

Wyższa Szkoła Informatyki Stosowanej
i Zarządzania

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

dr inż. Janusz DUDCZYK

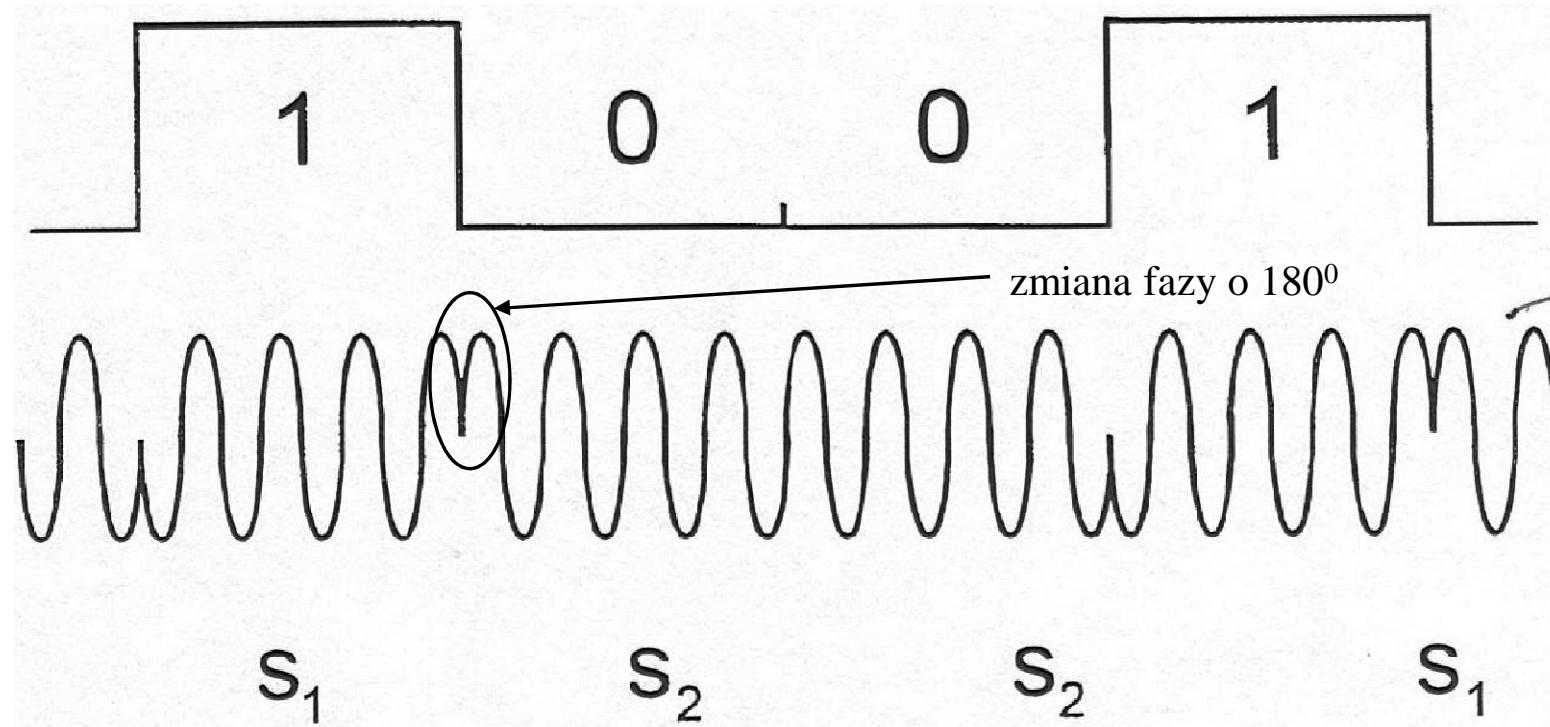
ZAGADNIENIA

- Modulacja z dwustanowym przesuwem fazy - BPSK;
 - Koherentne kluczowanie czterofazowe QPSK, przestrzeń sygnałowa;
 - Różnicowy system PSK-DPSK, generacja sygnału DPSK;
 - Modulacja $\pi/4$ QPSK;
 - Modulacja MPSK, konstelacja 16PSK;
 - Pasmo przenoszenia MPSK, bitowa stopa błędu.
-

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Modulacja z dwustanowym przesuwem fazy - **BPSK**

Modulacja z dwustanowym przesuwem fazy polega na skokowej zmianie fazy fali nośnej.



Przebieg czasowy sygnału z dwustanowym przesuwem fazy.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Modulacja z dwustanowym przesuwem fazy - **BPSK**

Para sygnałów $s_1(t)$ i $s_2(t)$ reprezentująca symbole binarne „1” i „0” modulacji z dwustanowym przesuwem fazy BPSK jest zdefiniowana następująco:

$$s_1(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t)$$

$$s_2(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \pi) = -\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) \quad \text{gdzie } 0 \leq t \leq T_b$$

E_b – energia transmitowanego sygnału przypadająca na jeden bit.

$$0 \leq t \leq T_b$$

T_b – czas trwania jednego bitu.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Modulacja z dwustanowym przesuwem fazy - **BPSK**

Dla zapewnienia, aby każdy przesyłany bit zawierał całkowitą liczbę okresów fali nośnej, częstotliwość fali nośnej przyjmuje wartość:

n_c – ustalona liczba całkowita.

$$f_c = \frac{n_c}{T_b}$$

Wprowadzając pojęcie funkcji bazowej uzyskano następujący zapis:

$$\begin{aligned} s_1(t) &= \sqrt{E_b} \phi_1(t) & 0 \leq t \leq T_b \\ s_2(t) &= -\sqrt{E_b} \phi_1(t) & 0 \leq t \leq T_b \end{aligned}$$

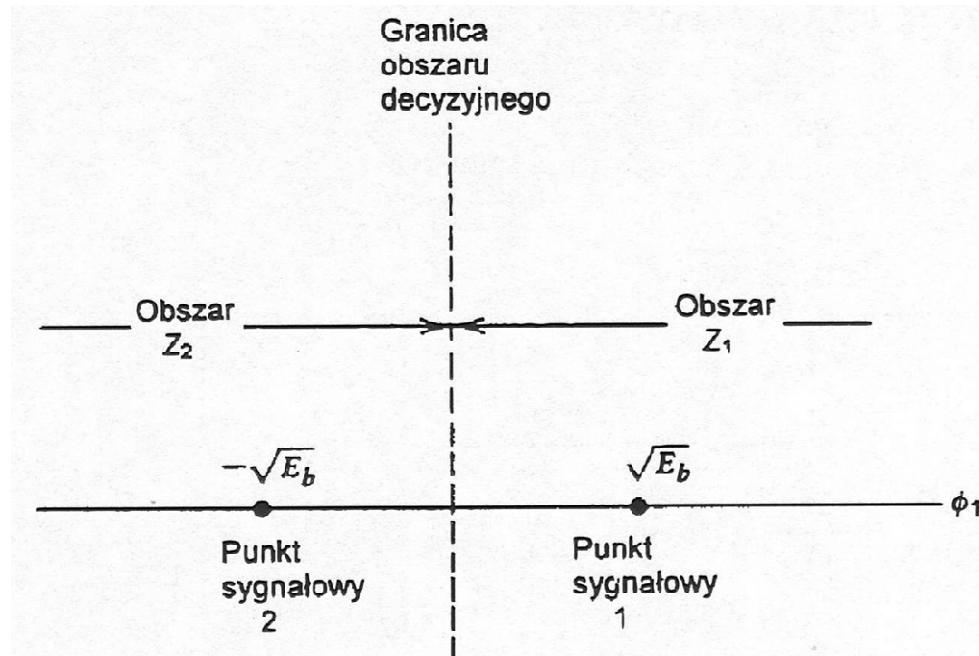
$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T_b$$

$\phi_1(t)$ – funkcja bazowa o energii jednostkowej.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Modulacja z dwustanowym przesuwem fazy - **BPSK**

Koherentny sygnał binarny PSK charakteryzuje się jednowymiarową przestrzenią o konstelacji składającej się z dwóch punktów sygnałowych, tzn. $M = 2$.



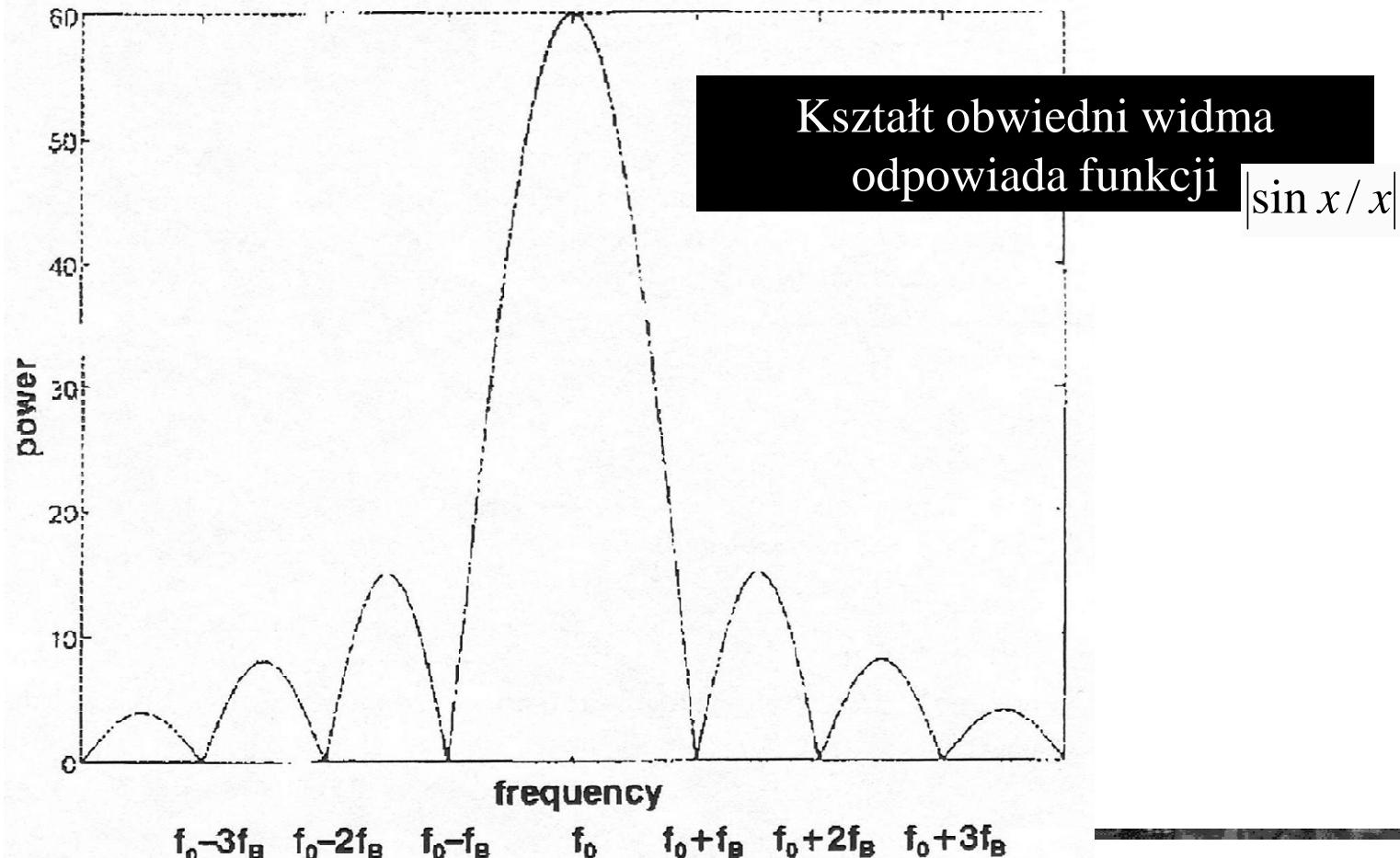
Zobrazowanie w przestrzeni sygnałowej punktów sygnałowych systemu PSK.

Współrzędne punktów:

$$s_1 = \int_0^{T_b} s_1(t) \cdot \phi_1(t) dt = +\sqrt{E_b}$$
$$s_2 = \int_0^{T_b} s_2(t) \cdot \phi_1(t) dt = -\sqrt{E_b}$$

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Modulacja z dwustanowym przesuwem fazy - **BPSK**



Widmo sygnału z modulacją BPSK.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Modulacja z dwustanowym przesuwem fazy - **BPSK**

Bitowa stopa błędu dla koherentnego binarnego sygnału PSK:

E_b – energia przesyłanego sygnału przypadająca na jeden bit.

N_0 – widmowa gęstość mocy szumu.

$$p_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$$

$\operatorname{erfc}(u)$ – dopełniająca funkcja błędu.

Funkcja błędu oznaczona symbolem $\operatorname{erf}(u)$ jest definiowana:

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-z^2) dz \quad \text{gdzie} \quad \operatorname{erf}(-u) = -\operatorname{erf}(u) \text{ - relacja symetrii}$$

Dla $u \in (0 \div \infty)$ $\operatorname{ref}(u) = \{0 \div 1\}$

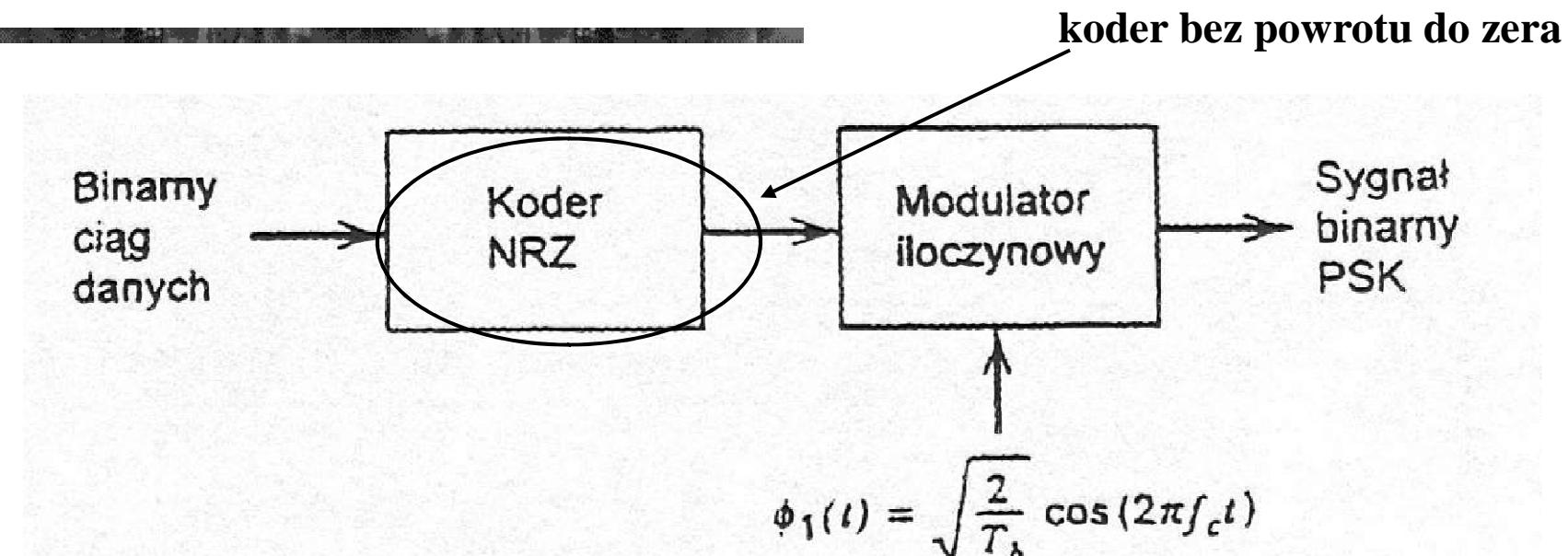
Dopełniająca funkcja błędu jest definiowana wzorem:

$$\operatorname{erfc}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_u^\infty \exp(-z^2) dz$$

$$\operatorname{refc}(u) = 1 - \operatorname{ref}(u)$$

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Modulacja z dwustanowym przesuwem fazy - **BPSK**

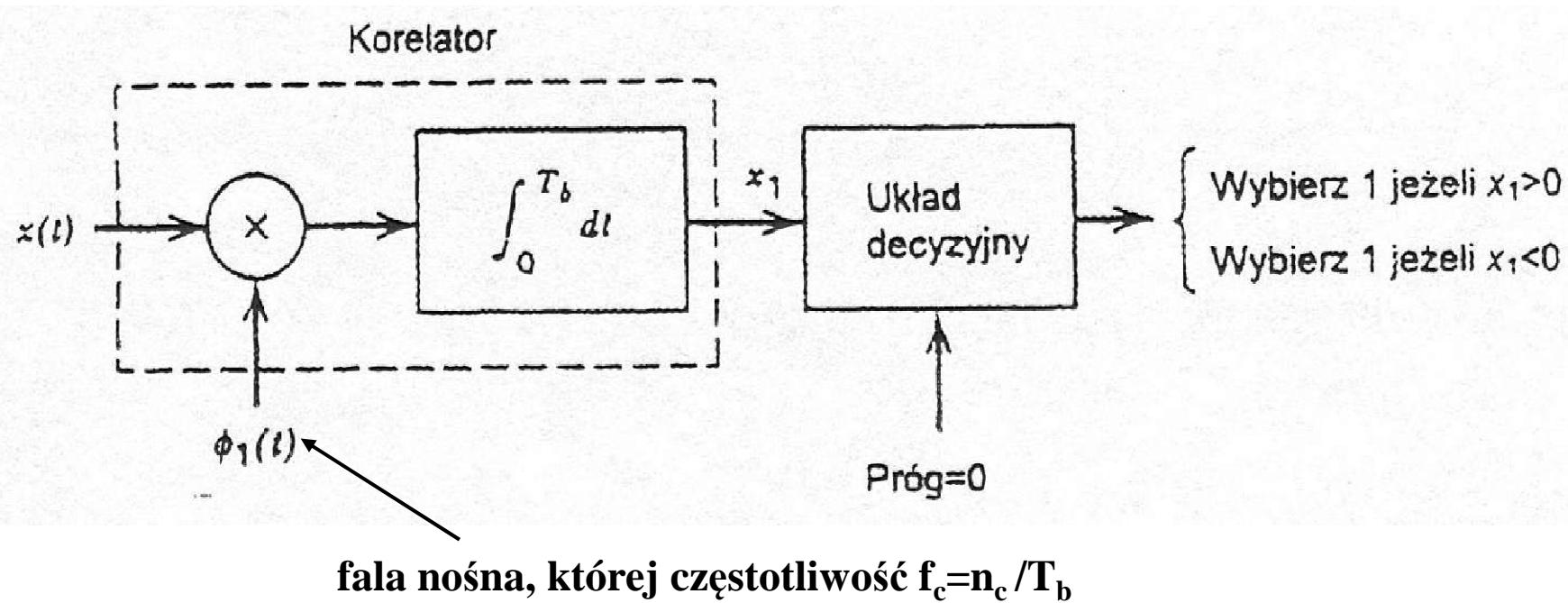


Schemat blokowy nadajnika koherentnego PSK

$\phi_1(t)$ – fala nośna, której częstotliwość wynosi $f_c = n_c/T_b$.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Modulacja z dwustanowym przesuwem fazy - **BPSK**



Schemat blokowy koherentnego binarnego odbiornika PSK.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Koherentne kluczowanie czterofazowe QPSK

Podobnie jak w systemie binarnym PSK informacja w QPSK jest zawarta w fazie fali nośnej. Faza fali nośnej może przybierać jedną z czterech równoodległych wartości,

np.: $\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}$

Nadawany sygnał można opisać wzorem:

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos \left[2\pi f_c t + (2i-1)\frac{\pi}{4} \right] \quad \text{dla } 0 \leq t \leq T$$
$$s_i(t) = 0 \quad \text{dla reszty}$$

$i = 1, 2, 3, 4;$

E – energia nadawanego sygnału przypadająca na jeden symbol;

T – czas trwania jednego symbolu;

f_c – częstotliwość nośna, wynosi n_c/T ;

n_c – pewna ustalona liczba całkowita.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Koherentne kluczowanie czterofazowe QPSK

W rozwinięciu sygnału $s_i(t)$ zawarte są dwie ortogonalne funkcje bazowe, tzw. para kwadraturowych fal nośnych:

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T$$
$$\phi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T$$

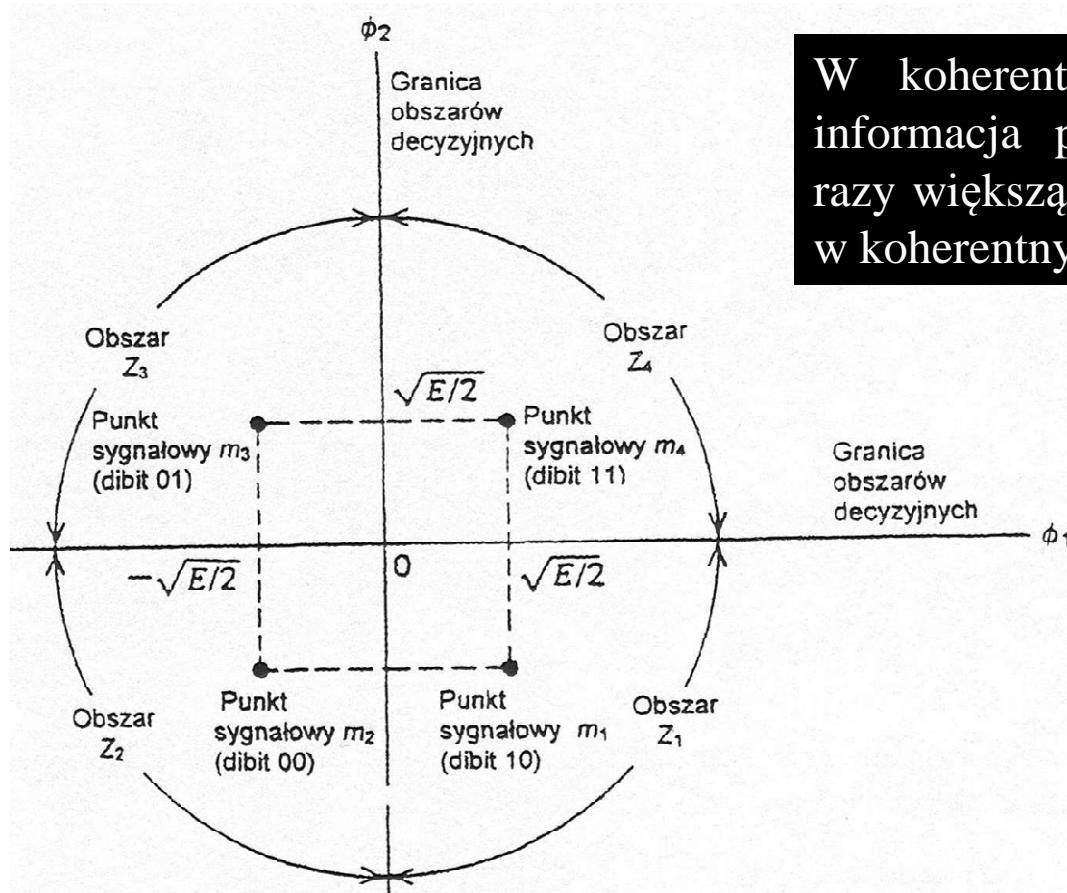
Punktom sygnałowym na płaszczyźnie sygnałowej odpowiadają poszczególne dwubity.

Dwubit wejściowy $0 \leq t \leq T$	Faza sygnału QPSK (radianów)	Współrzędne punktów sygnałowych	
		s_{t1}	s_{t2}
10	$\pi/4$	$+\sqrt{E/2}$	$-\sqrt{E/2}$
00	$3\pi/4$	$-\sqrt{E/2}$	$-\sqrt{E/2}$
01	$5\pi/4$	$-\sqrt{E/2}$	$+\sqrt{E/2}$
11	$7\pi/4$	$+\sqrt{E/2}$	$+\sqrt{E/2}$

Zestawienie poszczególnych dwubitów i odpowiadających im współrzędnych punktów na płaszczyźnie sygnałowej dla koherentnego systemu QPSK.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Koherentne kluczowanie czterofazowe QPSK



W koherentnym systemie QPSK informacja przesyłana jest z dwa razy większą szybkością bitową, niż w koherentnym systemie BPSK.

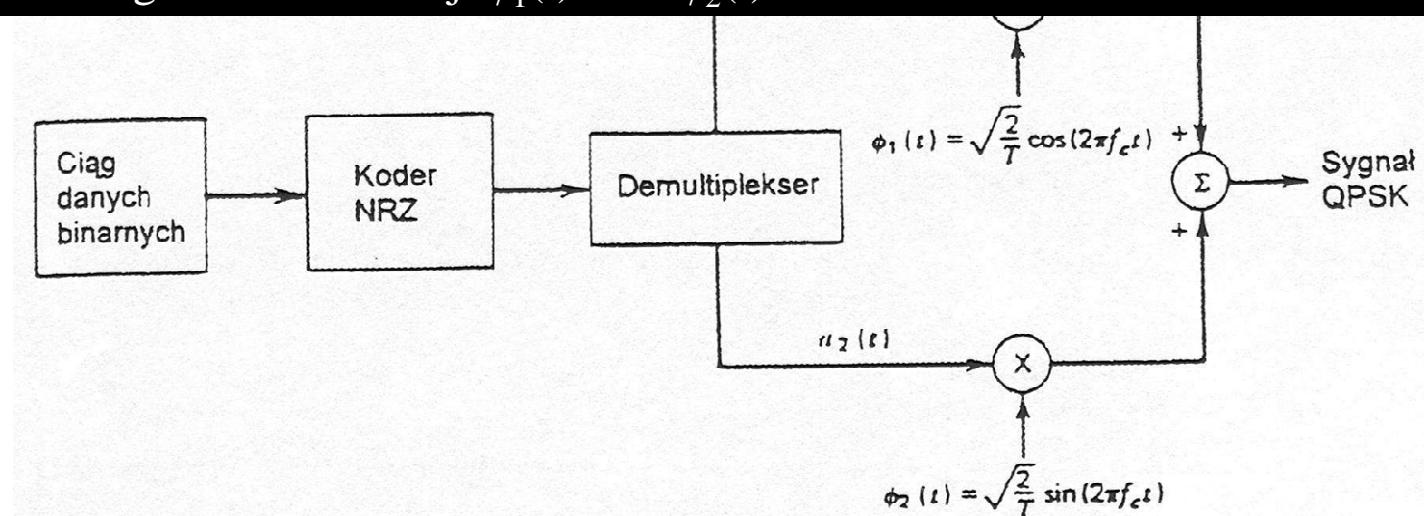
Zobrazowanie w przestrzeni sygnałowej dla koherentnego binarnego sygnału QPSK.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Koherentne kluczowanie czterofazowe QPSK

Ciąg danych jest przekształcany w koderze NRZ z postaci unipolarnej na postać bipolarną. W demultiplekserze jest rozdzielany na dwie oddzielne fale binarne, składające się z bitów wejściowych odpowiednio o numerach nieparzystych i parzystych oznaczonych przez $a_1(t)$ i $a_2(t)$. Obie fale binarne modulują parę kwadraturowych sygnałów nośnych w postaci ortogonalnych funkcji bazowych $\phi_1(t)$ oraz $\phi_2(t)$.

Powstaje para binarnych sygnałów BPSK, którą można poddać oddzielnej detekcji ze względu na ortogonalność funkcji $\phi_1(t)$ oraz $\phi_2(t)$.

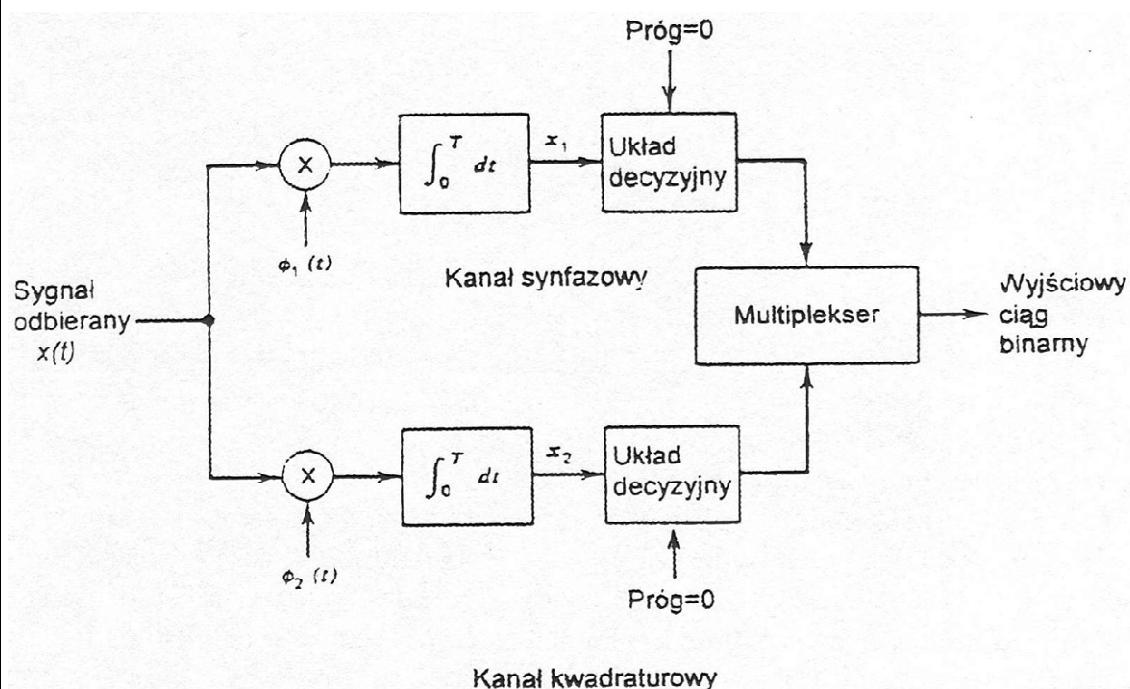


Schemat blokowy nadajnika binarnego sygnału QPSK.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Koherentne kluczowanie czterofazowe QPSK

Układ składa się z dwóch korelatorów ze wspólnym wejściem do, którego doprowadzany jest sygnał $x(t)$. Na drugie wejścia korelatorów podawane są sygnały $\phi_1(t)$ oraz $\phi_2(t)$, stanowiące lokalnie generowane koherentne sygnały odniesienia. Sygnały wyjściowe korelatorów x_1 oraz x_2 podawane są na układ decyzyjny (decyzja na korzyść symbolu „0” lub „1”).

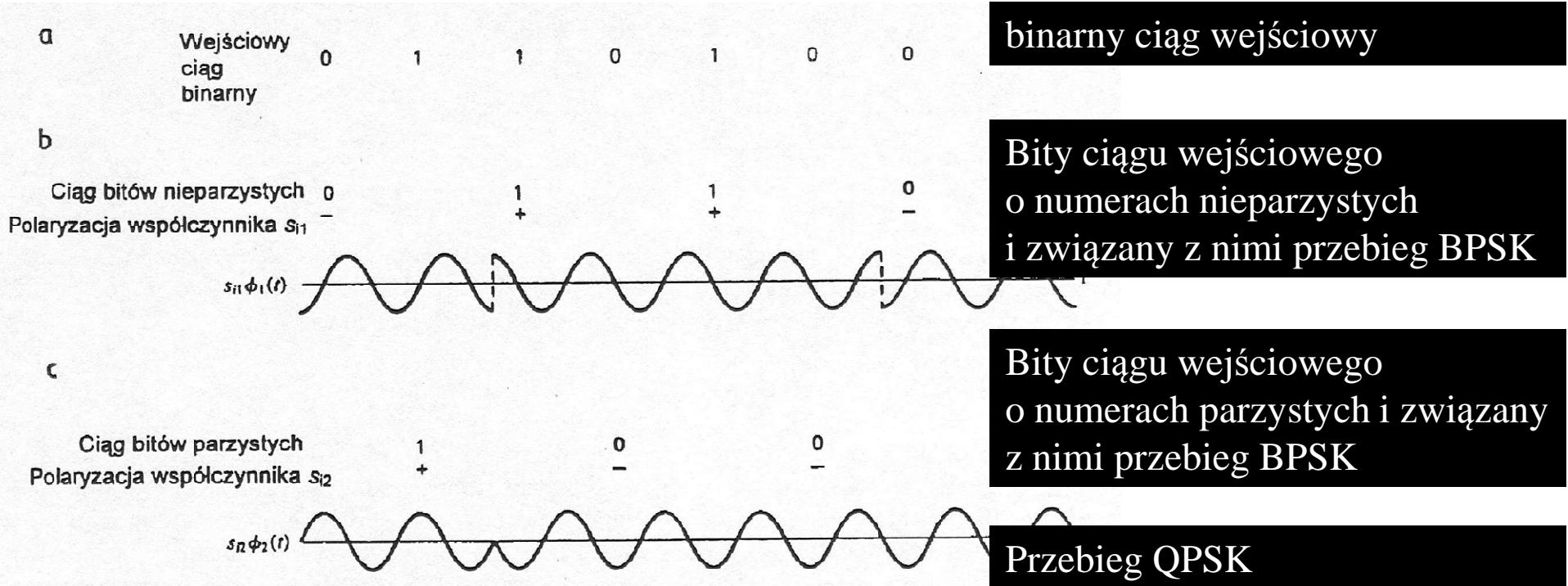


W dalszej kolejności oba ciągi binarne zostają podane na wejście multipleksera, gdzie uzyskuje się oryginalny ciąg binarny, taki jaki został doprowadzony na wejście nadajnika. Jest on z pewnym p-stwem błędu na symbol, wynikającym z właściwości kanału transmisyjnego

Schemat blokowy odbiornika koherentnego binarnego sygnału QPSK.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Koherentne kluczowanie czterofazowe QPSK

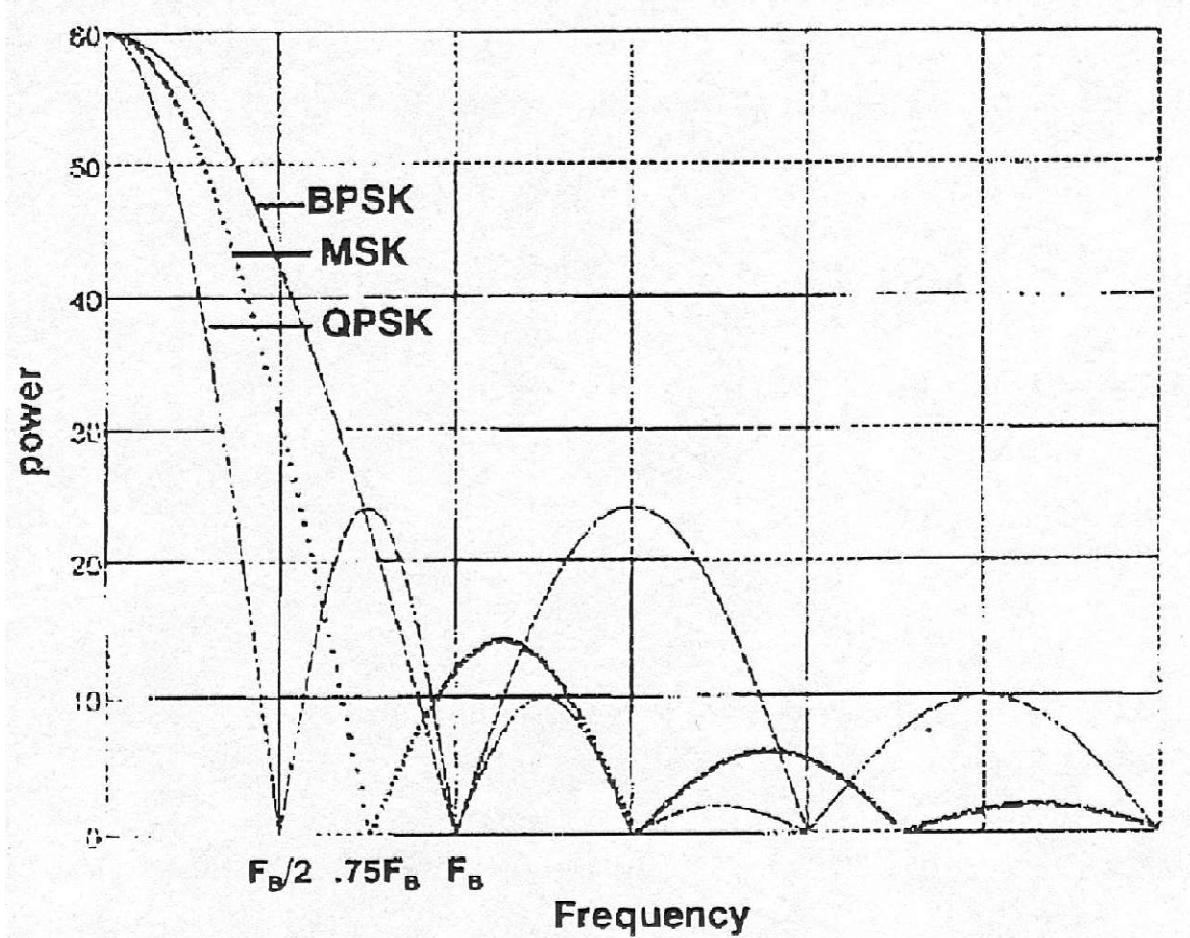


Binarny ciąg wejściowy został podzielony na dwa ciągi o parzystych i nieparzystych numerach. Każdy z nich moduluje odpowiednio składową synfazową i kwadraturową sygnału. Każdy z tych przebiegów z osobna można traktować jako przykład sygnału binarnego BPSK. Po ich dodaniu do siebie powstaje QPSK.

Ciągi binarne i przebiegi czasowe występujące przy generacji sygnałów QPSK

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Koherentne kluczowanie czterofazowe QPSK



Widmo sygnału QPSK

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Koherentne kluczowanie czterofazowe QPSK

W systemie QPSK przypada dwa bity na symbol, więc energia przesyłana przypadająca na jeden symbol jest dwa razy większa, niż energia przypadająca na jeden bit.

$$E = 2E_b$$

Średnie prawdopodobieństwo błędu na symbol wynosi:

$$p_e = \frac{1}{2} erfc\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$$

W koherentnym systemie QPSK średnie prawdopodobieństwo błędu na jeden bit jest takie samo jak w przypadku systemu BPSK, przy tej samej szybkości bitowej i tym samym stosunku E_b/N_0 , lecz zajmując połowę szerokości pasma kanału.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Różnicowy system PSK-DPSK

Różnicowy system kluczowania z przesuwem fazy (DPSK) może być uważany za niekoherentną wersję systemu PSK. Eliminuje potrzebę stosowania koherentnego sygnału odniesienia w odbiorniku.

Niech $s_1(t)$ oznacza nadawany sygnał DPSK w przedziale $0 \leq t \leq 2T_b$ w przypadku, gdy na wyjściu nadajnika pojawia się symbol „0”. W drugiej połowie tego przedziału przypadku gdy nie daje się nadajniku pojawiać symbolu „0”, wzorzec ją powtórzy w przedziale, zmieniono jednak sygnał $s_1(t)$ na postać $2T_b$. Przy nadawaniu symbolu „0” faza fali nośnej zostaje zwiększone o 180° i sygnał $s_1(t)$ na postać

$$s_1(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{E_b}{2T_b}} \cos(2\pi f_c t) & 0 \leq t \leq T_b \\ \sqrt{\frac{E_b}{2T_b}} \cos(2\pi f_c t + \pi) & T_b \leq t \leq 2T_b \end{cases}$$

Bitowa stopa błędu dla systemu DPSK:

$$p_e = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{N_0}\right)$$

E_b – energia przesyłanego sygnału przypadająca na jeden bit.

N_0 – widmowa gęstość mocy szumu.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Generacja sygnału DPSK

Proces kodowania różnicowego w nadajniku rozpoczyna się od dowolnego bitu, służącego jako bit odniesienia. Reguła kodowania:

- jeśli przychodzący symbol b_k wynosi 1, symbol wyjściowy d_k pozostaje bez zmian w stosunku do bitu poprzedniego;
- jeśli przychodzący symbol b_k wynosi 0, symbol wyjściowy d_k jest zmieniony w stosunku do bitu poprzedniego.

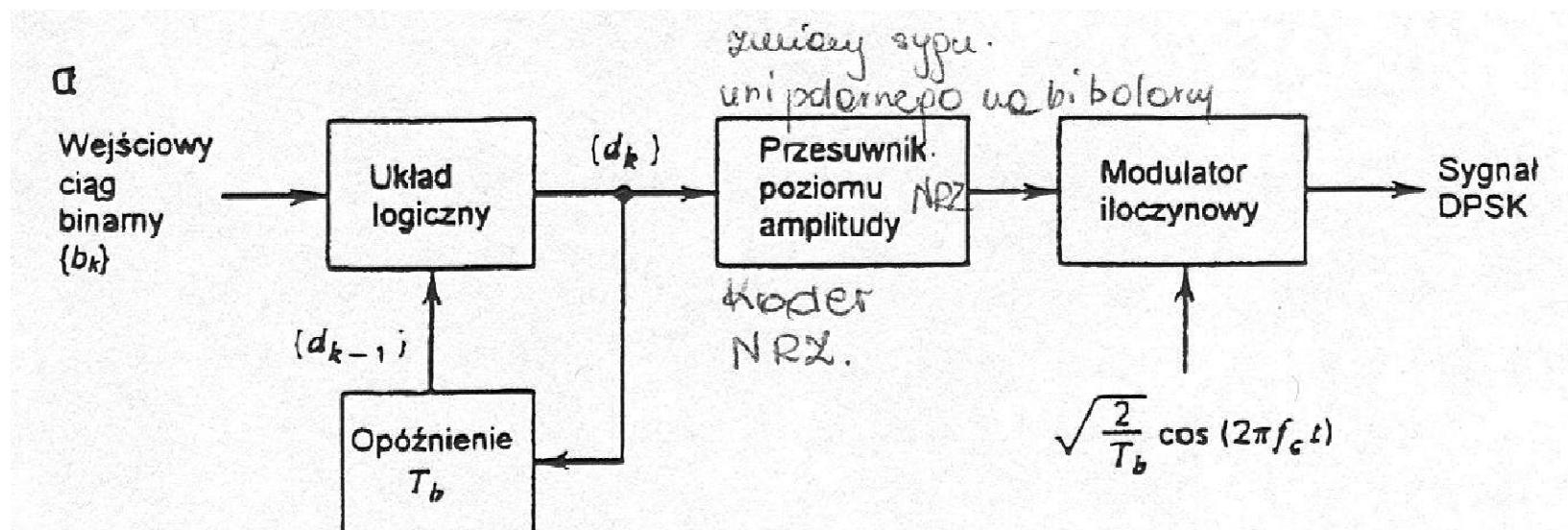
$\{b_k\}$	1	0	0	1	0	0	1	1
$\{d_{k-1}\}$	1	1	0	1	1	0	1	1
Ciąg zakodowany $\{d_k\}$	1	0	1	1	0	1	1	1
Faza sygnału wyjściowego	0	0	π	0	0	π	0	0

Proces różnicowego kodowania fazy.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Generacja sygnału DPSK

Nadajnik składa się z układu logicznego i jednobitowego układu opóźniającego tak połączonych aby zapewnić przetwarzanie wejściowego ciągu binarnego $\{b_k\}$ na zakodowany różnicowo ciąg $\{d_k\}$. Operacje kodowania w nadajniku są następujące. Kodowanie różnicowe wejściowej fali nośnej oraz kluczowanie z przesuwem fazą – stąd nazwa różnicowe kluczowanie z przesuwem fazą (DPSK). Dla przesłania symbolu „0” przesuwa się fazę bieżącego przebiegu o 180° natomiast dla symbolu „1” pozostawia się fazę bieżącego przebiegu bez zmiany.

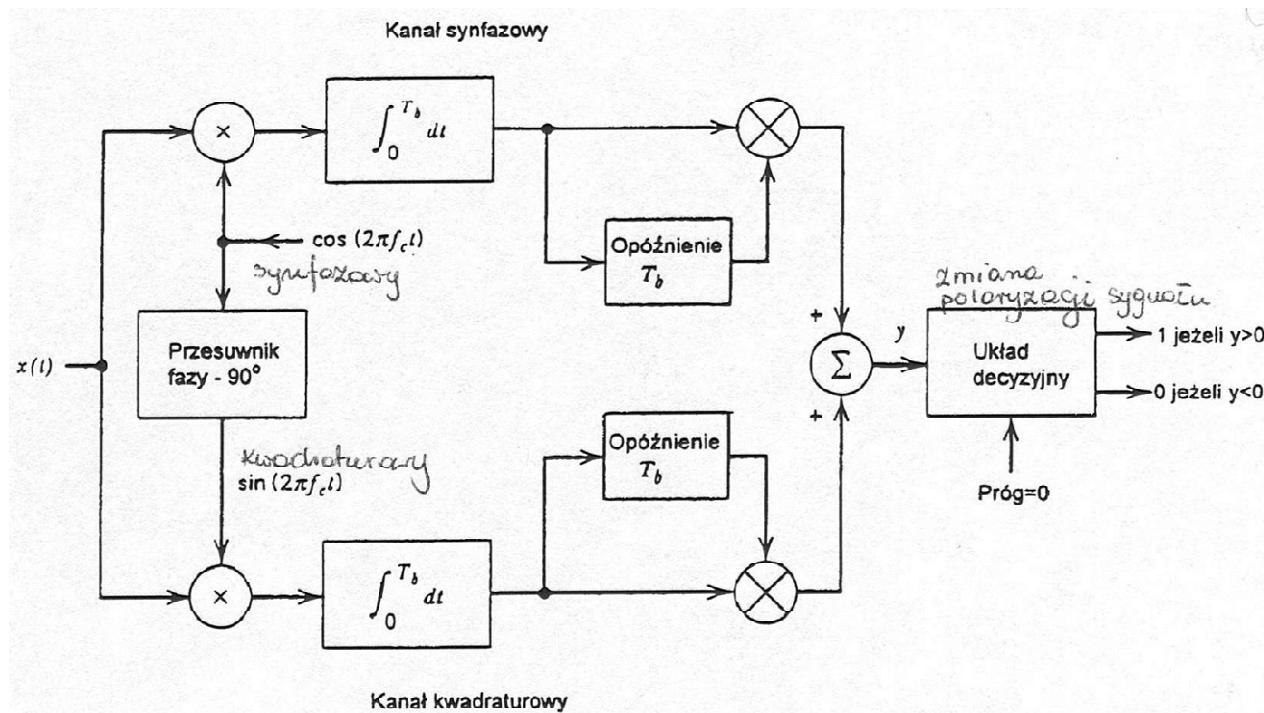


Schemat nadajnika binarnego sygnału DPSK.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Generacja sygnału DPSK

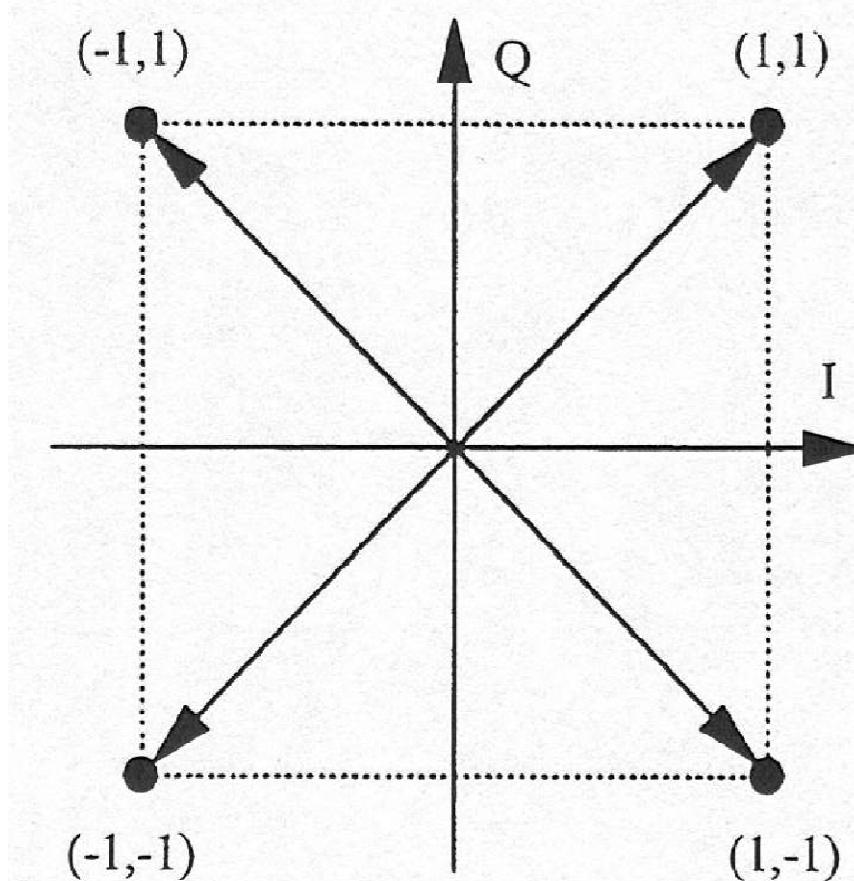
Odbiornik zostaje wyposażony w pamięć, tak aby mógł mierzyć względna różnicę faz między przebiegami odebranymi w dwóch kolejnych przedziałach czasu dwóch kolejnych bitów.



Schemat odbiornika koherentnego binarnego sygnału DPSK.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

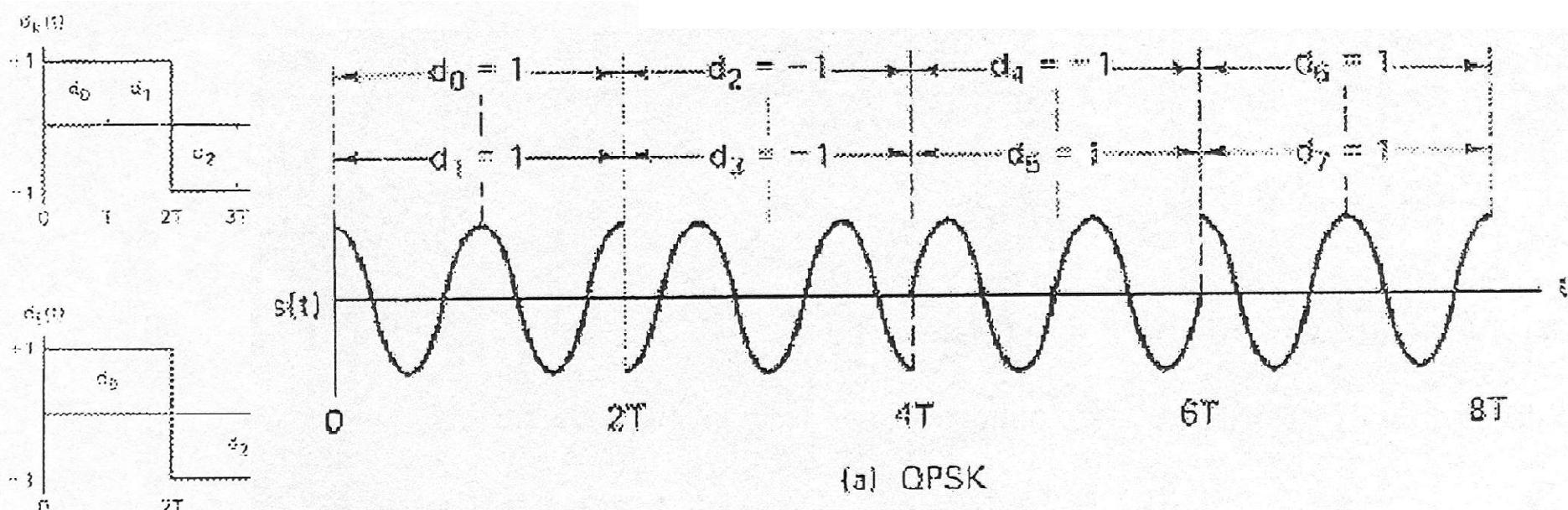
Modulacja $\pi/4$ QPSK



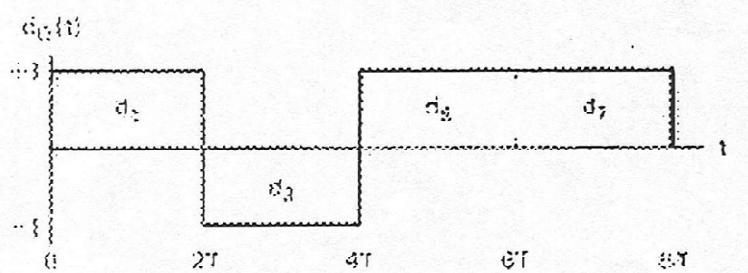
Wykres wektorowy przejść pomiędzy poszczególnymi punktami.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Modulacja $\pi/4$ QPSK



Przebieg danych dla modulacji OQPSK

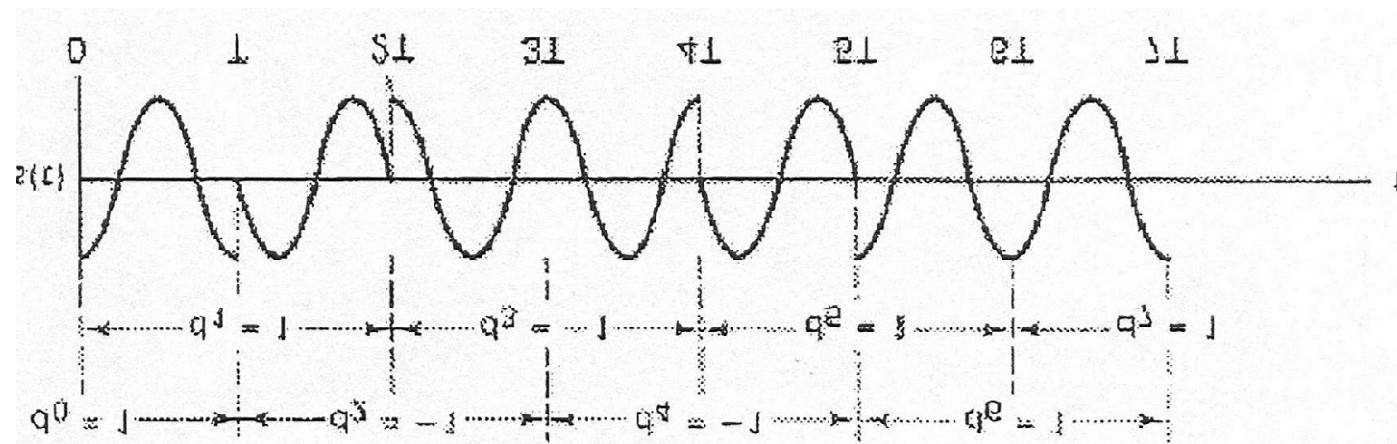
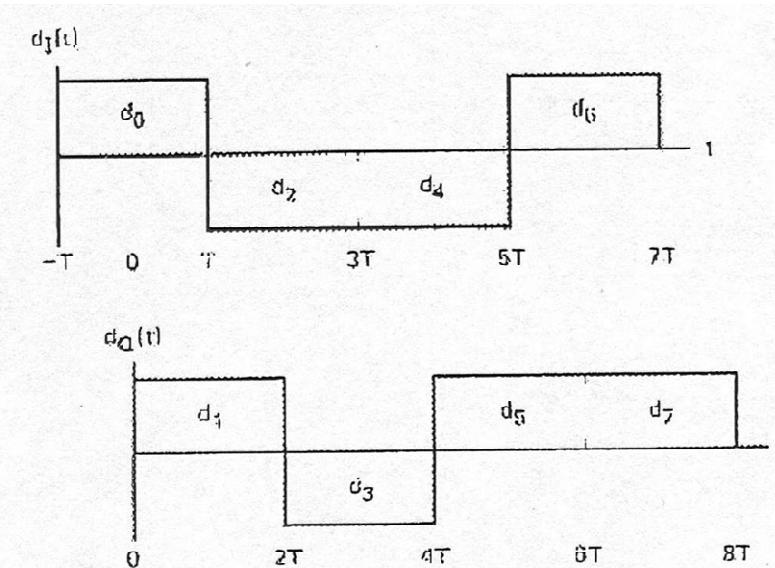


Przebieg danych dla modulacji QPSK.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Modulacja OQPSK

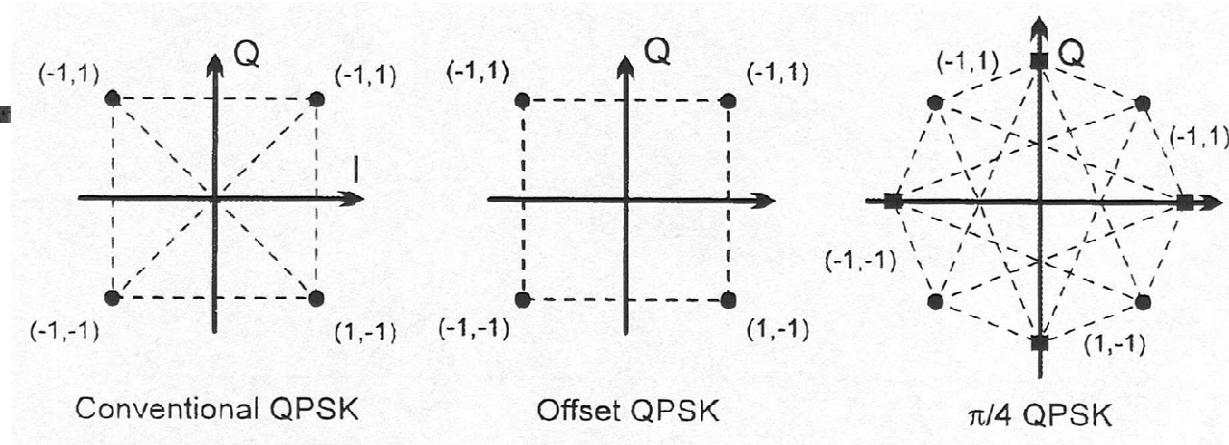
Przebieg czasowy sygnału modulacji OQPSK.



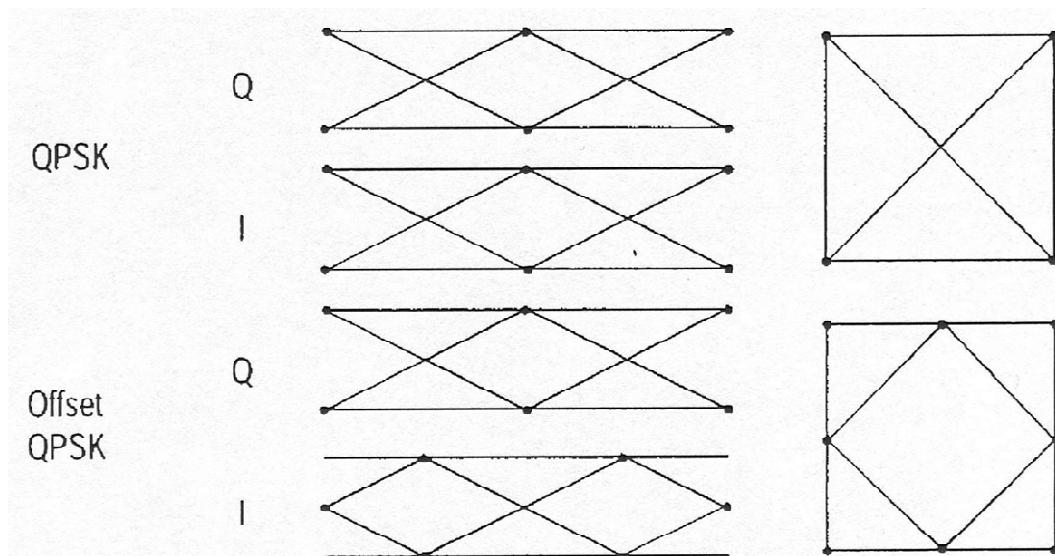
Wykresy wektorowe przejść pomiędzy poszczególnymi punktami.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Modulacja OQPSK



Wykresy wektorowe przejść pomiędzy poszczególnymi punktami.

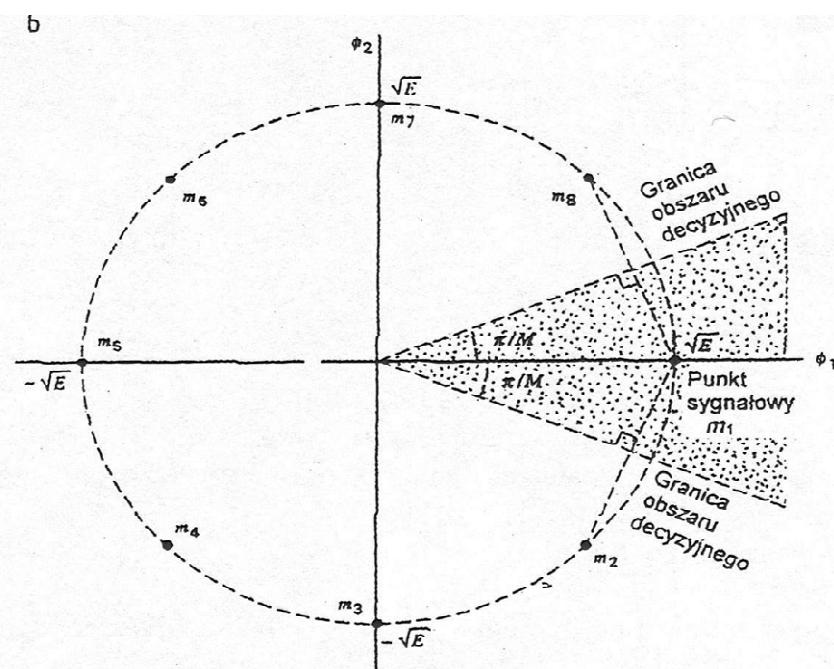


Przejścia pomiędzy poszczególnymi punktami dla składowej Q i I .

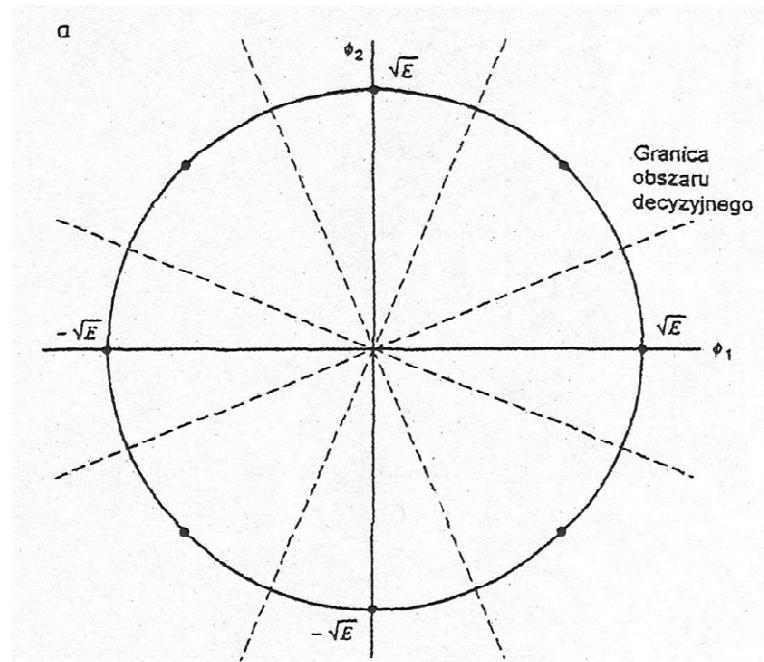
MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

8-wartościowy system PSK

W systemie M-wartościowym czas trwania symbolu wynosi $T = nT_b$, gdzie T_b -czas trwania jednego bitu, n -liczba całkowita.



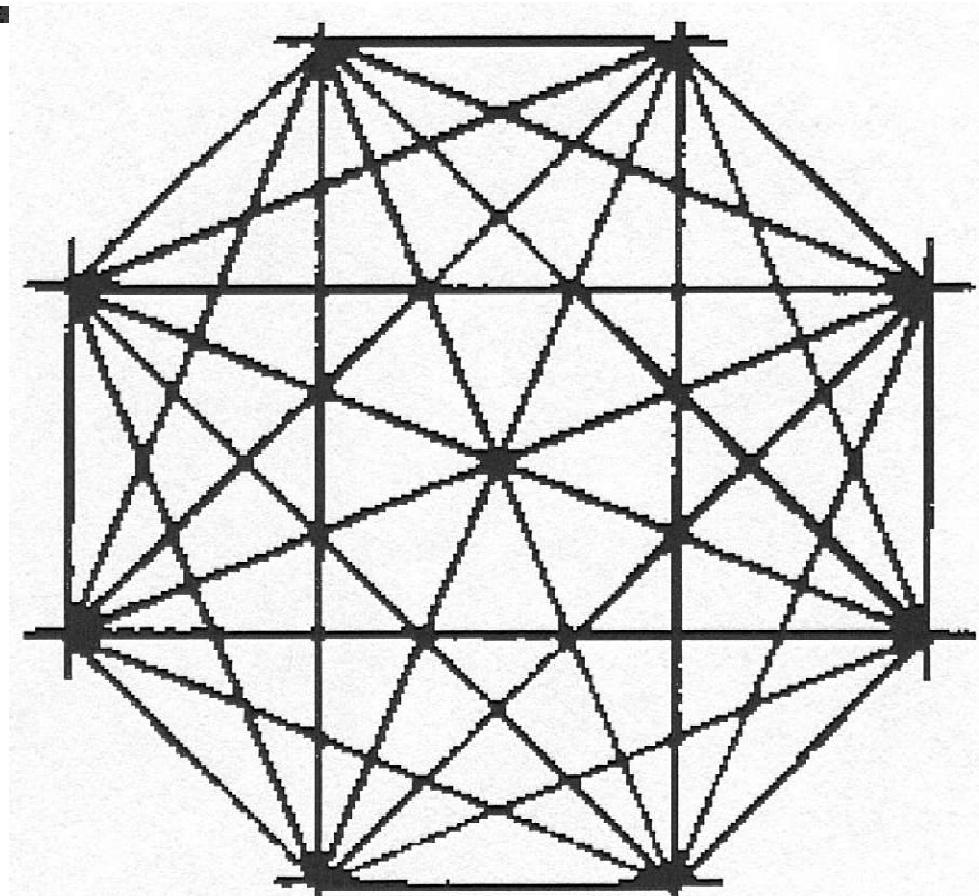
Ilustracja w przestrzeni sygnałowej oszacowania sumacyjnego dla tego systemu.



Zobrazowanie w przestrzeni sygnałowej dla systemu MPSK, $M=8$.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

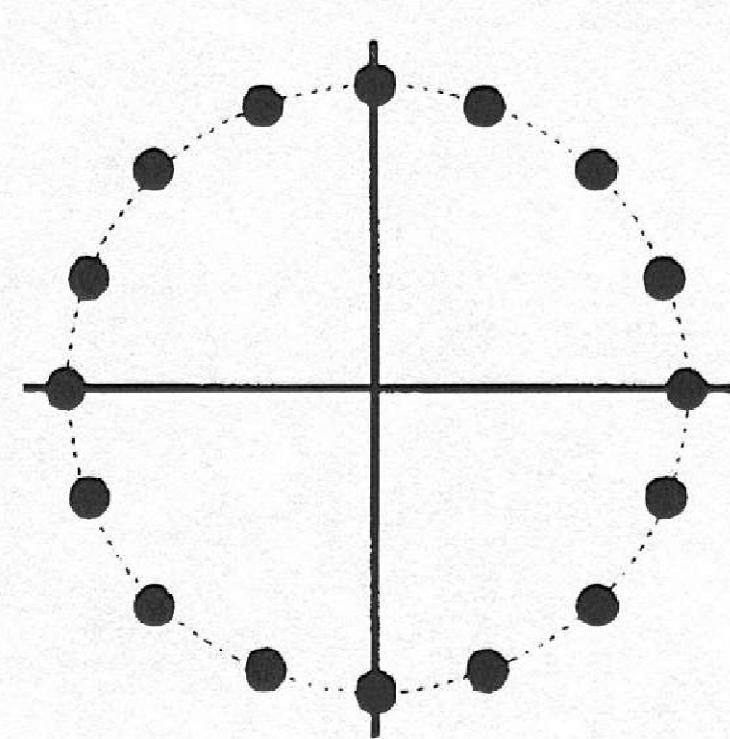
8-wartościowy system PSK



Wykres wektorowy przejść pomiędzy dowolnymi punktami dla 8PSK.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

16-wartościowy system PSK



Konstelacja punktów systemu 16 PSK.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

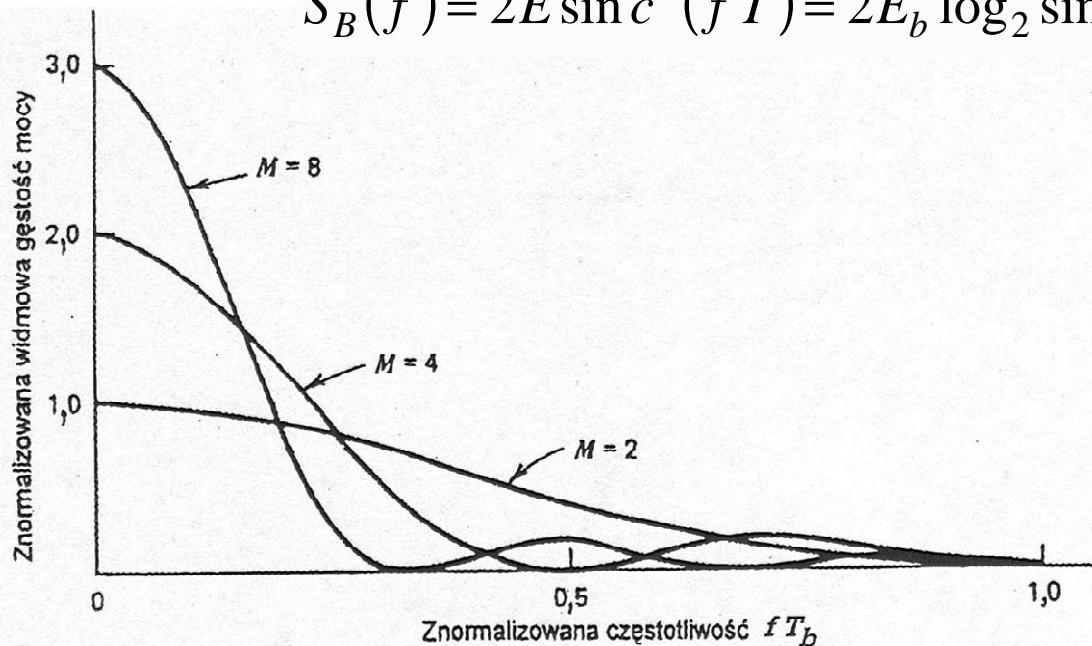
widmo gęstości mocy

Binarne sygnały PSK i QPSK stanowią szczególne przypadki sygnału M-PSK. Czas nadawania pojedynczego symbolu dla sygnału M-PSK określa zależność:

$$T = T_b \log_2 M$$

Widmowa gęstość mocy przypadająca na pasmo podstawowe sygnału M-PSK.

$$S_B(f) = 2E \sin c^2(fT) = 2E_b \log_2 \sin c^2(fT \log_2 M)$$

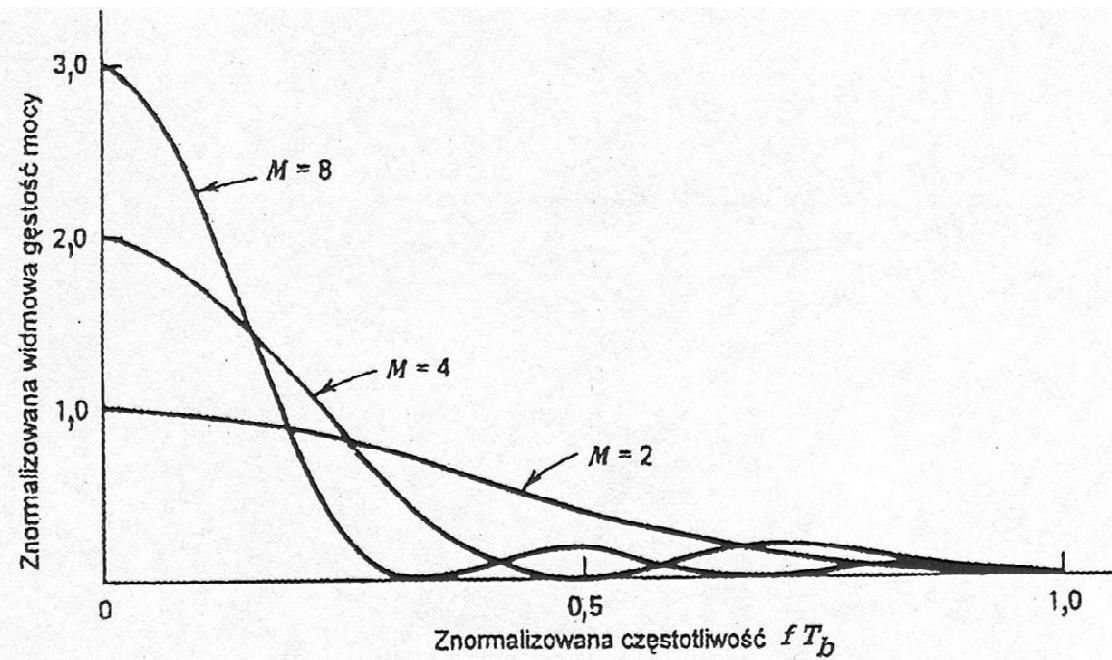


Znormalizowana widma gęstości mocy w funkcji znormalizowanej częstotliwości dla sygnałów M-PSK, $M=2, 4, 8$.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Pasmo przenoszenia sygnałów M-PSK

Widmowa gęstość mocy dla sygnałów M-PSK, $M=2,4,8$.



Widma mocy sygnałów M-PSK posiadają listek główny przez dobrze określone zera gęstości widmowej (tzn. widma, dla których widmowa gęstość mocy jest równa零). Dlatego szerokość widma listka głównego stanowi miarę szerokości pasma sygnałów M-PSK.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Pasmo przenoszenia sygnałów M-PSK

Przyjmując, że listek główny widma mocy sygnału M-wartościowego zawiera się w granicach pasma można uznać, że pasmo to obejmuje prawie całą moc zawartą w sygnale. Szerokość pasma kanału, wymagana dla transmisji sygnałów M-PSK (głównego listka widma sygnałów M-PSK), jest określona zależnością:

$$B = \frac{2}{T}$$
 gdzie: T – czas nadawania pojedynczego symbolu.

Wiedząc, że szybkość bitowa wynosi $R_b = 1/T_b$, więc szerokość pasma kanału wynosi:

$$B = \frac{2R_b}{\log_2 M}$$

Efektywność wykorzystania pasma określa się wydajnością widmową. Wydajność widmową ρ sygnałów M-PSK wyraża zależność.

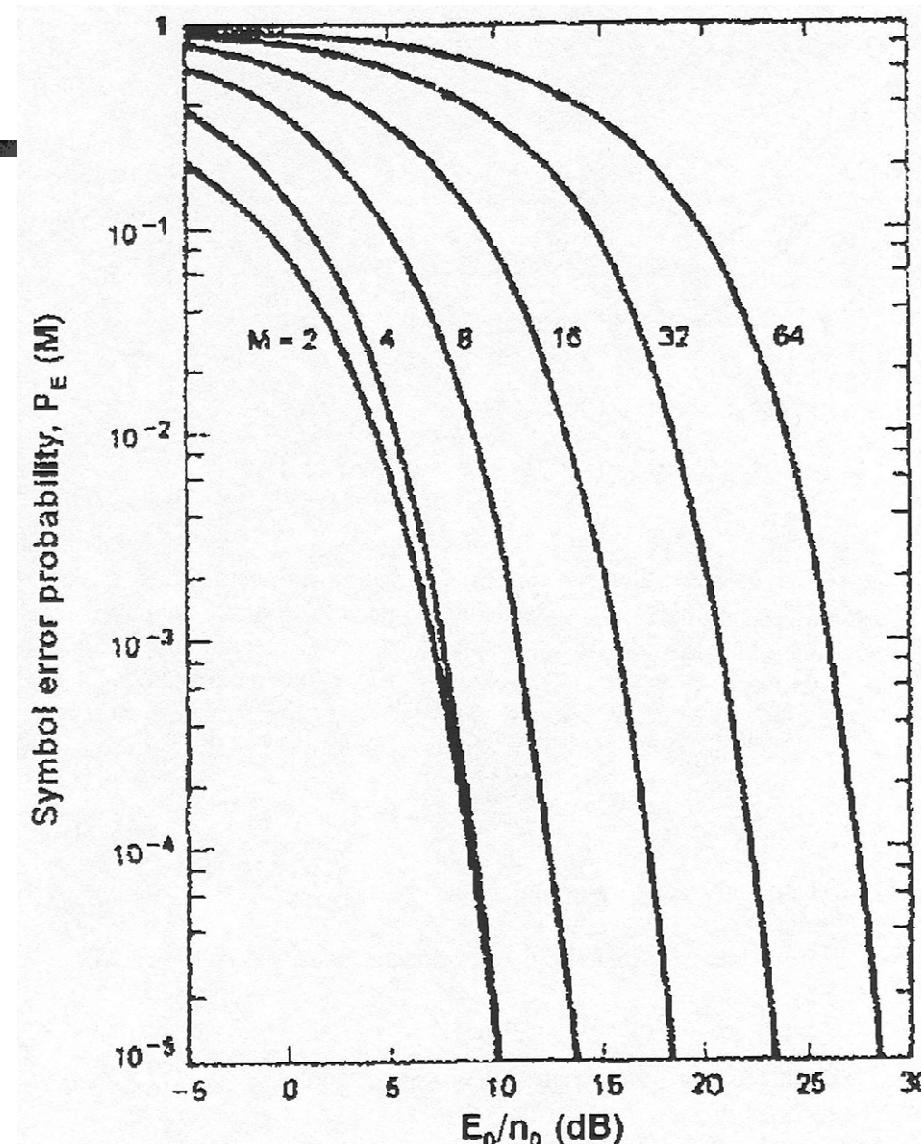
$$\rho = \frac{R_b}{B} = \frac{\log_2 M}{2}$$

M	2	4	8	16	32	64
ρ [bit/s/Hz]	0.5	1	1.5	2	2.5	3

Efektywność wykorzystania szerokości pasma dla sygnałów M-PSK.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Bitowa stopa błędu



Bitowa stopa błędu.

MODULACJE Z KLUCZOWANIEM FAZY

Porównanie wymaganych szerokości pasma

PORÓWNANIE WYMAGANYCH SZEROKOŚCI PASMA
I MOCY DLA M -WARTOŚCIOWEGO SYSTEMU PSK
I BINARNEGO SYSTEMU PSK.
PRAWDOPODOBIEŃSTWO BŁĘDU NA SYMBOL WYNOSI 10^{-4}

Wartość M	(Szerokość pasma) _{MPSK} (Szerokość pasma) _{Binarny PSK}	(Średnia moc) _{MPSK} (Średnia moc) _{Binarny PSK}
4	0,5	0,34 dB
8	0,333	3,91 dB
16	0,25	8,52 dB
32	0,2	13,52 dB

* Tablica zaczerpnięta z pracy Shanmugama (1979, s. 424)

WNIOSKI

- Proszę scharakteryzować samodzielnie właściwości i cechy szczególne modulacji z kluczowaniem fazy.
-

**DZIĘKUJĘ
ZA UWAGĘ**