdot U_{\Omega m} \quad m_p = \Delta\varphi_p = p \cdot U_{\Omega m} \quad (\Delta\omega)_p = m_p \cdot \Omega$$

2. Честотният спектър на модулирания сигнал зависи от индекса на модулацията:

-при честотна модулация \longrightarrow честотната лента остава почти постоянна

$$W \approx 2(\Delta\omega + \Omega)$$

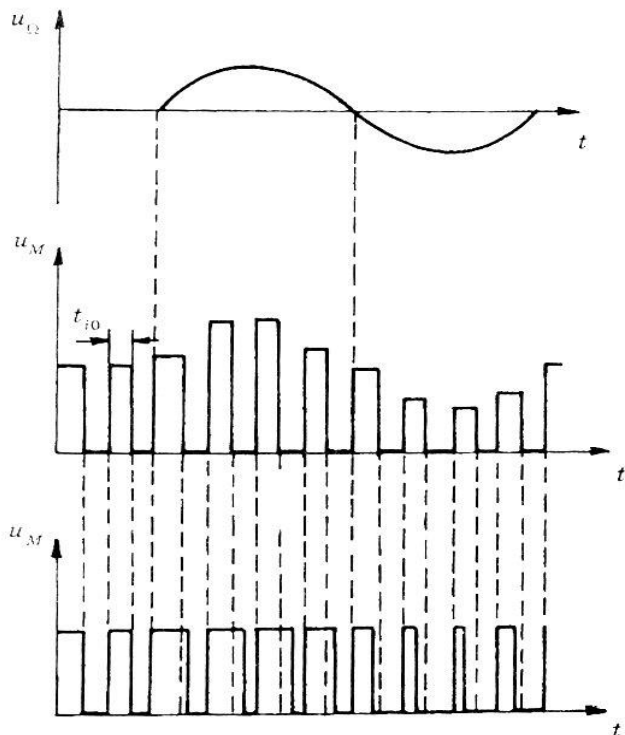
-при фазова модулация \longrightarrow честотната лента нараства с честотата на модулиращия сигнал

$$W \approx 2(\Delta\omega + \Omega) \quad (\Delta\omega)_p = m_p \cdot \Omega$$

ФМ има по-широка честотна лента но висока устойчивост на смущения.
Широко приложение в радиовръзките и многоканалните връзки.

5. Модуляция

3. Импульсна (ИМ) модуляция - носещия сигнал е поредица от импулси, чиято форма обикновено е правоъгълна.



$U_m \propto U_\Omega$ - амплитудата на носещия сигнал зависи от амплитудата на модулиращия сигнал

← Амплитудно – импульсна модуляция (АИМ)

← Широчинно – импульсна модуляция (ШИМ)

Честотно – импульсна модуляция (ЧИМ)

Фазово – импульсна модуляция (ФИМ)

5. Модулация

4. Цифрова модулация (манипулация):

Цифровата модулация е метод за преобразуване на цифровия сигнал във високочестотен аналогов модулиран сигнал, подходящ за предаване по комуникационен канал.

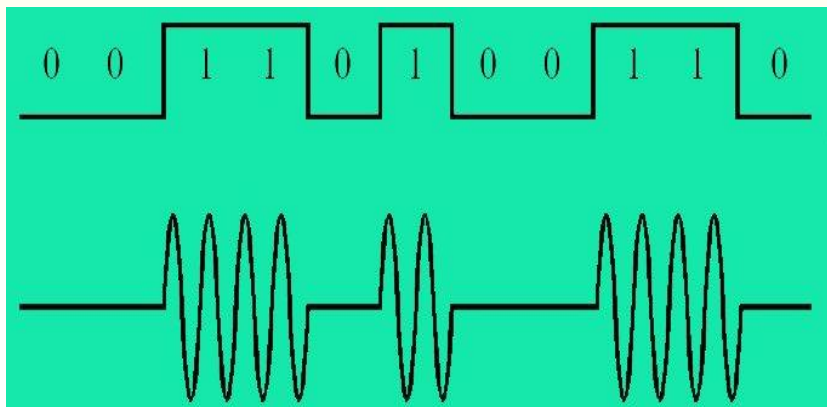
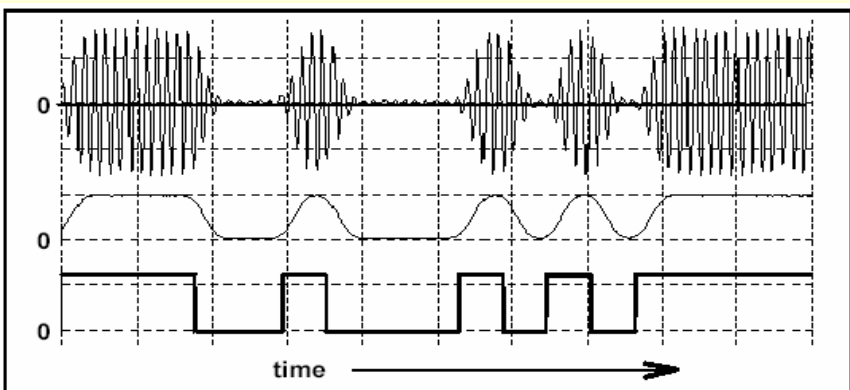
Това се осъществява чрез **стъпална промяна** на амплитудата, честотата или фазата на носещия сигнал:

- ASK (Amplitude Shift Keying)
- FSK (Frequency Shift Keying)
- PSK (Phase Shift Keying)

5. Модулация

4.A ASK (Amplitude Shift Keying)

Амплитудната-Shift Keying (ASK) е форма на модулация, която представя цифровите данни, като промяна на амплитудата на носещата вълна.

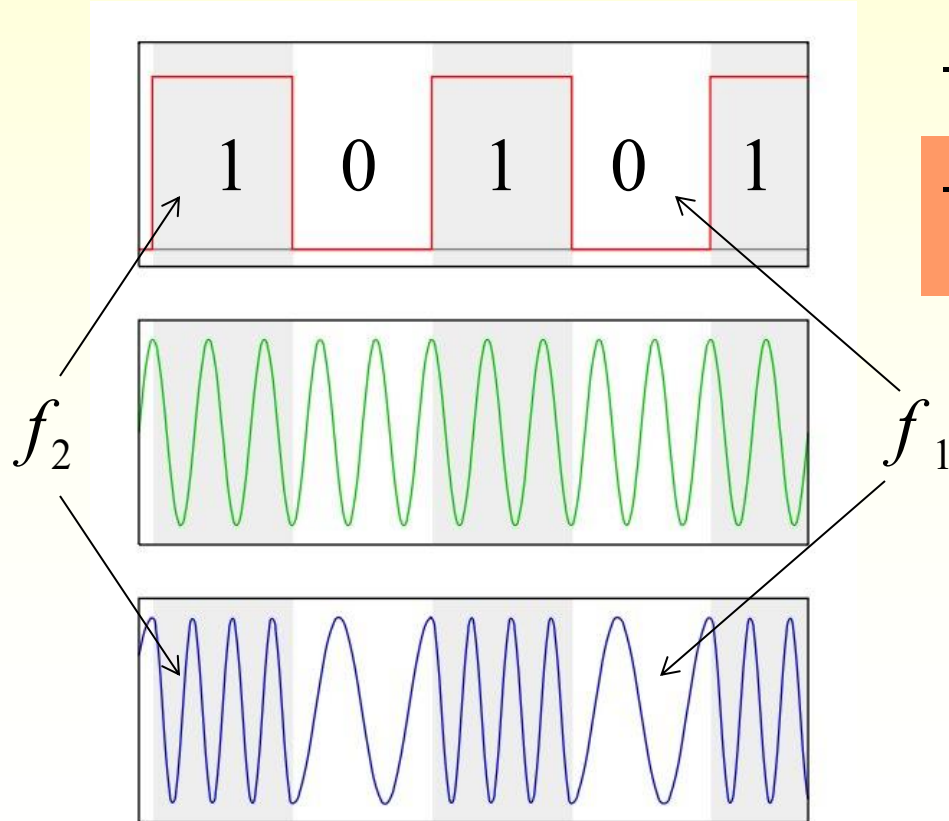


- най-слабо защитена от шум;
- проблем при предаване на дълги редици от битове “0” (при силно затихване на сигнала не може да се направи разлика м/у 0 и 1);
- почти не се използва самостоятелно, освен в оптичните комуникации.

5. Модуляция

- FSK (Frequency-Shift Keying)

Frequency-Shift Keying (FSK) е форма на модулация, която представя цифровите данни, като промени в честотата на носещата вълна.



- Широко прилагана модулация

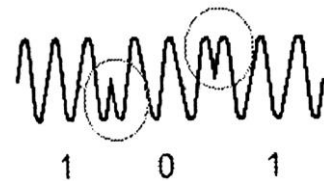
- Битовете “0” и “1” се предават с две честотни състояния на сигнала

← Носещ сигнал с постоянна амплитуда

$$f_1 < f_2$$

- Проблем е бързото превключване между двете честотни състояния.

5. Модулация



- PSK (Phase-Shift Keying)

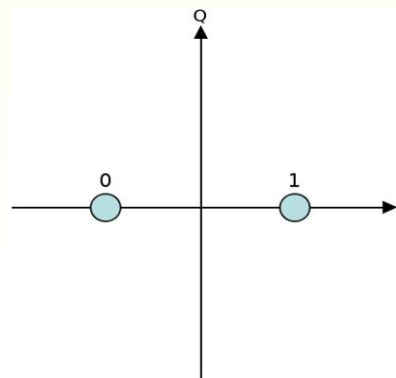
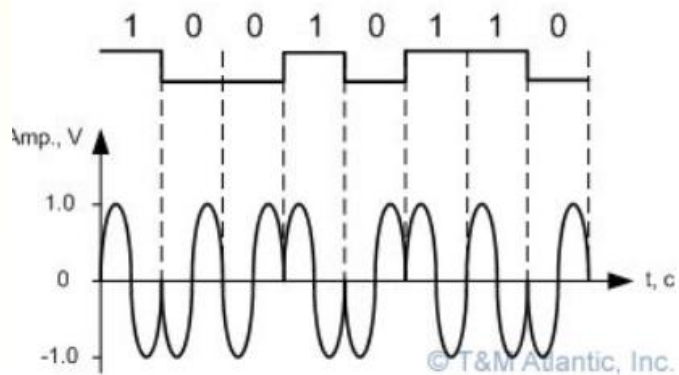
Phase-Shift Keying (PSK) е форма на модулация, която представя цифровите данни, като промени във фазата на носещата вълна.

- Амплитудата и честотата остават постоянни а фазата е 0° -градуса – 1-ца, 180° градуса – 0-ла

- Промяната на фазовото състояние е лесно за регистриране - най - често приемания сигнал се сравнява с референтен сигнал. PSK и нейните модификации са най-широко прилагани в съвременните комуникации.

битовете “0” и “1” се предават с две фазови състояния на носещия сигнал (отместени на 180°)

• BPSK (Binary Phase-Shift Keying)



5. Модуляция

Задачи за изпълнение:

от Физика, ФЛТ – Опишете OQPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying) и 1024 -QAM (Quadrature Amplitude Modulation) модуляции - принцип и приложение – 2-3 стр. с фигурите.

ИФ- OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing)-модуляция в 5G и Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) modulation в 6G стандарта, принцип и приложение – 2-3 стр. с фигурите.

до 18.03.2026 на kissov@phys.uni-sofia.bg