



MODULACJA

Definicje podstawowe, cel i przyczyny stosowania modulacji, rodzaje modulacji

dr inż. Janusz Dudczyk



Cel wykładu

- Przedstawienie podstawowych pojęć stosowanych w dziedzinie modulacji sygnałów.



Program wykładu

- Pojęcie modulacji sygnału radioelektronicznego
- Klasyfikacja rodzajów modulacji
- Cel i przyczyny stosowania modulacji
- Modulacje analogowe
- Modulacje cyfrowe
- Widmo sygnałów zmodulowanych
- Przekształcanie A/C
- Modulacja PCM
- Kodowanie transmisyjne



Wiadomości wstępne

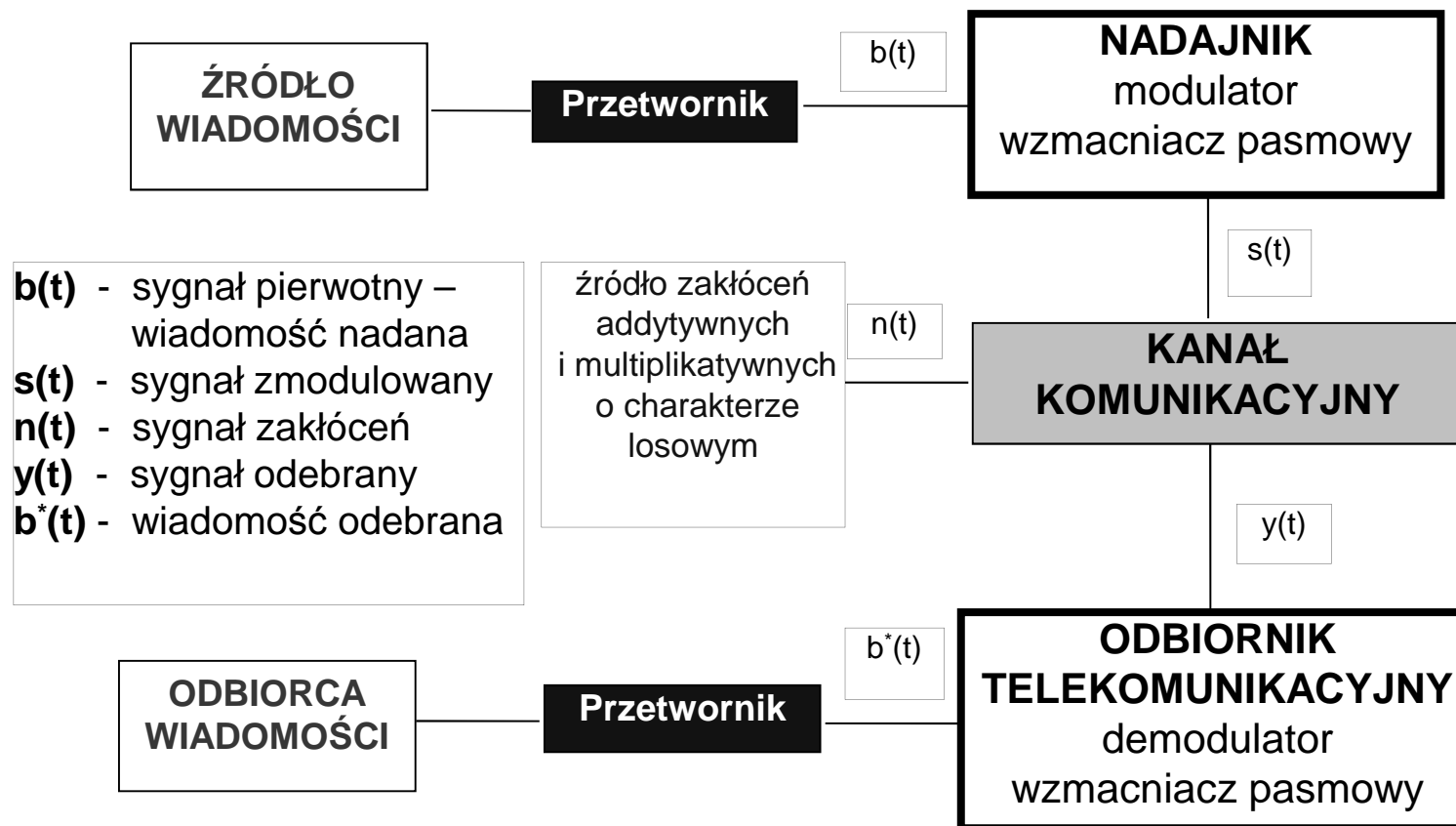
- **MODULACJA** - polega na uzależnieniu jednego lub więcej parametrów fali nośnej od pierwotnego sygnału modulującego zawierającego wiadomość. Powstający w tym procesie sygnał **to sygnał zmodulowany**. Proces ten, realizowany jest w modulatorze, /zasadniczym elemencie nadajnika telekomunikacyjnego/.



Wiadomości wstępne

- **DEMODULACJA** - proces polegający na odtworzeniu pierwotnego sygnału modulującego z sygnału odebranego, którego podstawowym składnikiem jest nadany sygnał zmodulowany.

Ogólny schemat systemu telekomunikacyjnego




Różnica między sygnałem pierwotnym $b(t)$ i sygnałem odtworzonym $b^*(t)$ nazywa się **błędem** (szumem) **modulacji**.



Cel i przyczyny stosowania modulacji

- Przekształcenie pierwotnego sygnału modulującego do postaci, która jest dogodna do przesłania w kanale telekomunikacyjnym, umożliwienie wypromieniowania energii sygnału;
 - Radiofonia, tory radiowe – wypromieniowanie fal radiowych jest możliwe powyżej 15 kHz (rozmiary anten);
 - Telewizja – pasmo sygnału naturalnego trzeba przesunąć w zakres wyższych częstotliwości.
- Umożliwienie efektywnego wypromieniowania sygnału do ośrodka rozchodzenia się fal radiowych /*przeniesienie widma sygnału do wyższego zakresu częstotliwości*/;



Cel i przyczyny stosowania modulacji

- Zmniejszenie względnej szerokości pasma częstotliwości sygnału:

$$\frac{B_0}{f_0} = \frac{(f_{\max} - f_{\min})}{\frac{1}{2}(f_{\max} + f_{\min})}$$

B_0 - bezwzględne pasmo częstotliwości sygnału

f_0 - częstotliwość środkowa sygnału,

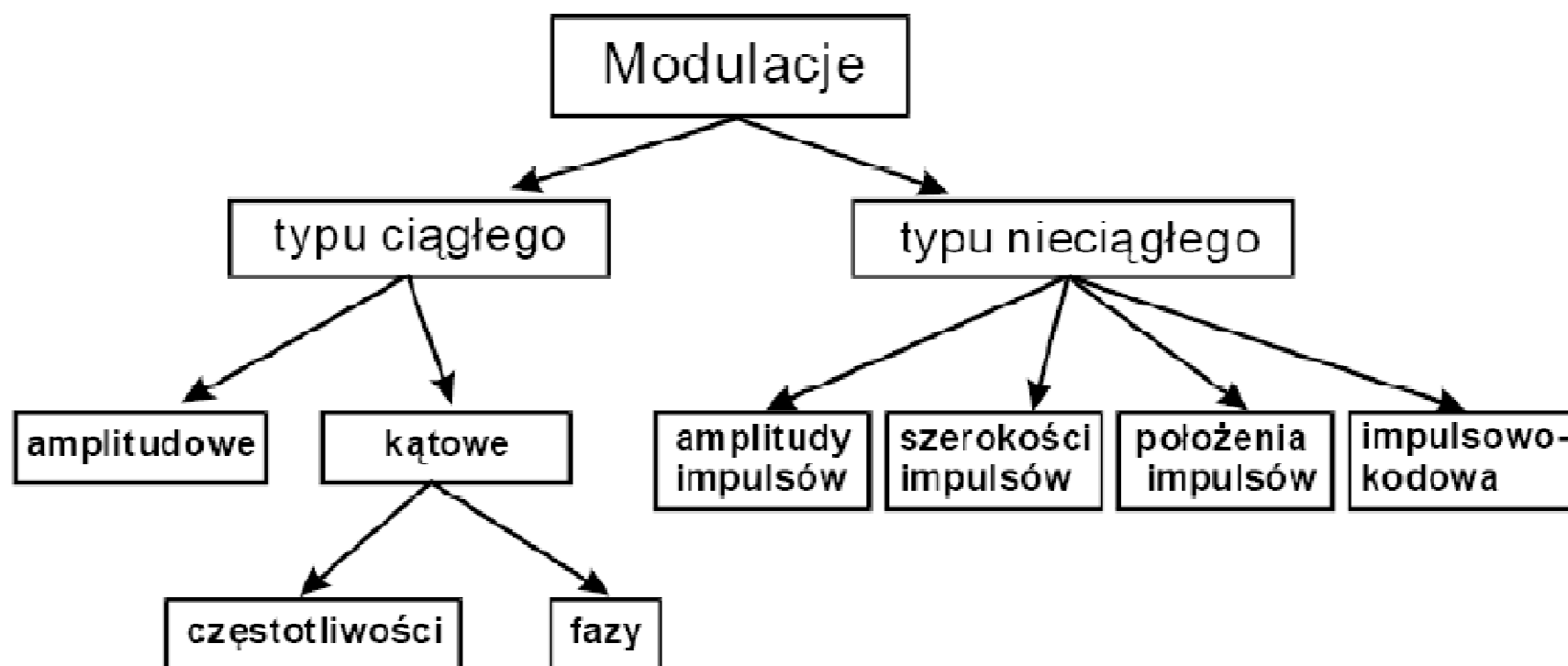
f_{\max}, f_{\min} - maksymalna i minimalna częstotliwość składowa w widmie sygnału.



Cel i przyczyny stosowania modulacji

- Stworzenie warunków do dogodniejszego przesyłania sygnałów;
 - Dobór rodzaju modulacji;
 - Zwiększenie odporności na zakłócenia;
 - Umożliwienie detekcji i korekcji błędów;
 - Przesunięcie w pasmo wolne od zakłóceń.
- Stworzenie warunków do poufnego przesyłania sygnałów;
 - Utajnianie wiadomości (kodowanie, szyfrowanie).
- Umożliwienie zwielokrotnienia kanału telekomunikacyjnego /poprzez odpowiedni rodzaj modulacji możliwe jest jednoczesne przesyłanie przez kanał wielu informacji z niezależnych źródeł/.

Rodzaje modulacji - klasyfikacja





Klasyfikacja rodzajów modulacji

- Ze względu na rodzaj modulowanego parametru fali nośnej rozróżnia się modulację:
 - amplitudy;
 - kąta fazowego /częstotliwości lub fazy/;
- Ze względu na charakter funkcji modulującej rozróżnia się modulacje:
 - *liniowe* /gdy funkcja modulująca jest liniową funkcją sygnału modulującego np. modulacja amplitudy/;
 - *nieliniowe* /gdy funkcja modulująca jest eksponentyjalną funkcją sygnału modulującego np. modulacje kątowe/;



Klasyfikacja rodzajów modulacji

- Ze względu na liczbę modulowanych parametrów:
 - jedno-parametrowe;
 - wielo-parametrowe;
- Ze względu na postać sygnału nośnego:
 - z harmoniczną falą nośną;
 - z impulsową falą nośną /modulacje impulsowe/;
- Ze względu na postać sygnału modulującego rozróżnia się:
 - typu ciągłego /analogowe/, sygnał modulujący jest ciągłą funkcją czasu,
 - typu nieciągłego, sygnał modulujący jest dyskretną funkcją czasu.



Modulacja amplitudy AM A3

- Dwuwstęgowa modulacja amplitudy z pełną falą nośną

Harmoniczna fala nośna następującej postaci: $c(t) = \cos \omega_0 t$
zostaje pomnożona przez funkcję modulującą (sygnał pierwotny)
następującej postaci:

$$m(t) = A_0 + k \cdot b(t)$$

gdzie: k - współczynnik proporcjonalności.

Rzeczywisty sygnał zmodulowany (AM) przyjmuje następującą postać:

$$s(t) = [A_0 + k \cdot b(t)] \cdot \cos \omega_0 t$$



Modulacja amplitudy AM A3

Dla liniowej modulacji **AM** pojedynczym sygnałem amplituda chwilowa przyjmie następującą postać:

$$A(t) = A_0 + k \cdot B \cos \Omega t = A_0 (1 + m \cos \Omega t)$$

gdzie: $m = \frac{kB}{A_0}$ - współczynnik głębokości modulacji.

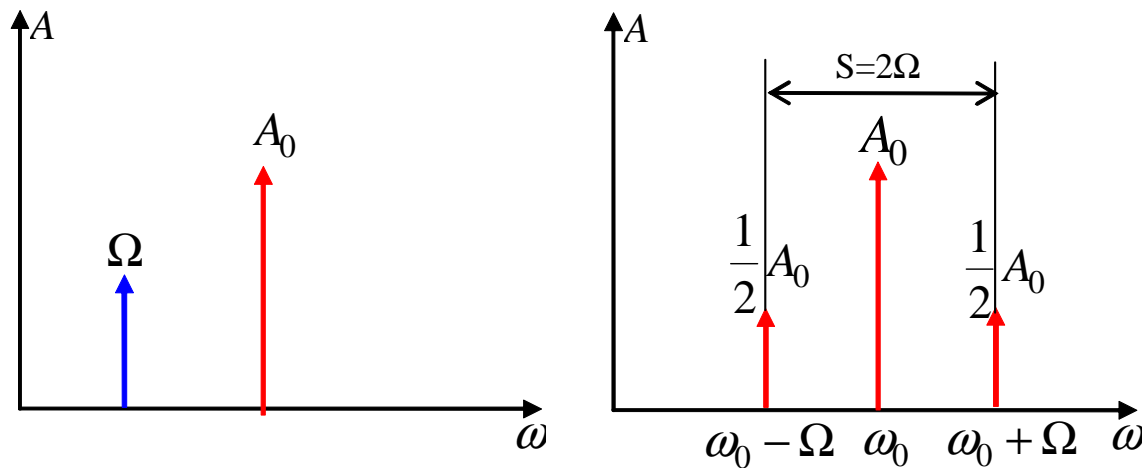
Po przekształceniach sygnał zmodulowany (**AM A3**) przyjmie następującą postać:

$$s(t)_{AM} = [A_0 + k \cdot b(t)] \cdot \cos \omega_0 t = A_0 (1 + m \cos \Omega t) \cdot \cos \omega_0 t$$

Modulacja amplitudy AM A3

- Widmo sygnału zmodulowanego amplitudowo

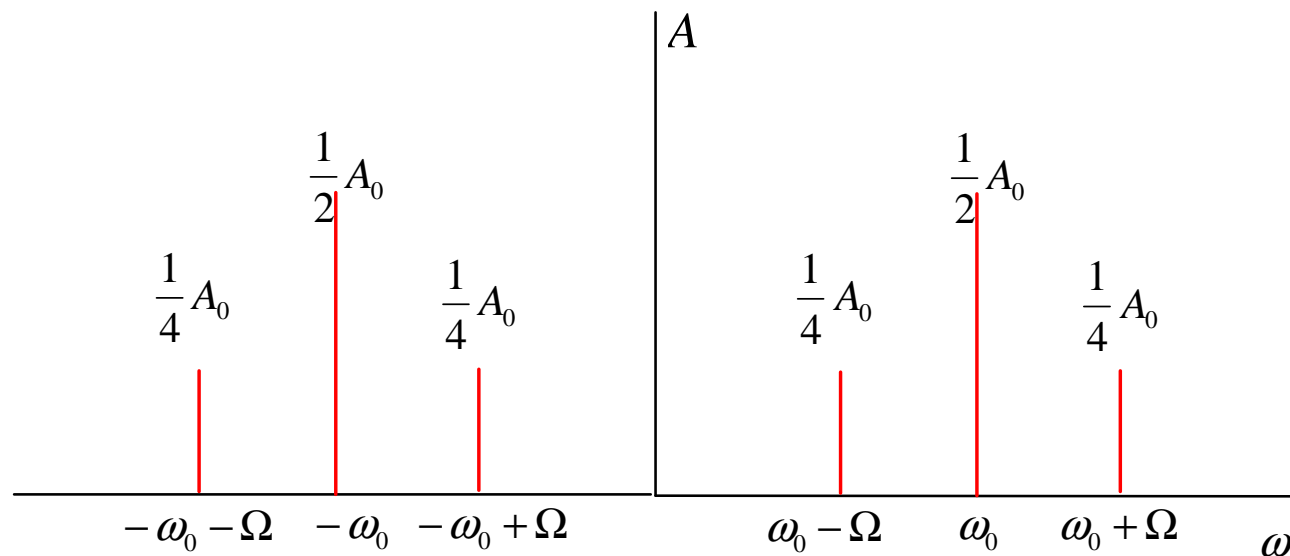
$$\begin{aligned} s(t)_{AM} &= A_0(1 + m \cos \Omega t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = \overbrace{A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)}^{\text{nosna}} + A_0 m \cos(\Omega t) \cdot \\ &\cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{1}{2} A_0 m \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0] + \\ &+ \frac{1}{2} A_0 m \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0] \end{aligned} \quad \text{zdefiniowane dla częstotliwości dodatnich.}$$



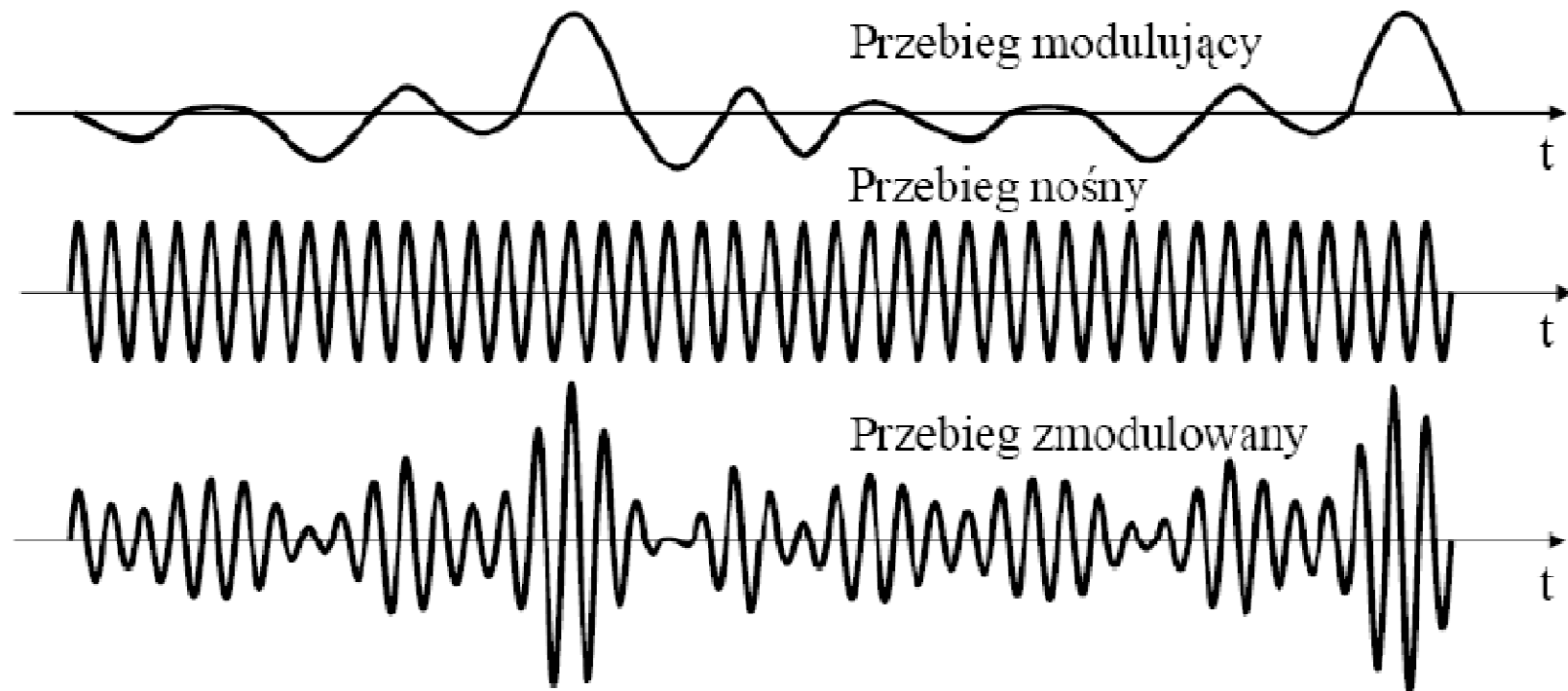
Modulacja amplitudy AM A3

- Widmo sygnału zmodulowanego amplitudowo /wzór Eulera/

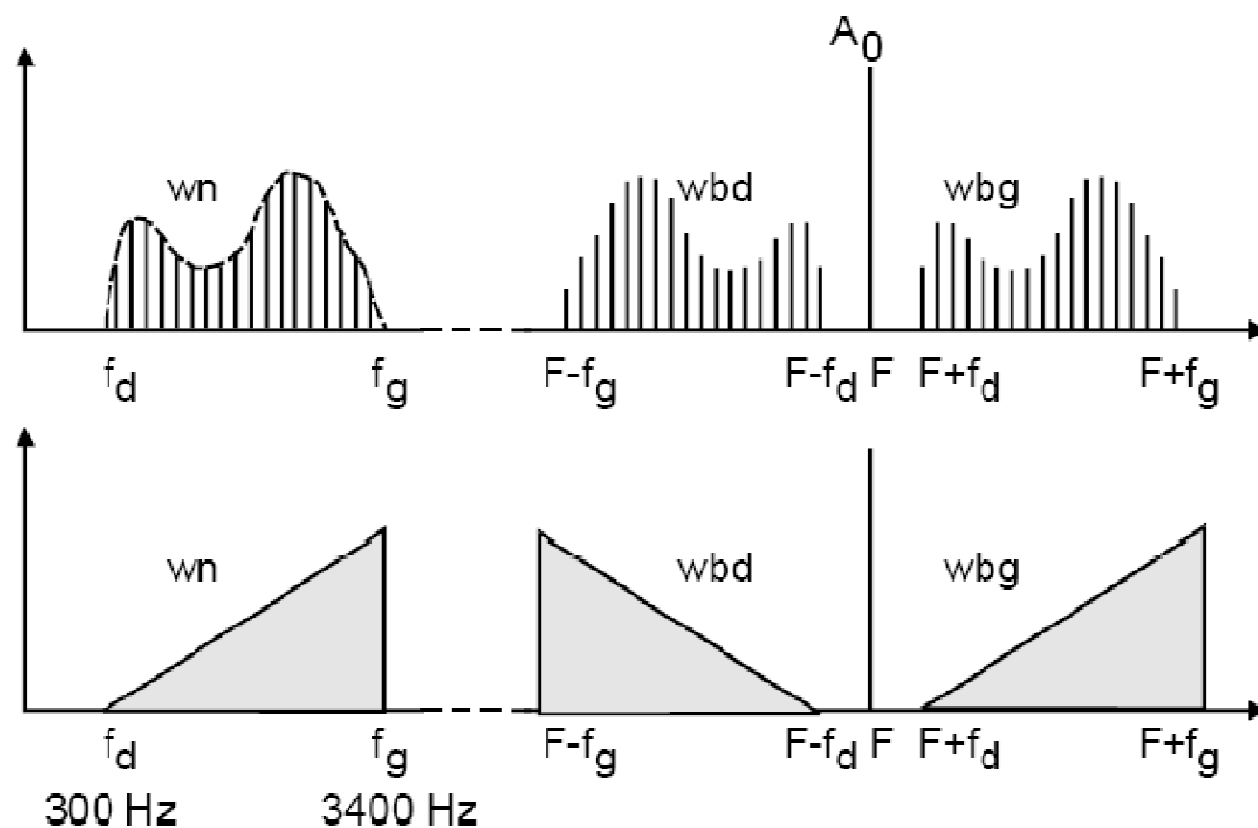
$$s(t)_{AM} = \frac{1}{2} A_0 [e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} + e^{-j(\omega_0 t + \varphi_0)}] + \frac{1}{4} A_0 m [e^{j[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0]} + e^{-j[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0]}] + \frac{1}{4} A_0 m [e^{j[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0]} + e^{-j[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0]}]$$



Modulacja amplitudy AM



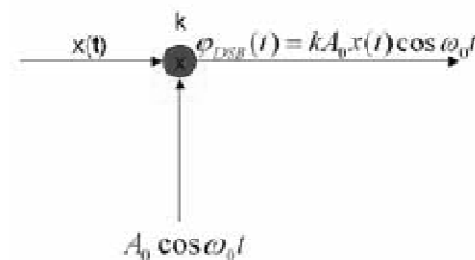
Widmo modulacji AM



Rodzaje modulacji amplitudowych

- **DSB** Double Sideband
modulacja dwuwstęgowa
- **AM** Amplitude Modulation
modulacja amplitudy
- **SSB** Single Sideband
modulacja jednowstęgowa
- **VSB** Vestigal Sideband
modulacja dwuwstęgowa z
częściowo wytłumioną
wstęgą boczną

$$\varphi_{\text{DSB}}(t) = kx(t)A_0 \cos \omega_0(t)$$



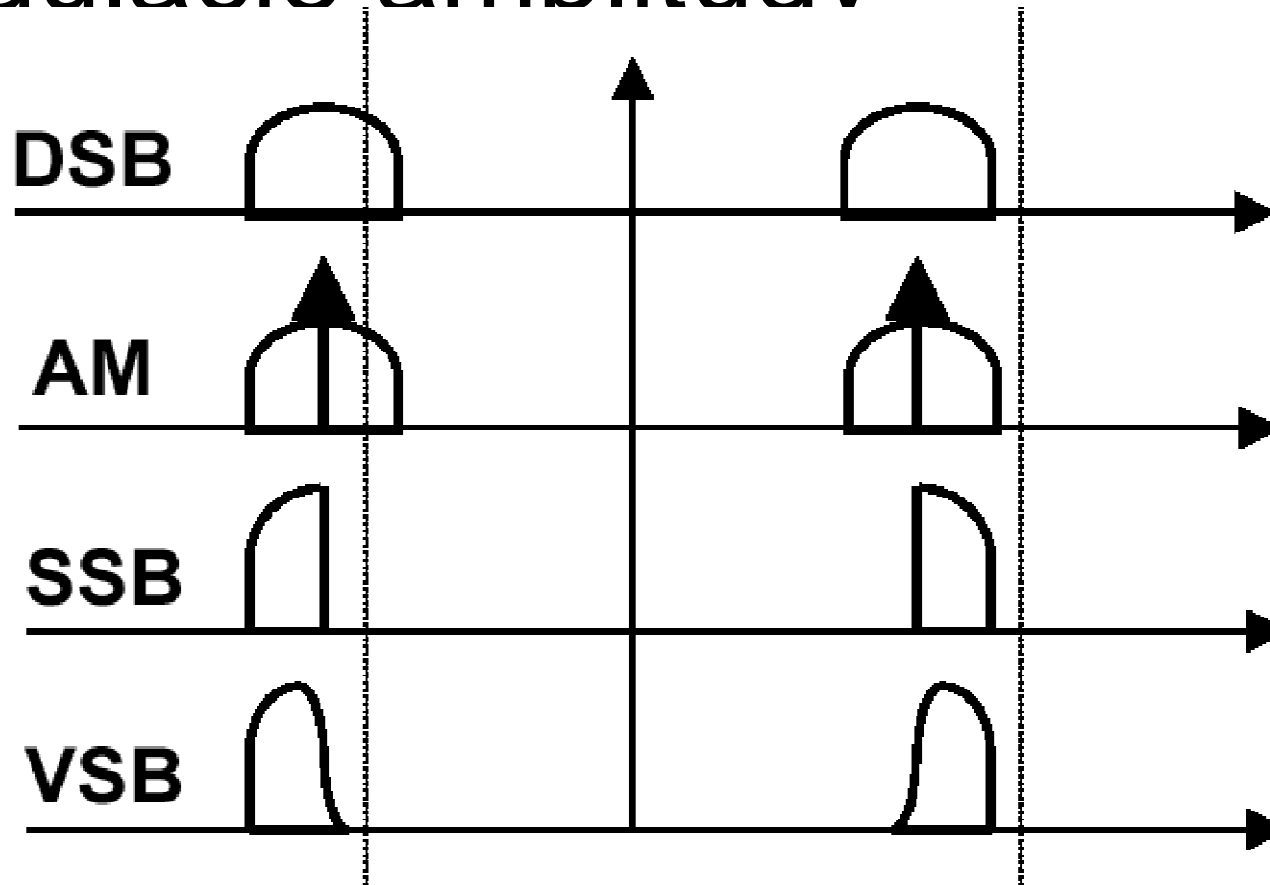
$$\varphi_{\text{AM}} = A_0 [1 + kx(t)] \cos \omega_0 t$$

$ka = m$ – współczynnik głębokości modulacji
 $0 < m < 1$

$$\varphi_{\text{SSB}}(t) = x(t) \cos \omega_0 t - \hat{x}(t) \sin \omega_0 t$$

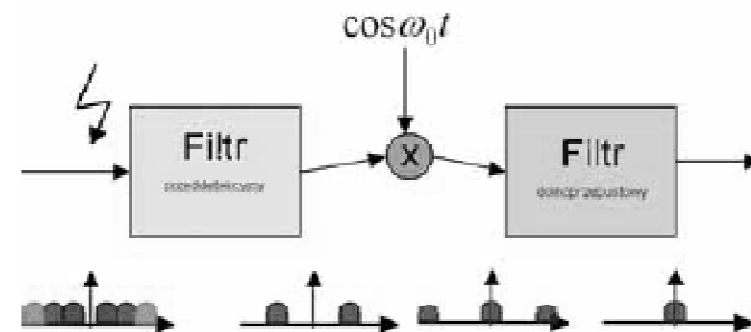
$$\varphi_{\text{VSB}}(t) = \varphi_I(t) \cos \omega_0 t - \varphi_Q(t) \sin \omega_0 t$$

Modulacie amplitudv



Detekcja sygnału zmodulowanego amplitudowo

- Detekcja obwiedni
 - AM
- Detekcja synchroniczna (koherentna)
 - DSB, SSB, VSB





Modulacje kątowe /kąta fazowego/

Harmoniczna fala nośna w postaci zespolonej, $\bar{c}(t) = A_0 \cdot e^{j\omega_0 t}$

zostaje pomnożona przez funkcję modulującą: $\bar{m}(t) = e^{j\varphi(t)}$

gdzie faza funkcji modulującej jest uzależniona od sygnału modulującego:

$$\varphi(t) = \varphi[b(t)]$$

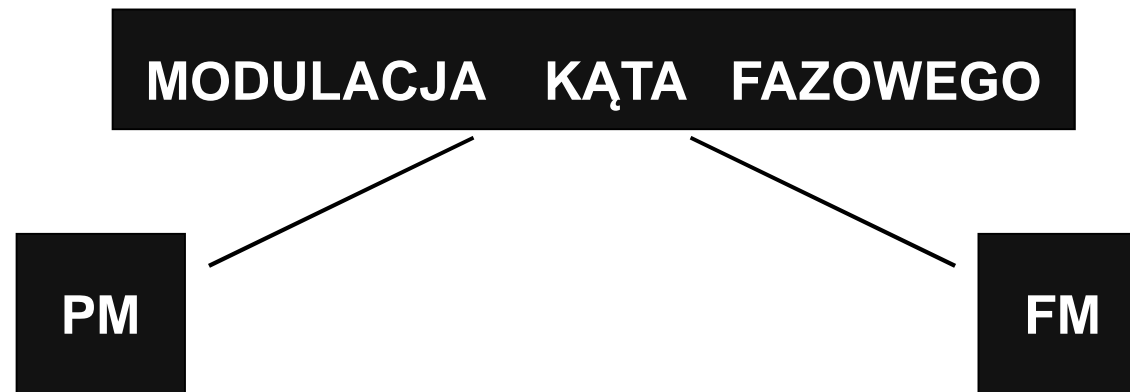
$$\bar{S}_a(t) = A_0 \cdot e^{j[\omega_0 t + \varphi(t)]} = A_0 \cdot e^{j\phi(t)}$$

$\phi(t) = \omega_0 t + \varphi(t)$ - kąt fazowy sygnału zmodulowanego.

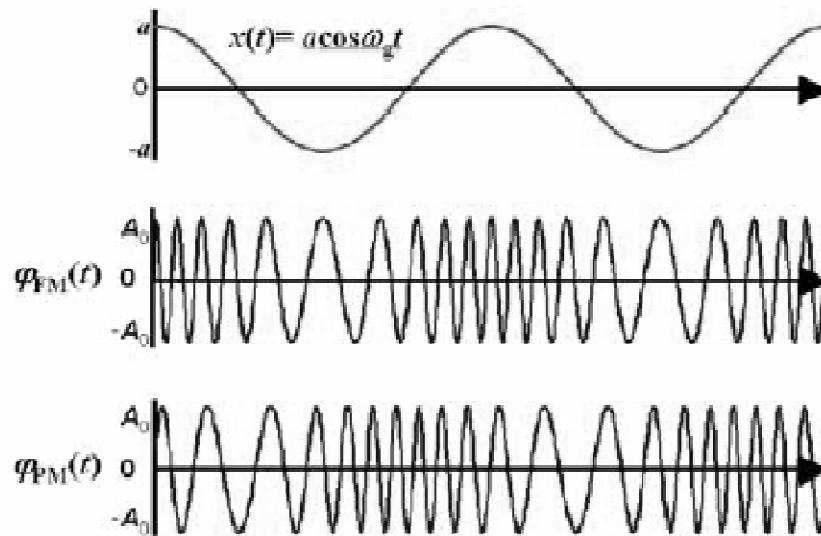
$$S(t) = \text{Re}[\bar{S}_a(t)] = A_0 \cos \phi(t) = A_0 \cos(\overbrace{\omega_0 t + \varphi[b(t)]}^{\phi(t)})$$

Modulacje kątowe /kąta fazowego/

$$S(t) = \operatorname{Re}[\bar{S}_a(t)] = A_0 \cos \phi(t) = A_0 \cos(\overbrace{\omega_0 t + \phi[b(t)]}^{\phi(t)})$$



Modulacje kątowe

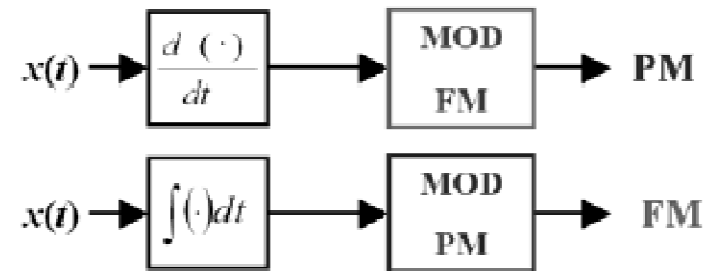


$$\varphi_{\text{PM}}(t) \stackrel{df}{=} A_0 \cos[\omega_0 t + kx(t)]$$

$$\varphi_{\text{FM}}(t) \stackrel{df}{=} A_0 \cos[\omega_0 t + k \int x(t) dt]$$

$$\varphi_{\text{FM}}(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \underbrace{\frac{ka}{\omega_g}}_{\Delta\varphi} \sin \omega_g t)$$

$$\omega(t) = \omega_0 + \underbrace{ka}_{\Delta\omega} \cos \omega_g t$$





Modulacja fazy

Sygnał modulujący powoduje bezpośrednio zmianę fazy chwilowej fali nośnej o wielkość

$$\phi[b(t)] = kb(t)$$

k - współczynnik proporcjonalności

Kąt fazowy sygnału modulowanego zmienia się proporcjonalnie do sygnału modulującego.

$$\phi_{\text{PM}}(t) = \omega_0 t + k \cdot b(t)$$

Pulsacja jest proporcjonalna do pochodnej sygnału modulującego.

$$\omega_{\text{PM}}(t) = \frac{\partial \phi_{\text{PM}}(t)}{\partial t} = \omega_0 + k \cdot \frac{\partial b(t)}{\partial t}$$

Sygnał zmodulowany przyjmuje postać:

$$S_{\text{PM}}(t) = A_0 \cos \phi(t) = A_0 \cos \left\{ \omega_0 t + k \cdot \frac{\partial b(t)}{\partial t} \right\} \quad \textbf{(PM, G3)}$$



Modulacja fazy

Sygnał modulowany jest pojedynczym sygnałem harmonicznym: $b(t) = U_{\Omega} \sin \Omega t$

$$\omega_{\text{PM}}(t) = \omega_0 + k \cdot U_{\Omega} \frac{\partial \sin \Omega t}{\partial t} = \omega_0 + m_{\text{PM}} \Omega \cos \Omega t = \omega_0 + \Delta \omega_{\text{PM}} \cos \Omega t$$

$$m_{\text{PM}} = k U_{\Omega} \text{ - wskaźnik (indeks modulacji)}$$

$$\Delta \omega_{\text{PM}} = m_{\text{PM}} \Omega = k U_{\Omega} \cdot \Omega \text{ - dewiacja częstotliwości}$$

$$S_{\text{PM}}(t) = A_0 \cos \phi(t) = A_0 \cos \{ \omega_0 t + \Delta \omega_{\text{PM}} \cos \Omega t \}$$



Modulacja częstotliwości

Sygnał modulujący powoduje bezpośrednio proporcjonalną zmianę pulsacji chwilowej fali nośnej, (proporcjonalne zmiany częstotliwości chwilowej).

$$\omega(t) = \omega_0 + k \cdot b(t)$$

Kąt fazowy można wyznaczyć z następującej zależności.

$$\phi_{\text{FM}}(t) = \int_0^t \omega(t) dt = \int_0^t (\omega_0 + k \cdot b(t)) dt = \omega_0 t + k \int_0^t b(t) dt$$

Sygnał zmodulowany częstotliwościowo przyjmuje następującą postać.

$$S_{\text{FM}}(t) = A_0 \cos \phi(t) = A_0 \cos \left\{ \omega_0 t + k \int b(t) dt \right\} \quad (\text{FM, F3})$$



Modulacja częstotliwości

Sygnał modulowany jest pojedynczym sygnałem harmonicznym: $b(t) = U_{\Omega} \cos \Omega t$

$$\omega(t) = \omega_0 + k U_{\Omega} \cos \Omega t = \omega_0 + \Delta \omega_{\text{FM}} \cos \Omega t$$

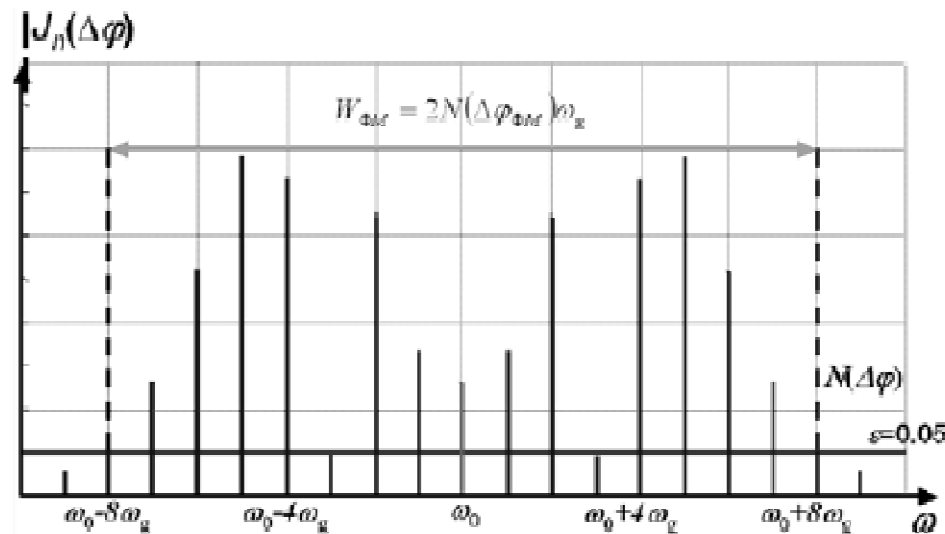
$$\phi_{\text{FM}}(t) = \omega_0 t + k \int_0^t U_{\Omega} \cos \Omega t dt = \omega_0 t + \frac{k U_{\Omega}}{\Omega} \sin \Omega t$$

$$\Delta \omega_{\text{FM}} = k U_{\Omega} \quad - \text{dewiacja częstotliwości}$$

$$m_{\text{FM}} = \frac{k U_{\Omega}}{\Omega} = \frac{\Delta \omega_{\text{FM}}}{\Omega} \quad - \text{indeks (wskaźnik) modulacji}$$

$$S_{\text{FM}}(t) = A_0 \cos \phi(t) = A_0 \cos \left\{ \omega_0 t + \frac{k U_{\Omega}}{\Omega} \sin \Omega t \right\} = A_0 \cos \{ \omega_0 t + m_{\text{FM}} \sin \Omega t \}$$

Widmo modulacji częstotliwości



$$W_{\text{FM}} = \overbrace{2\Delta\omega}^{\text{WBFM}} + \overbrace{2\omega_g}^{\text{NBFM}} = 2(\Delta\varphi + 1)\omega_g =$$

$$= \begin{cases} 2\Delta\omega, \Delta\varphi \gg 1 & (\text{WBFM}) \\ 2\omega_g, \Delta\varphi \ll 1 & (\text{NBFM}) \end{cases}$$

$$\Delta\omega \gg \omega_g$$

$$\Delta\varphi = \Delta\omega / \omega_g \gg 1$$

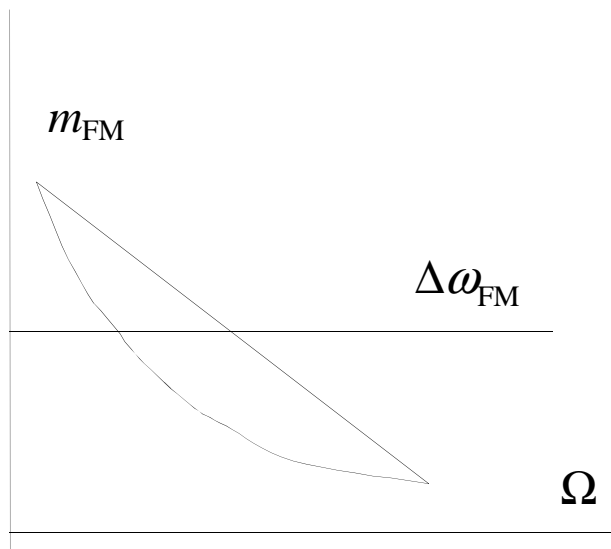
$$W_{\text{NBPM}} = W_{\text{NBFM}} = 2\omega_g$$

$$\Delta\omega \gg \omega_g$$

$$\Delta\varphi = \Delta\omega / \omega_g \gg 1$$

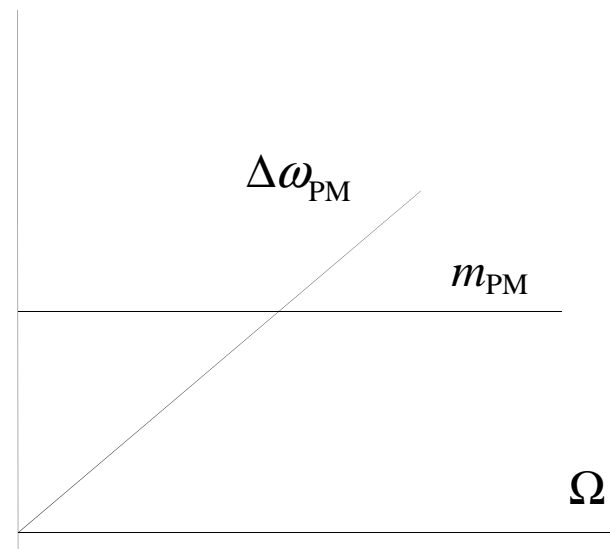
$$W_{\text{WBFM}} = 2\Delta\omega$$

Wskaźniki modulacji kątowych



$$m_{\text{PM}} = kU_{\Omega}$$

$$\Delta\omega_{\text{PM}} = m_{\text{PM}}\Omega = kU_{\Omega} \cdot \Omega$$



$$\Delta\omega_{\text{FM}} = kU_{\Omega}$$

$$m_{\text{FM}} = \frac{kU_{\Omega}}{\Omega} = \frac{\Delta\omega_{\text{FM}}}{\Omega}$$



Modulacje cyfrowe

Modulacja cyfrowa – proces zamiany ciągu binarnego na analogowy sygnał elektryczny dogodny do wysłania w kanał transmisyjny, np. radiowy. W odbiorniku realizowana jest operacja odwrotna – demodulacja na postać binarną.



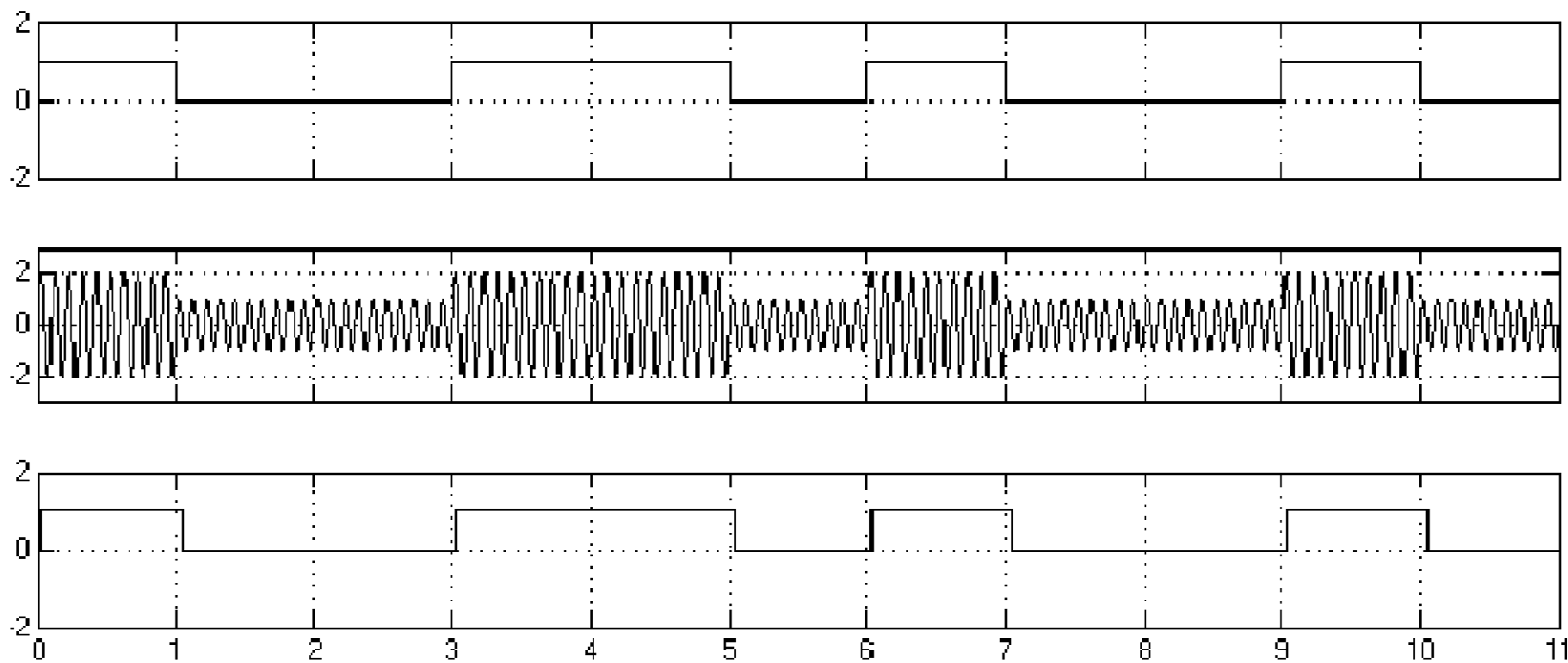
Modulacje cyfrowe- kluczowanie

Podstawowe rodzaje modulacji cyfrowej

- Kluczowanie amplitudy ASK - polega na zmianie amplitudy harmonicznego sygnału nośnego w zależności od stanu wejściowej informacji cyfrowej.
- Kluczowanie z przesuwem częstotliwości FSK - przy stałej amplitudzie harmonicznego sygnału nośnego następuje zmiana częstotliwości: niższej dla symbolu "zera logicznego" i wyższej dla "jedynek logicznej" informacji binarnej
 - MFSK, GFSK, MSK, GMSK
- Kluczowanie fazy PSK - przy stałej amplitudzie i częstotliwości harmonicznego sygnału nośnej stany charakterystyczne uzyskuje się przez przesunięcie fazy w zależności od stanu informacji pierwotnej.
 - BPSK, DPSK, QPSK, n-PSK, O-QPSK, $n/4$ -QPSK, $\sqrt{2}$ -PSK
- QAM – kombinacja kluczowania amplitudy i fazy. Dane formowane są w dwójki, trójki, czwórki itd., które odpowiadają zarówno amplitudzie jak i fazie. Tworzone są według diagramu konstelacji.

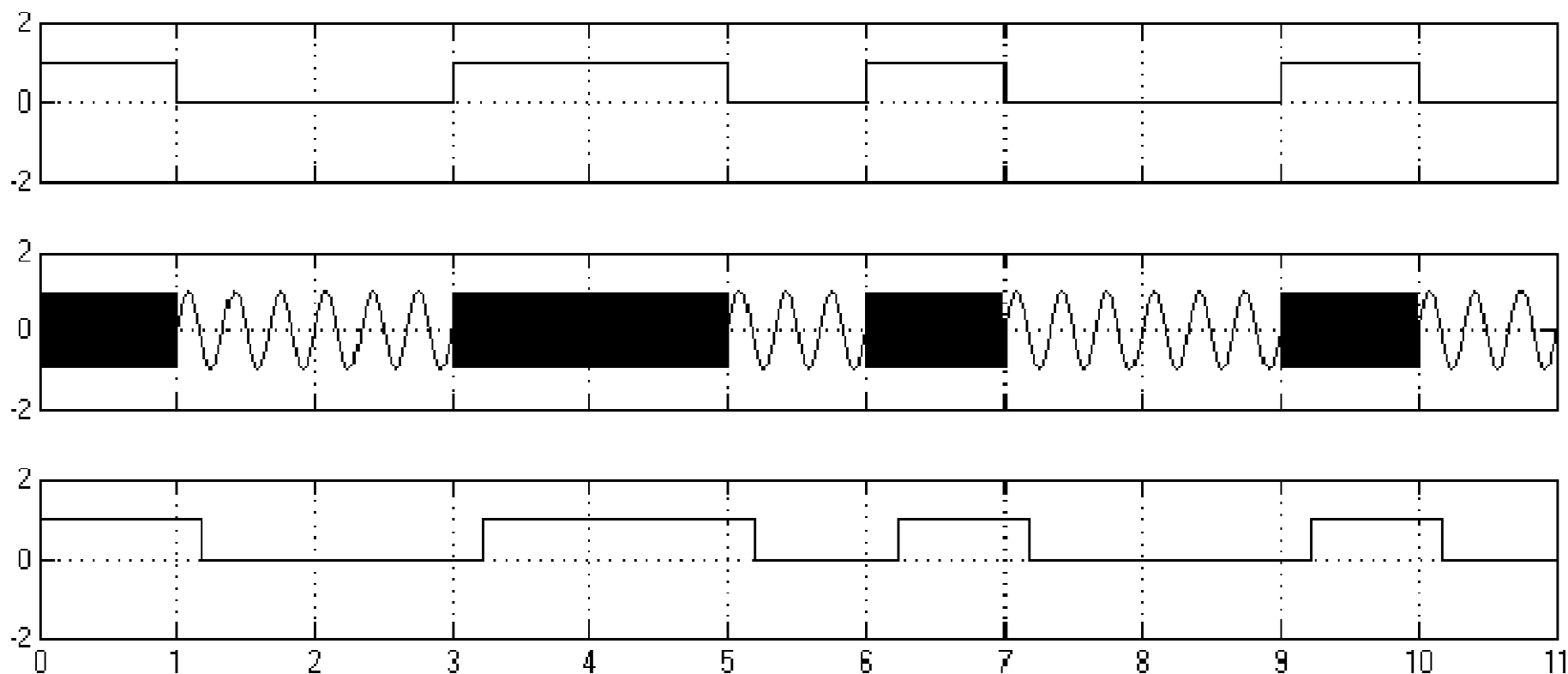


Modulacja ASK



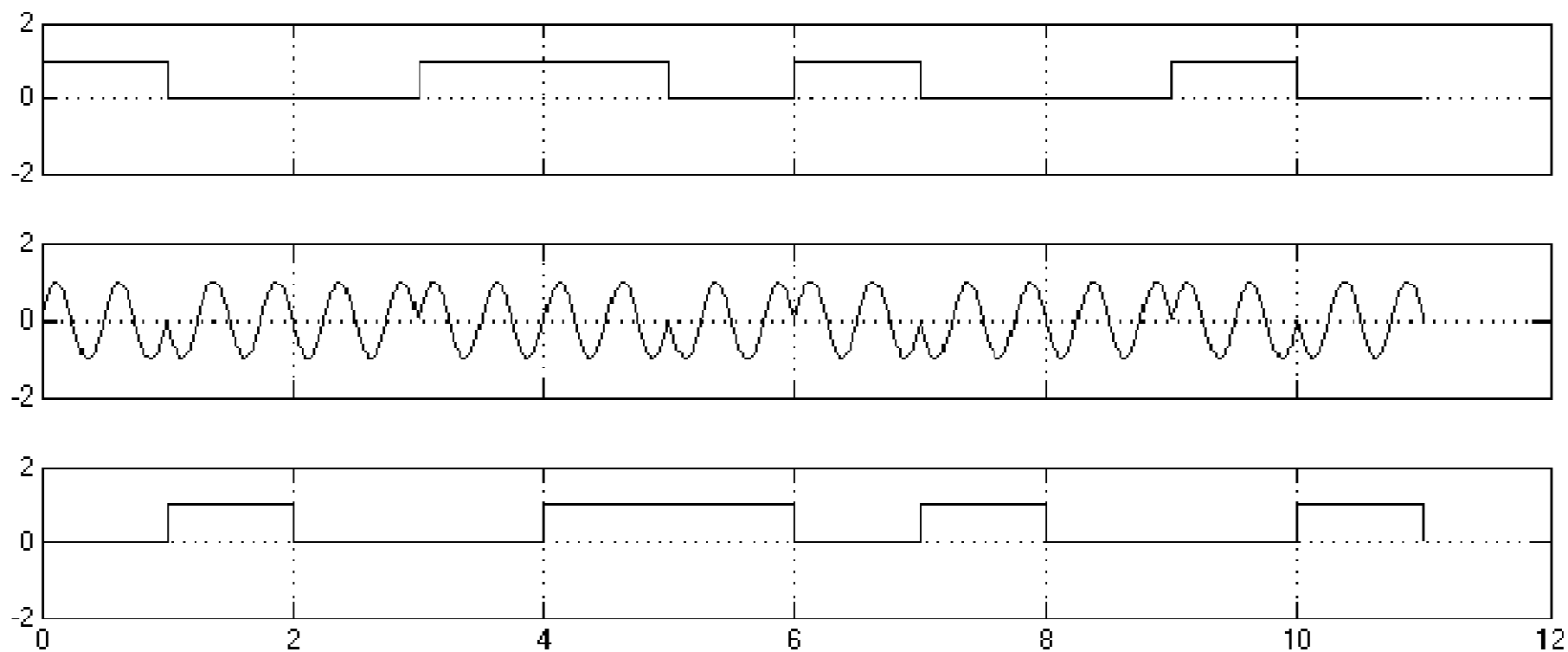


Modulacja FSK



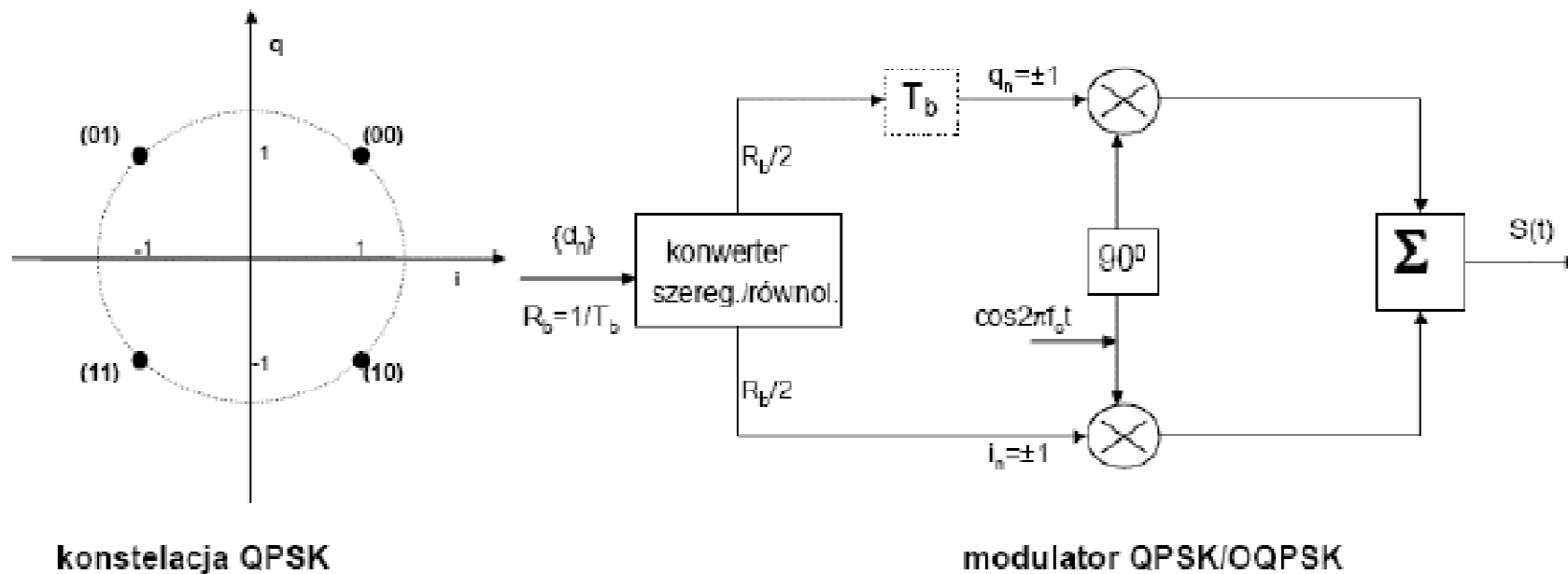


Modulacja PSK



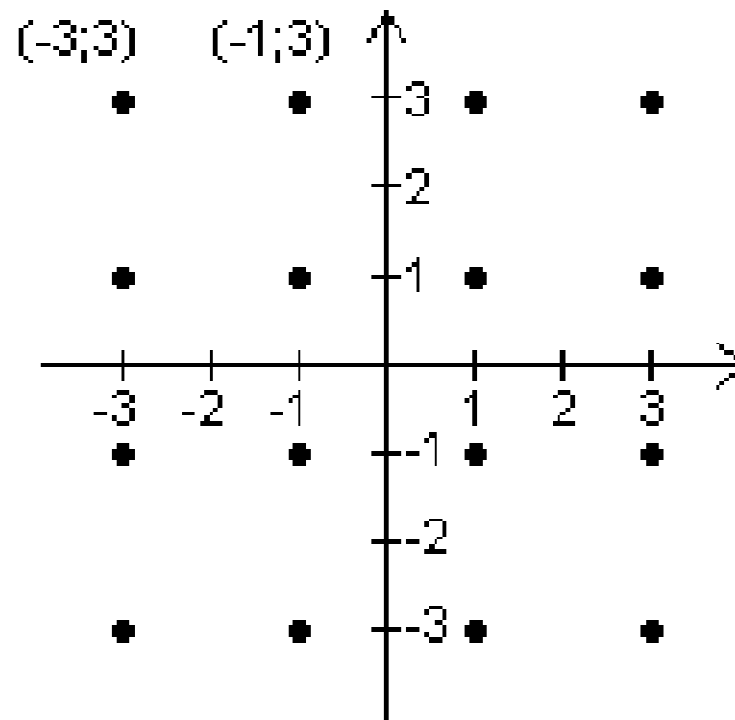
Modulacja QPSK

QPSK (ang. Quadriphase Phase Shift Keying) ($M=4$)



Modulacja QAM

Modulacja QAM (ang. Quadrature Amplitude Modulation)





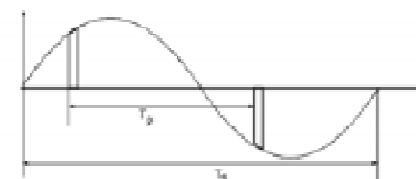
Modulacja impulsowa

Rodzaje modulacji impulsowej:

- PCM – kodowa (ang. *pulse-code modulation*),
- PWM – szerokość impulsu (ang. *pulse-width modulation*),
- PAM – amplituda impulsu (ang. *pulse-amplitude modulation*),
- PPM – pozycja impulsu (ang. *pulse-position modulation*),
- PDM – gęstość impulsów (ang. *pulse-density modulation*).

Etapy przetwarzania A/C

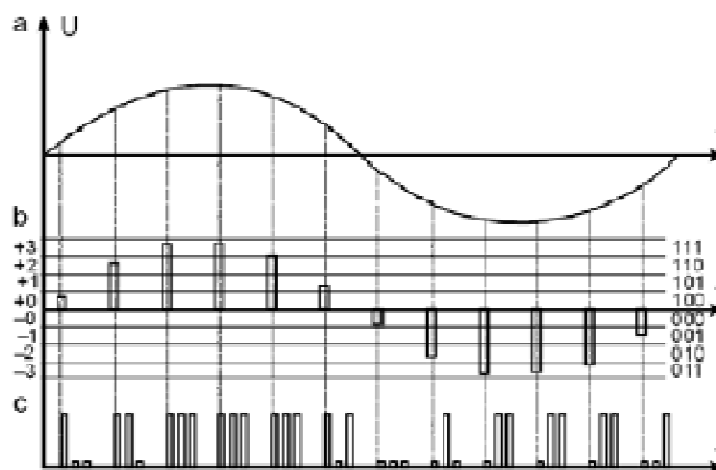
- próbkowanie – pobieranie próbek sygnału w określonych chwilach czasowych
- kwantowanie - zakwalifikowanie wartości amplitudy próbki z ciągłego przedziału wartości do jednego ze skończonej liczby przedziałów, np. 128
- kodowanie - wzajemnie jednoznaczne odwzorowanie, które każdej wiadomości z alfabetu źródła, przyporządkowuje ciąg określonych symboli kodowych.



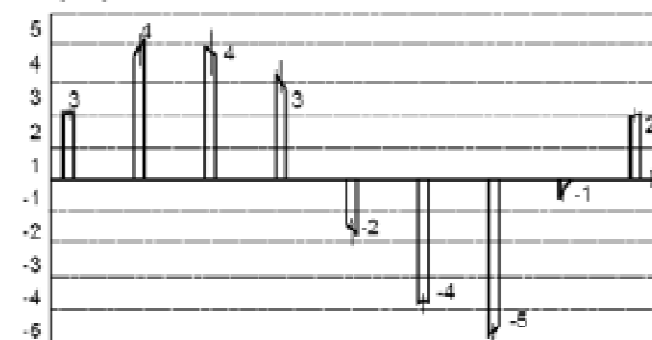
Twierdzenie o próbkowaniu (Shannona):

$$T_p \leq 0,5 T_s \quad \text{lub} \quad f_p \geq 2 f_g$$

$$f_p = 8 \text{ kHz}$$



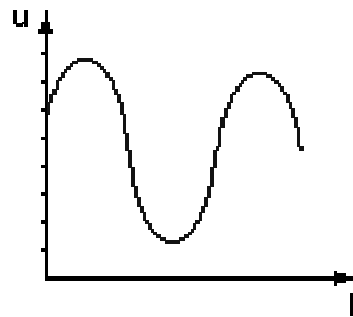
Poziom
kwantyzacji



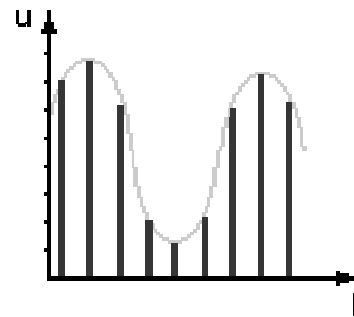
Modulacja PCM

Modulację impulsowo-kodową PCM (ang. *Pulse-Code Modulation*) stworzono z myślą o konwersji analogowych sygnałów ciągłych na postać cyfrową. PCM jest powszechnie stosowana w telekomunikacji, a także z pewnymi zmianami, w fonografii.

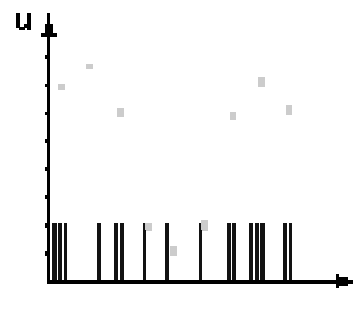
1. sygnał analogowy



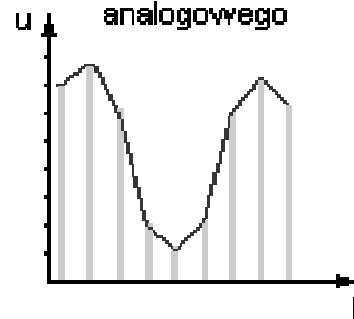
2. próbkowanie



3. sygnał binarny



4. odtwarzanie sygnału analogowego



Proces kodowania przebiega następująco:

1. przebieg analogowy poddaje się próbkowaniu. Przyjmuje się częstotliwość próbkowania co najmniej trzykrotnie większą od maksymalnej częstotliwości sygnału.
2. Wartości kolejnych próbek zamienia się na postać dwójkową przy pomocy konwertera A/C.
3. Przy odtwarzaniu konwerter C/A odtwarza sygnał w postaci skwantowanej. Do wygładzenia obwiedni służy filtr całkujący.

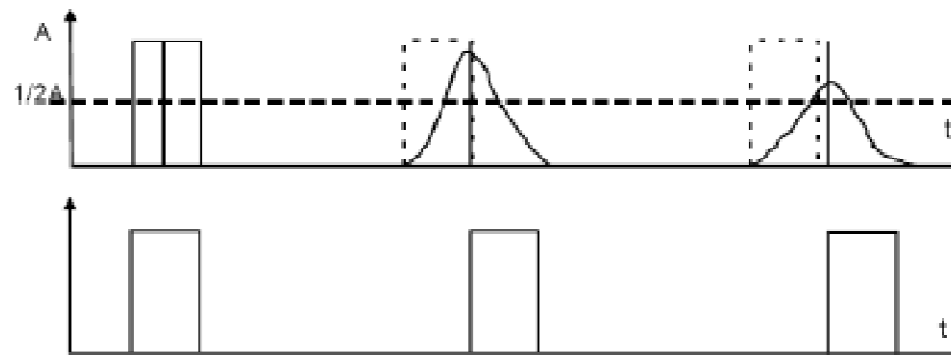


Sygnały PCM

1. Sygnał binarny PCM podlega zniekształceniom w znacznie mniejszym stopniu niż analogowy. Łatwiej zminimalizować skutki zakłóceń (przeplot próbek, czyli cykliczna zamiana ich kolejności według wzorca, co zabezpiecza przed utratą kilku próbek pod rząd).
2. Przy dużej częstotliwości próbkowania stosunkowo proste jest zapobieganie zbyt gwałtownym zmianom sygnału przy odtwarzaniu. Jeżeli sąsiednie próbki mają „zbyt różną wartość”, można pominąć.
3. Kodowanie DPCM (ang. *Differential PCM*) wykorzystuje fakt że z reguły kilka kolejnych próbek sygnału mowy niewiele się od siebie różni. Zatem mając pewną ilość próbek można ze znacznym prawdopodobieństwem przewidzieć następne (predykcja).
4. W nowoczesnych sieciach łączności stosuje się ulepszoną postać DPCM - ADPCM (ang. *Adaptive Differential PCM*) jako standard G.721 (lub nowszy G.726).
5. W przypadku przesyłu danych cyfrowych (np.. z modemem) sygnał należy zidentyfikować i wyłączyć kompresję. Ponadto trzeba transmisję zsynchronizować z częstotliwością próbkowania.

Systemy wielokrotne PCM

- Transmisja cyfrowa umożliwia zastąpienie wzmacniania przez regenerację (złagodzenie warunków na dopuszczalne zakłócenia)
- Transmisja cyfrowa umożliwia wielokrotne wykorzystanie torów transmisyjnych przez tworzenie kanałów czasowych – krotnice czasowe są znacznie prostsze od częstotliwościowych
- Prosta zamiana sygnału analogowego na cyfrowy
- Trakty przystosowane do transmisji sygnałów kodowanych cyfrowo (telefonii) mogą być bezpośrednio wykorzystywane do transmisji sygnałów z natury cyfrowych (transmisja danych)

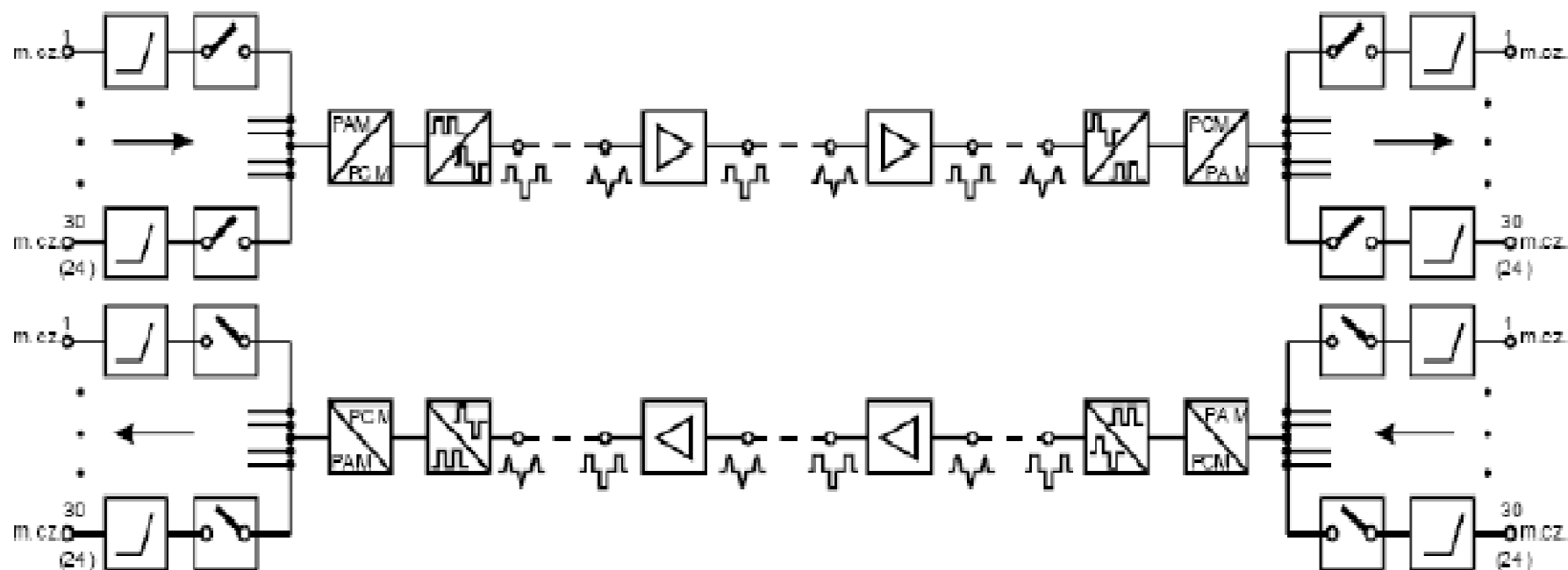




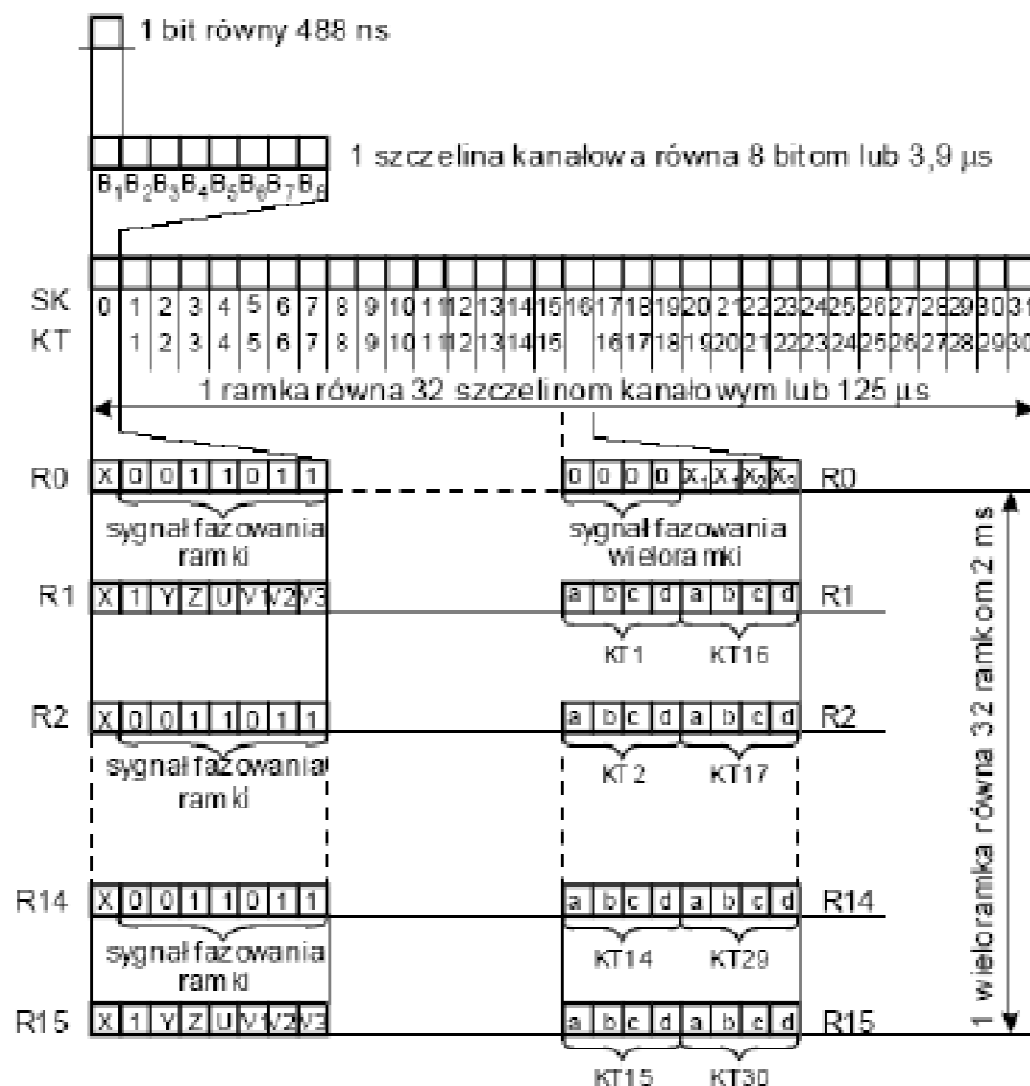
Systemy wielokrotne PCM


- Zasada tworzenia kanałów czasowych jest wykorzystywana w elektronicznych centralach komutacyjnych; umożliwia to unifikację techniki teletransmisyjnej i komutacyjnej
- Urządzenia cyfrowe są łatwiejsze w projektowaniu, realizacji i utrzymaniu; są tańsze
- Cyfryzacja analogowej techniki transmisyjnej przy równoczesnym rozwoju teletransmisji sygnałów cyfrowych i elektronizacji central prowadzi do integracji sieci telekomunikacyjnej w zakresie techniki (IDN) i w zakresie usług (ISDN)

System PCM



Struktura ramki systemu PCM-30/32

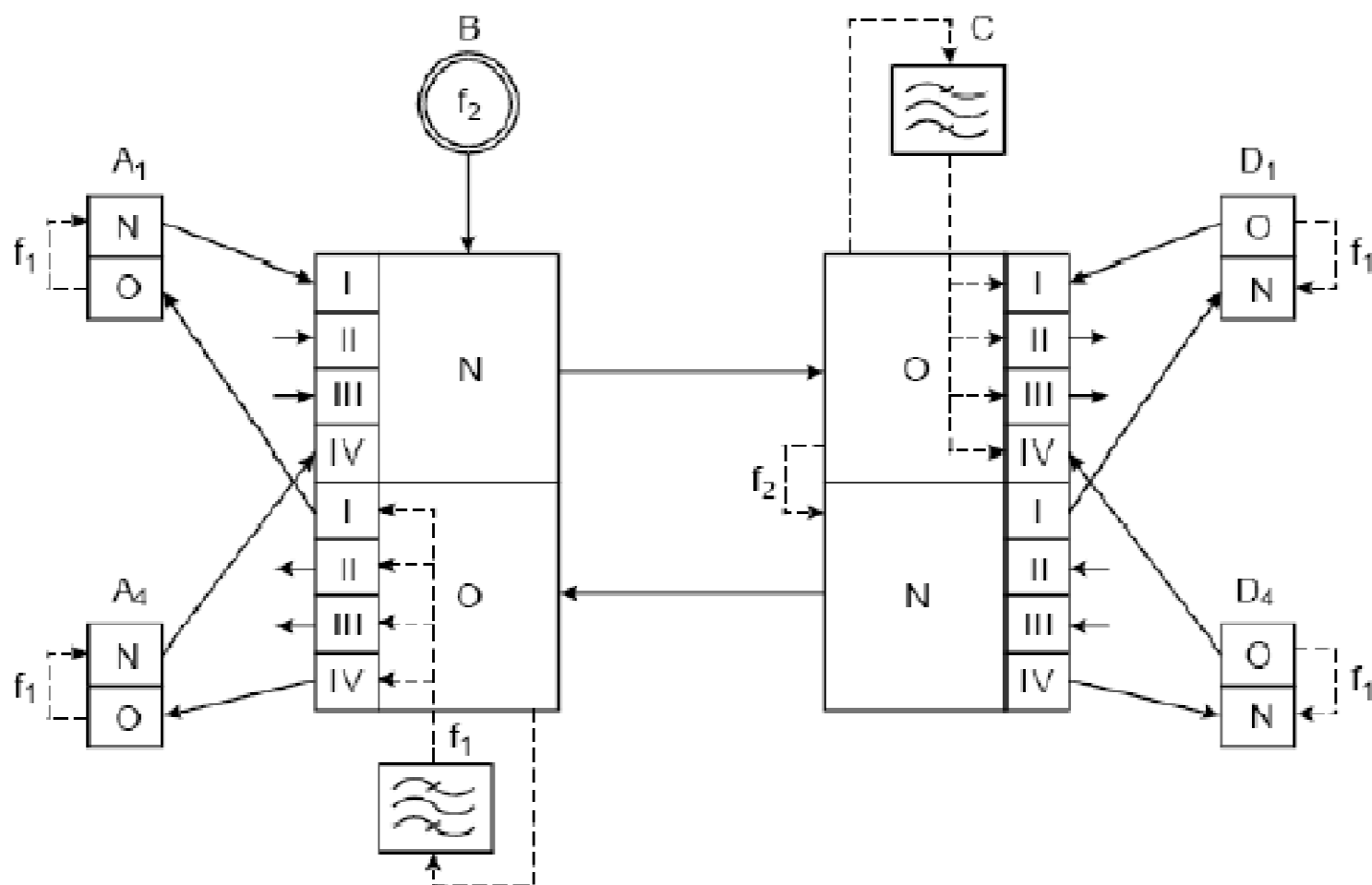




Właściwości systemu PCM-24 i PCM-30/32

Parametr	PCM-24	PCM-30
Przepływność binarna	1544 kbit/s	2048 kbit/s
Długość ramki	125 μ s (8x24+1=193 bity)	125 μ s
Liczba szczelin kanałowych	24	32
Liczba bitów w szczelinie kanałowej	7 + 1	8
Liczba kanałów rozmównych	24	30
Długość szczeliny kanałowej	5,21 μ s	3,9 μ s
Zakres częstotliwości kanału rozmównego	300 – 3400 Hz	300 – 3400 Hz

Zwielokrotnienie synchroniczne





Kodowanie sygnałów w sieci

Kod transmisyjny powinien być tak projektowany aby:

- nie zawierał składowej stałej,
- zajmował jak najwęższe pasmo,
- umożliwiał łatwe odtworzenie sygnałów zegarowych w odbiorniku,
- był odporny na zakłócenia,
- w miarę możliwości posiadał zdolności do wykrywania i korekcji błędów.



Dziękuję za uwagę