

Piotr Korbel

Bezprzewodowe sieci telekomunikacyjne

Modulacje cyfrowe w systemach łączności bezprzewodowej

Zadanie nr 14 – Studia podyplomowe „Bezprzewodowe systemy nadzoru i monitorowania”



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Prezentacja multimedialna
współfinansowana przez Unię Europejską
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego
w projekcie

*„Innowacyjna dydaktyka bez ograniczeń
– zintegrowany rozwój Politechniki Łódzkiej –
zarządzanie Uczelnią,
nowoczesna oferta edukacyjna
i wzmacniania zdolności do zatrudniania
osób niepełnosprawnych”*



Politechnika Łódzka
Instytut Elektroniki

90-924 Łódź, ul. Żeromskiego 116,
tel. 042 631 28 83
www.kapitalludzki.p.lodz.pl



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Prezentacja multimedialna współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Cele i plan wykładu

- Cele wykładu
 - Zapoznanie z metodami modulacji wykorzystywanych w cyfrowych systemach bezprzewodowej transmisji danych
- Plan wykładu
 - Binarne modulacje cyfrowe
 - Modulacje wielowartościowe





Metody modulacji cyfrowej



Cyfrowy system teletransmisji





Metody modulacji cyfrowej

- Modulacja – kontrolowana zmiana w czasie pewnego procesu periodycznego zgodnie ze zmianami sygnału wejściowego. Wyróżnia się modulację amplitudy (AM), częstotliwości (FM) lub fazy (PM) przebiegu sinusoidalnej fali nośnej.

$$s(t) = A(t) \cdot \sin[2\pi f(t) + \varphi(t)]$$

- Modulator – urządzenie przetwarzające informację (ciąg danych) na zbiór sygnałów odpowiednich do przesłania w medium transmisyjnym.
- Demodulacja – proces odwrotny do modulacji, polegający na uzyskaniu możliwie najmniej zniekształconej informacji oryginalnej z przebiegu zmodulowanego.
- Demodulator – urządzenie przeprowadzające demodulację i podejmujące decyzję, jaki znak (lub zbiór znaków) został nadany.





Metody modulacji cyfrowej

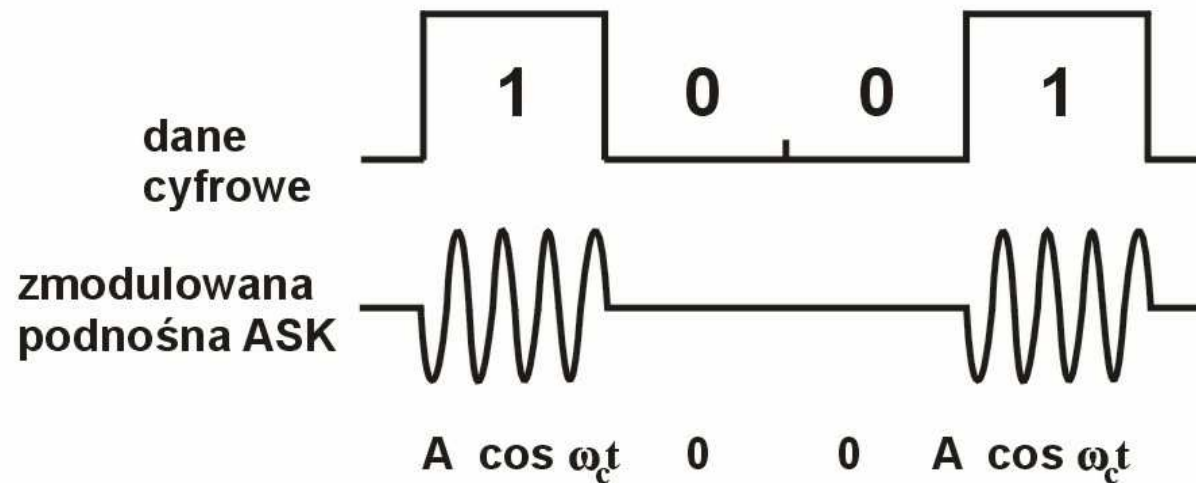
- Modulacja binarna – przykłady
 - **ASK, BASK** (Amplitude Shift Keying, Binary ASK) – kluczkowanie amplitudy, jej odmianą jest OOK (On-Off Keying)
 - **FSK, BFSK** (Frequency Shift Keying, Binary FSK) – kluczkowanie częstotliwości
 - **PSK, BPSK** (Phase Shift Keying, Binary PSK) kluczkowanie fazy
 - **DPSK** (Differential Phase Shift Keying) – różnicowe kluczkowanie fazy
 - **MSK** (Minimum Shift Keying) – „szybkie” kluczkowanie częstotliwości
 - **DMSK** (Differential MSK) – różnicowe szybkie kluczkowanie częstotliwości
 - **GMSK** (Gaussian MSK) – „szybkie” kluczkowanie częstotliwości z gaussowskim kształtowaniem impulsów



Metody modulacji cyfrowej

ASK

Amplitude Shift Keying (ASK)

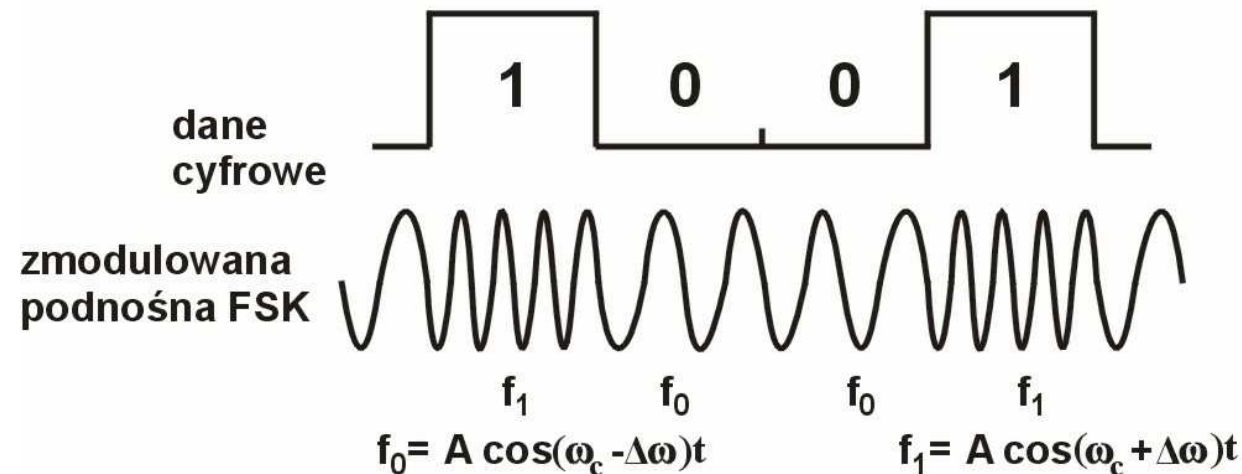


Modulacja ASK silnie podlega wpływowi zakłóceń i interferencji.

Metody modulacji cyfrowej

- FSK

Frequency Shift Keying (FSK)

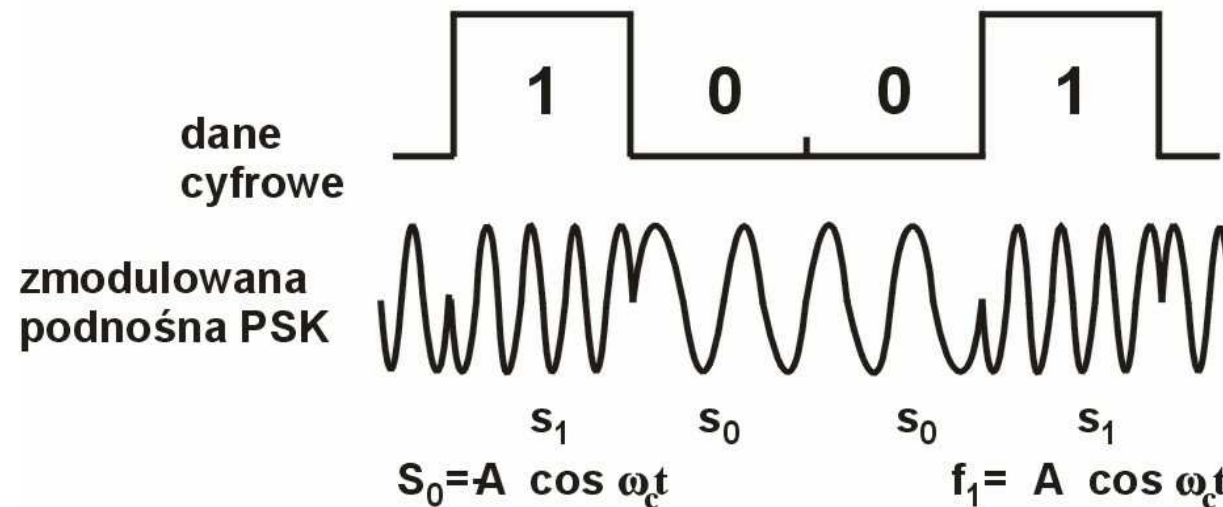


- W czasie trwania bitów odpowiadających logicznemu „0” generowana jest podnośna o częstotliwości f_0 , a podczas bitów „1” – częstotliwość f_1 .
- Odstęp pomiędzy częstotliwościami f_0 i f_1 (czyli dewiację Δf) wybiera się zwykle równy odwrotności podwojonego czasu trwania bitu t_b danych.

Metody modulacji cyfrowej

PSK

Phase Shift Keying (PSK)



Dla bitów odpowiadających logicznej „1” następuje zmiana fazy na przeciwną, czyli o π , w stosunku do fazy przy nadawaniu bitów „0”.

W celu ograniczenia zajmowanego pasma można zastosować filtrację podnośnej.



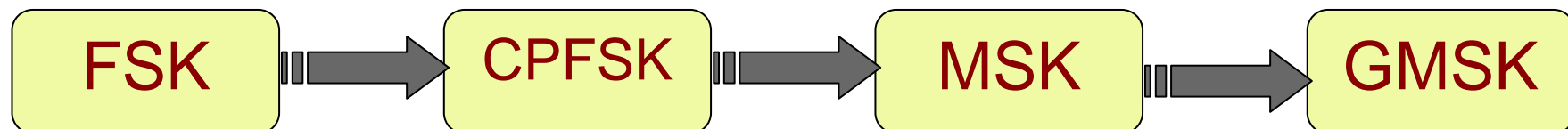
Metody modulacji cyfrowej

GMSK

Modulacja GMSK jest modyfikacją FSK, polegającą na wymuszeniu ciągłości zmian fazy – CPFSK (Continuous Phase FSK) – kluczowanie częstotliwości z ciągłą fazą oraz zmniejszoną do połowy dewiacją częstotliwości.

$$\Delta f = f_1 - f_0 = \frac{1}{4t_b}$$

Jest to tzw. szybkie kluczowanie częstotliwości. Nazwa bierze się stąd, że odstęp pomiędzy częstotliwościami został dwukrotnie zmniejszony w stosunku do FSK.





Metody modulacji cyfrowej

- Modulacje wielowartościowe
 - Znaczne zwiększenie przepustowości kanału uzyskuje się, gdy na etapie modulacji cyfrowej zamiast binarnych metod modulacji (2-wartościowych), odwzorowujących pojedyncze bity danych, stosuje się wielowartościowe metody modulacji (np. 4-, 8-, , 128-, 256-wartościowe, ogólnie 2^n wartościowe).
 - Stosuje się kombinacje podstawowych technik modulacji, modyfikując nie tylko jeden parametr podnośnej, a dwa – najczęściej amplitudę i fazę lub amplitudę i częstotliwość.
 - Wielowartościowe metody modulacji, ze względu na większą ilość rozróżnianych stanów sygnału są bardziej podatne na możliwość wystąpienia błędy transmisji. Wymagają więc lepszego toru transmisyjnego (konieczność zapewnienia lepszego stosunku sygnału do szumu).





Metody modulacji cyfrowej

- Najbardziej znanymi technikami **modulacji wielowartościowej** są:
 - **QPSK** (Quadrature Phase Shift Keying) – 4-wartościowe kluczowanie fazy
 - **OQPSK** (Offset QPSK) – 4-wartościowe kluczowanie fazy z offsetem
 - **$\pi/4$ QPSK** – 4-wartościowe kluczowanie z przesuwem fazy $\pi/4$
 - **DQPSK** (Differential QPSK) – 4-wartościowe różnicowe kluczowanie z przesuwem fazy
 - **8PSK, nPSK** (Phase Shift Keying) – 8-, n-wartościowe ($n=2m$, gdzie m – ilość kodowanych bitów) kluczowanie z przesuwem fazy





Metody modulacji cyfrowej

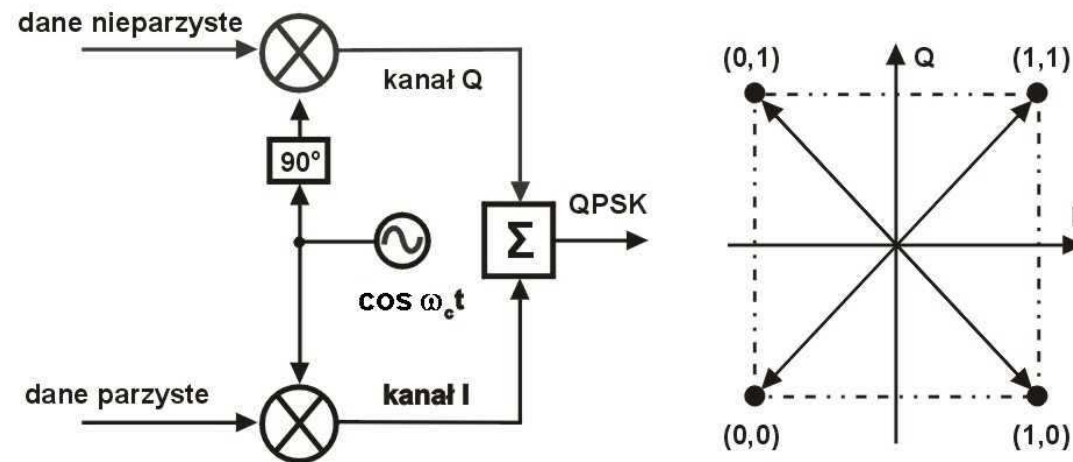
- Najbardziej znanymi technikami **modulacji wielowartościowej** są:
 - **D8PSK** (Differential 8PSK) – 8-wartościowe różnicowe kluczkowanie z przesuwem fazy
 - **n-CPFSK** (Continuous-Phase Frequency Shift Keying) – n-wartościowe kluczkowanie z przesuwem częstotliwości o ciągłej fazie
 - **8APK, nAPK** (Amplitude Phase Keying) – 8-, n-wartościowe ($n=2m$) kluczkowanie z przesuwem amplitudy i fazy
 - **QAM, 64QAM** (Quadrature Amplitude Modulation) – 4-, 64-wartościowa modulacja amplitudy
 - **OFDM, FDM** ([Orthogonal] Frequency Division Multiplexing) – modulacja ze zwielokrotnieniem częstotliwości [ortogonalnym]



Metody modulacji cyfrowej

Modulacja QPSK

QPSK



W QPSK na podnośnej odwzorowywany jest stan dwóch bitów danych jednocześnie. Wymaga to zastosowania czterech różnych wartości zmiany fazy przebiegu, np. $\pi/4$ odpowiadającej kombinacji bitów „11”, $3\pi/4$ dla „01”, $-3\pi/4$ dla „00” i $-\pi/4$ dla „10”.

Można powiedzieć, że QPSK stanowi połączenie dwóch modulacji PSK w kanale synchronicznym I oraz przesuniętym względem niego o 90° kanale kwadraturowym Q.



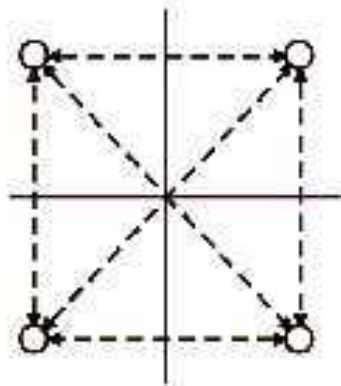
Metody modulacji cyfrowej

- Odmiany modulacji QPSK
 - W konwencjonalnej odmianie QPSK wymagane jest stosowanie w torze modulatora i nadajnika wzmacniaczy o bardzo zaostrzonych kryteriach liniowości.
 - QPSK z offsetem (OQPSK) ma tak zorganizowany koder stanów cyfrowych, że stany kanałów Q oraz I zmieniają się naprzemiennie, co ogranicza możliwość zmian fazy do 90° i zapobiega przejściom podnośnej przez zero.
 - Modulacja $\pi/4$ QPSK stanowi dwie konstelacje punktów przesuniętych w stosunku do siebie o 45° , co tak że eliminuje przejścia podnośnej przez zero, a jednocześnie zapewnia uzyskanie obwiedni podnośnej o minimalnej szybkości zmian w porównaniu z poprzednimi odmianami QPSK (węższe pasmo wymagane do przesłania tej samej informacji).

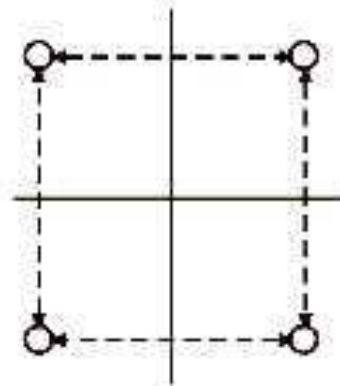




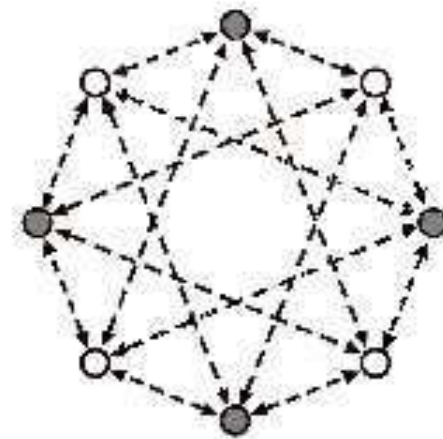
Metody modulacji cyfrowej



a) QPSK



b) O-QPSK



c) $\pi/4$ -QPSK

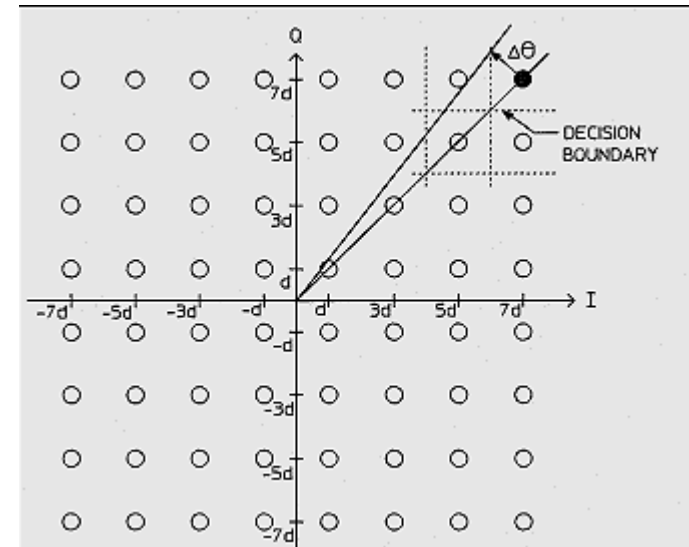
Odmiiany modulacji QPSK



Metody modulacji cyfrowej

Modulacja QAM

Modulacja QAM używa różnych kombinacji amplitudy i fazy fali nośnej do odwzorowania pewnej liczby bitów danych cyfrowych.



Liczby w nazwach (np. 16-QAM i 64-QAM) oznaczają liczbę kombinacji amplitudy i fazy. W pierwszym przykładzie odwzorowywany jest stan 4 bitów danych, a w drugim – 6 bitów danych jednocześnie.

QAM umożliwia przeniesienie dużej ilości informacji cyfrowej w kanale transmisyjnym o stosunkowo małej szerokości wykorzystanego pasma.



Metody modulacji cyfrowej

- Systemy modulacji z widmem rozproszonym (spread spectrum)
- Metody modulacji z widmem rozproszonym to takie, w których szerokość pasma przesyłanego sygnału jest znacznie większa niż wymagana do przesłania informacji w paśmie podstawowym.
- Zalety metod modulacji z widmem rozproszonym to:
 - utrudnione wykrywanie i rozpoznawanie sygnałów oraz przechwytywanie transmitowanej informacji;
 - wysoka odporność na zakłócenia;
 - możliwa praca wielu użytkowników we wspólnym kanale dla metod wykorzystujących pseudolosowy ciąg rozpraszający (tzw. wielodostęp CDMA).





Metody modulacji cyfrowej

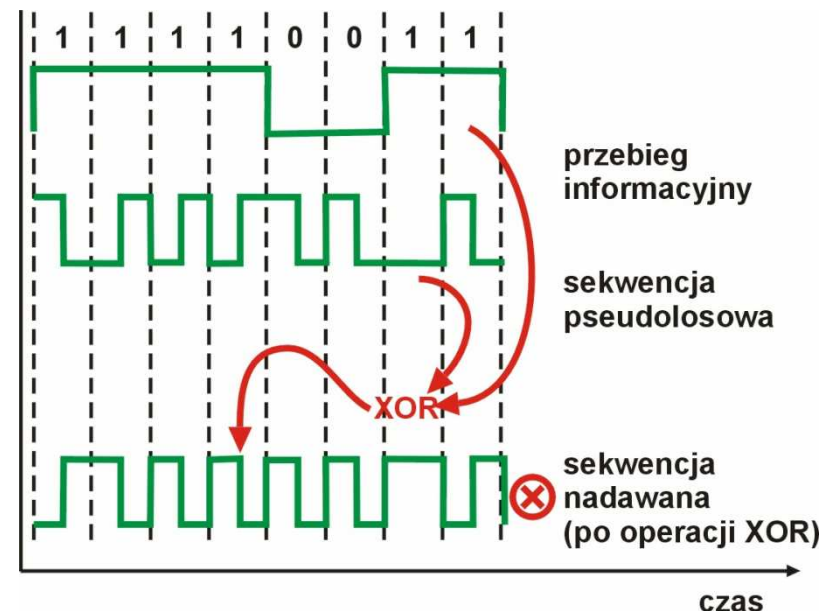
- Systemy modulacji z widmem rozproszonym (spread spectrum)
- Istnieje kilka metod uzyskania sygnału o bardzo szerokim widmie:
 - bezpośrednio kluczkowanie sygnału (DS, direct sequence),
 - przeskoki częstotliwości nośnej (FH, frequency hopping),
 - przeskoki w czasie (TH, time hopping),
 - szerokopasmowa liniowa modulacja częstotliwości (LFM, linear frequency modulation) zwana także metodą chirp lub przemiataniem częstotliwości,
 - modulacja FDM i OFDM (frequency division multiplexing, orthogonal FDM) – modulacja ze zwielokrotnieniem częstotliwości [ortogonalnym].





Metody modulacji cyfrowej

Rozpraszanie widma metodą kluczowania bezpośredniego (DSSS, direct sequence spread spectrum)



Sygnał uzyskuje się w wyniku przemnożenia w modulatorze danych cyfrowych przebiegu informacyjnego $d(t)$ przez dwójkowy ciąg pseudolosowy $k(t)$. Realizuje się to za pomocą funkcji logicznej XOR (exclusive or).



Metody modulacji cyfrowej

Rozpraszanie widma metodą kluczowania bezpośredniego
(DSSS, direct sequence spread spectrum)

Czas trwania bitu t_c ciągu pseudolosowego $k(t)$ jest znacznie krótszy niż czas trwania bitu t_b ciągu danych przebiegu informacyjnego. W wyniku powstaje sygnał $x(t) = d(t) \otimes k(t)$ zmieniający się szybciej niż podstawowy strumień danych, o widmie G -krotnie szerszym niż widmo sygnału $d(t)$, przy czym $G = t_b/t_c$.

Sprawia on wrażenie szumu, gdyż powstał z użyciem ciągu pseudolosowego. W celu zdekodowania tego podobnego do szumu sygnału należy go ponownie przemnożyć przez dokładnie taki sam ciąg pseudolosowy, który był wykorzystany do rozproszenia widma. Dodane słowo „pseudolosowego”





Metody modulacji cyfrowej

Rozpraszanie widma metodą przeskoków częstotliwości (FHSS, frequency hopping spread spectrum)

FHSS - pierwsza z metod rozpraszania widma, opisana w 1940 roku i opatentowana w USA przez Hedy Lamarr (Hedwig Eva Maria Kiesler) oraz George'a Antheil.

W metodzie FHSS pseudolosowy ciąg rozpraszający $k(t)$ wykorzystywany jest do nieustannego zmieniania częstotliwości nadawania (a więc i odbioru).

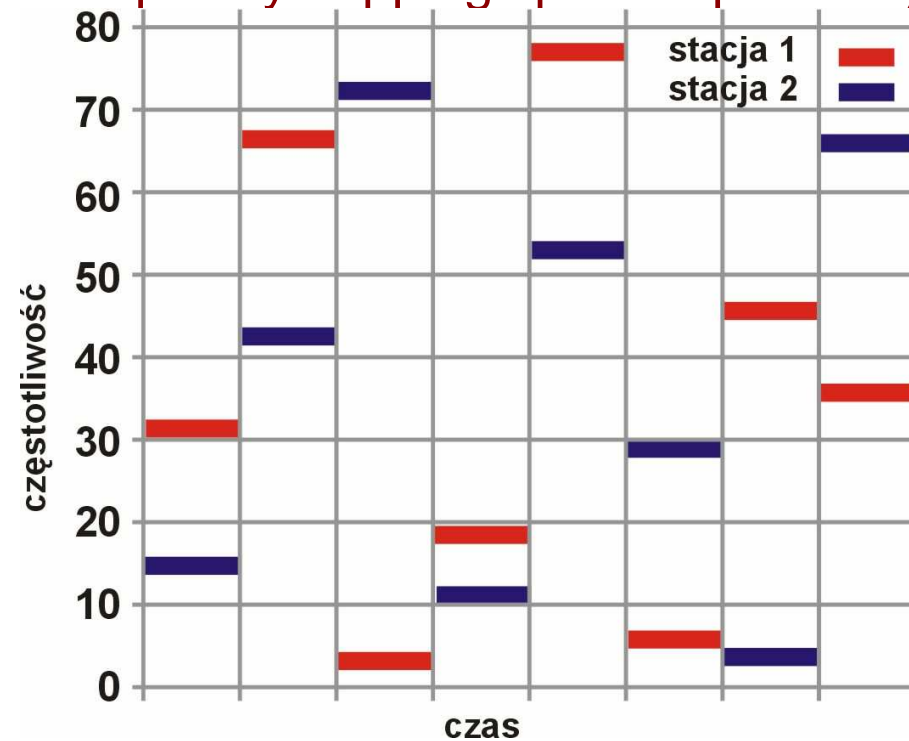
Dane $d(t)$ są przesyłane przez pewien czas na jednym z kanałów częstotliwościowych, który po pewnym czasie „przeskakuje” na inny kanał wybrany przez pseudolosowy ciąg rozpraszający.





Metody modulacji cyfrowej

Rozpraszanie widma metodą przeskoków częstotliwości (FHSS, frequency hopping spread spectrum)



Zasada rozpraszania widma metodą przeskoków częstotliwości.



Metody modulacji cyfrowej

Dla odebrania sygnału FHSS należy znać aktualną częstotliwość nadajników, a więc i pseudolosowy ciąg rozpraszający.

Wyróżnia się dwie odmiany metody przeskoków częstotliwości:

- **metoda szybkich przeskoków**, w której zmiana częstotliwości nośnej następuje wielokrotnie w czasie trwania pojedynczego bitu t_b ciągu danych
- **metoda wolnych przeskoków**, w której zmiana częstotliwości nośnej następuje raz na n bitów ciągu danych $d(t)$ ($n > 1$)

Zaletą systemu FHSS jest mniejsza szybkość pracy generatora ciągu pseudolosowego wymagana do uzyskania tej samej szerokości pasma sygnału radiowego co w przypadku metody DSSS.

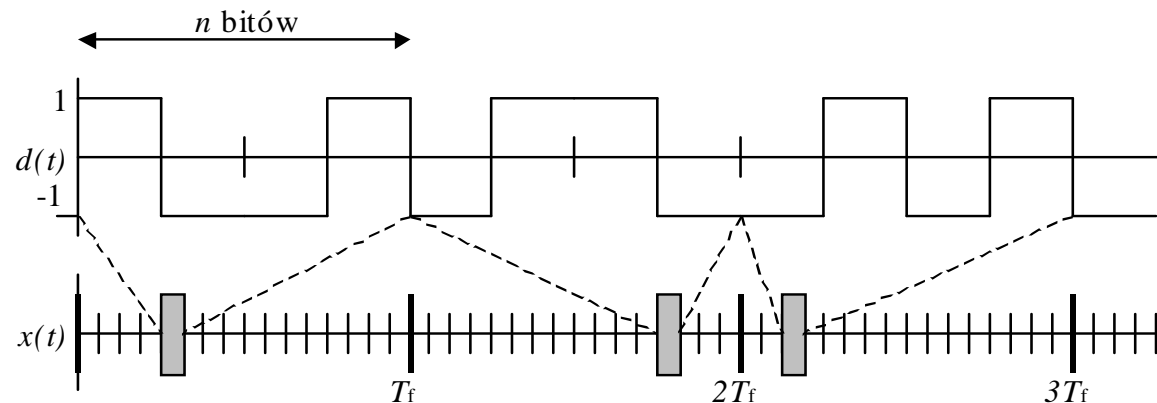
Mechanizm zarządzania skokami częstotliwości jest jednak dość skomplikowany i obniża szybkość transmisji danych w porównaniu z techniką DSSS.



Metody modulacji cyfrowej

Rozpraszanie widma metodą przeskoków w czasie
(THSS, time hopping spread spectrum)

W metodzie THSS przesyłanie ciągu danych cyfrowych $d(t)$ następuje w wybranych losowo momentach czasu. Wybór sterowany jest ciągiem $k(t)$ z generatora pseudolosowego.



Zasada rozpraszania widma metodą przeskoków w czasie



Metody modulacji cyfrowej

- Ciąg danych dzielony jest najpierw na fragmenty n -bitowe. Procedura rozpraszania widma polega na tym, że na osi czasu definiowana jest struktura ramkowa, przy czym każda ramka ma długość T_f .
- Wewnątrz każdej ramki zdefiniowanych jest j szczelin czasowych o długości $T_h = T_f / j$ każda. Cały n -bitowy fragment danych umieszczany jest w i -tej, wybranej pseudolosowo, szczelinie ramki (zamiast w całej ramce), podczas gdy pozostałe szczeliny pozostają wolne.



Metody modulacji cyfrowej

- Rozpraszanie widma metodą LFM (linear frequency modulation)
- W modulacji FDM (frequency division multiplexing), czyli modulacji ze zwielokrotnieniem częstotliwości, dostępna szerokość pasma jest przydzielana wielu częstotliwościom podnośnym.
- W modulatorze na podstawie ciągu bitów danych $d(t)$ generowany jest przebieg piłokształtny. Przyjęto, że bitowi „1” odpowiada impuls narastający, a bitowi „0” brak impulsu. Przebieg piłokształtny steruje następnie generatorem częstotliwości, który jest przestrajany napięciem (VCO, voltage controlled oscillator).
- Na wyjściu układu pojawia się sygnał sinusoidalny o stałej amplitudzie.
- Częstotliwość sygnału wynosi f_0 dla bitu danych o wartości „0” oraz liniowo narasta od f_0 do $f_0 + \Delta f$ dla bitu o wartości „1”.



Metody modulacji cyfrowej

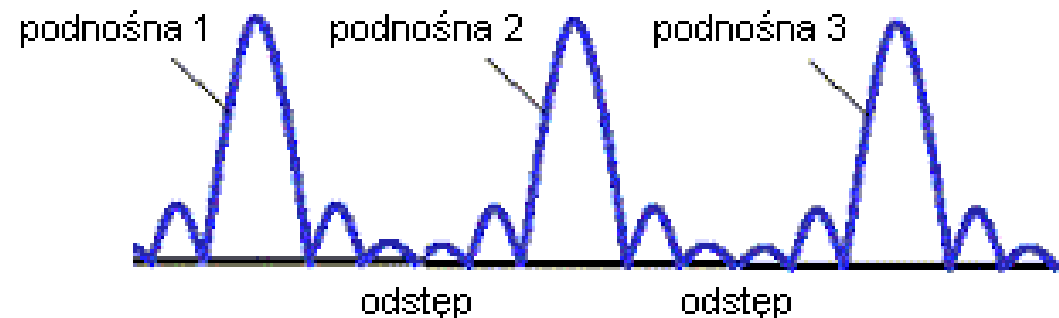
- Rozpraszanie widma metodą LFM (linear frequency modulation)
- Metoda chirp oraz dalej opisane modulacje FDM i OFDM różnią się od trzech wyżej opisanych metod szerokopasmowych tj. DSSS, FHSS i THSS tym, że nie wykorzystują ciągu pseudolosowego do rozpraszania widma przebiegu. Nie jest więc możliwe stosowanie metody wielodostępu kodowego (CDMA) do łącza.
- Metoda chirp stosowana jest głównie w wojskowych systemach radarowych i lokalizacyjnych.



Metody modulacji cyfrowej

Modulacja FDM i OFDM

W modulacji **FDM** (frequency division multiplexing), czyli modulacji ze zwielokrotnieniem częstotliwości, dostępna szerokość pasma jest przydzielana wielu częstotliwościom podnośnym.



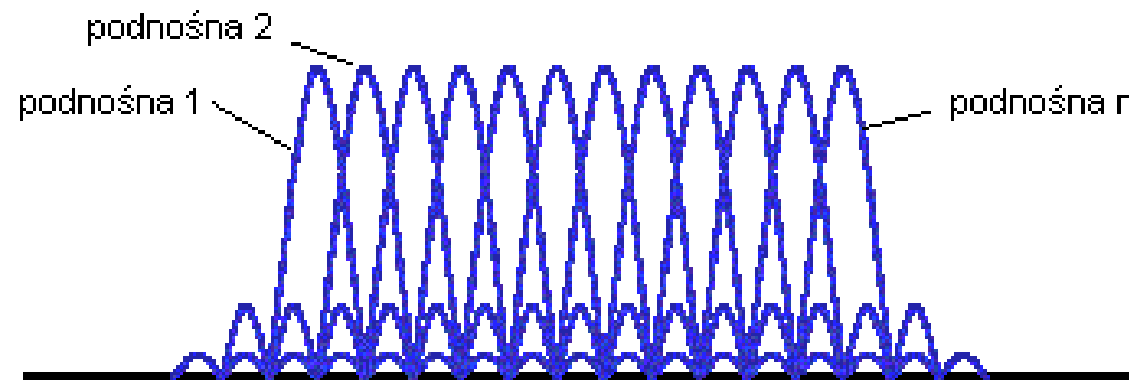
Poszczególne podnośne są przypisywane transmitowanym kanałom danych cyfrowych. Ponieważ każda z podnośnych jest traktowana niezależnie, więc należy umieścić wokół niej odstęp międzykanałowy (odstęp ochronny).



Metody modulacji cyfrowej

Modulacja FDM i OFDM

Modulacja **OFDM** (orthogonal frequency division multiplexing), czyli modulacja z ortogonalnym zwielokrotnieniem częstotliwości wykorzystuje zbiór równo oddalonych od siebie częstotliwości podnośnych, które muszą spełniać warunek ortogonalności.





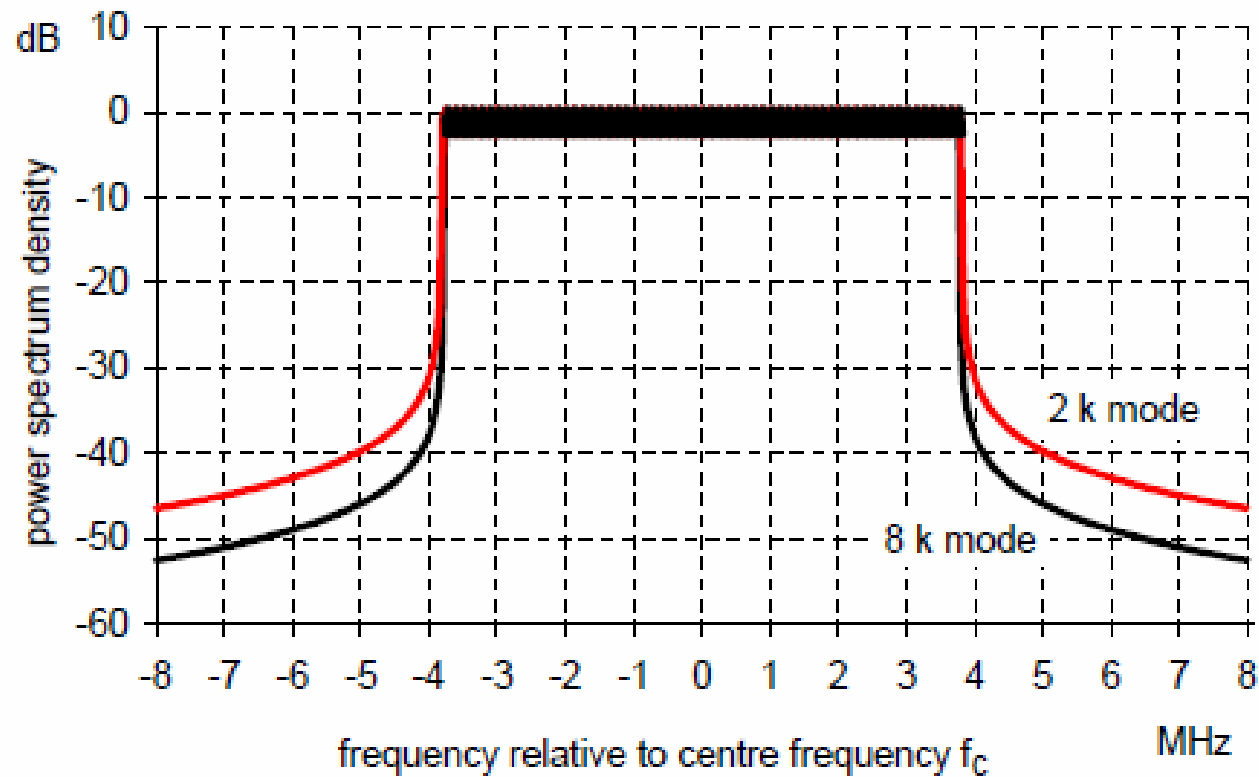
Metody modulacji cyfrowej

- Modulacja FDM i OFDM
- Modulacja **OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), czyli modulacja z ortogonalnym zwielokrotnieniem częstotliwości wykorzystuje zbiór równo oddalonych od siebie częstotliwości podnośnych, które muszą spełniać warunek ortogonalności.
- Warunkiem ortogonalności podnośnych jest, by całka za okres iloczynu dwóch sąsiadujących ze sobą sygnałów podnośnych wynosiła zero.
- Jeśli dwie podnośne są ortogonalne, to widmo częstotliwości jednej z nich posiada zerową wartość natężenia sygnału na środkowej częstotliwości widma sąsiadującej podnośnej.
- Ortogonalne podnośne nie interferują ze sobą, co pozwala na ich rozmieszczenie bez stosowania ochronnych odstępów międzykanałowych.
- Metoda modulacji OFDM jest bardzo efektywna i umożliwia uzyskanie bardzo dużych przepływności w używanym kanale. Wykorzystuje się ją m.in. w sieciach bezprzewodowych IEEE 802.11a/g, 802.16 (WiMAX).





Modulacja OFDM



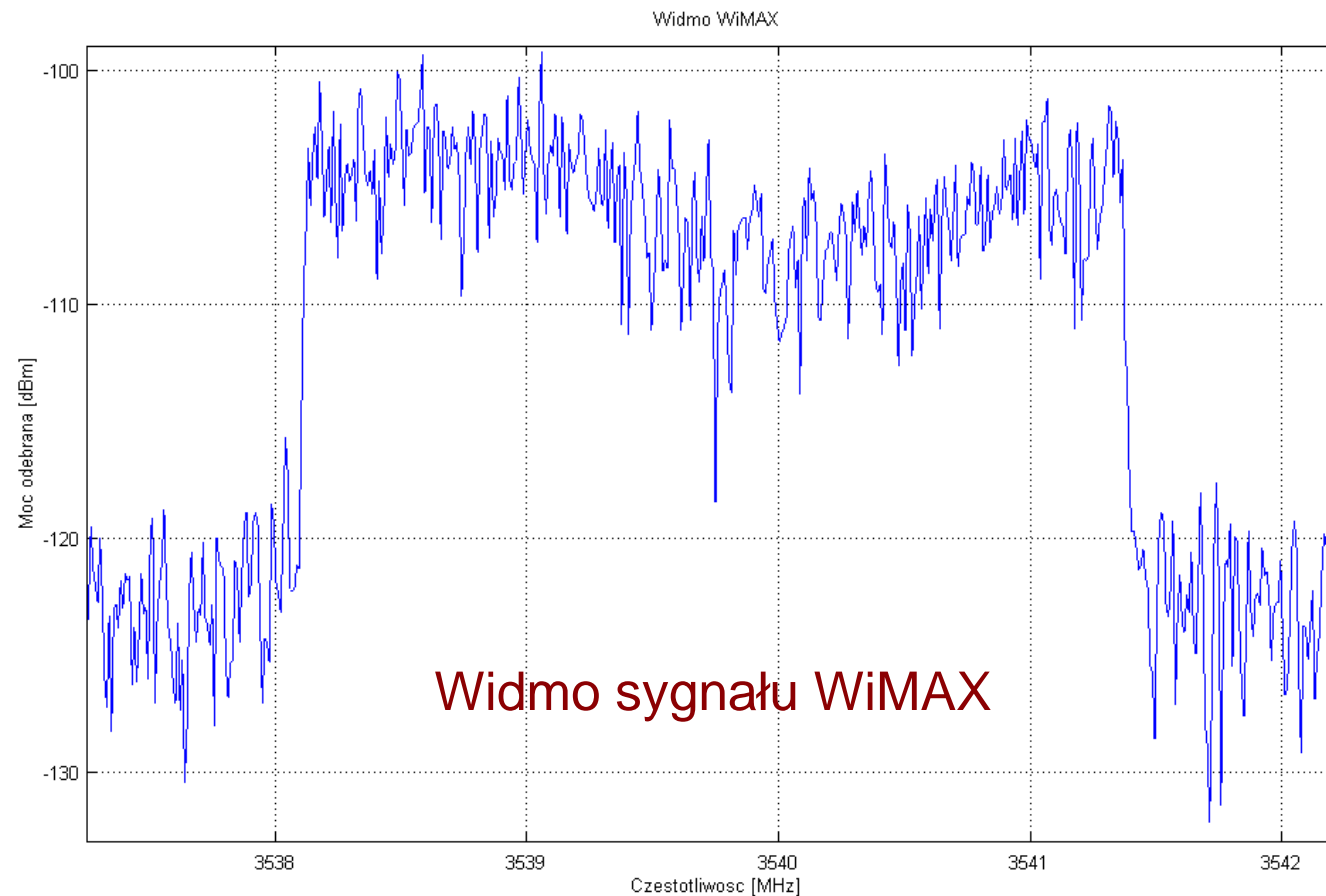
Widmo sygnału DVB-T

ETSI EN 300 744



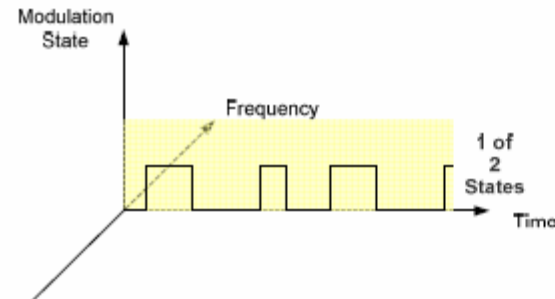


Modulacja OFDM



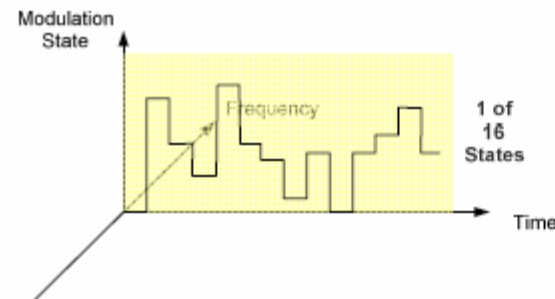


Modulacja OFDM



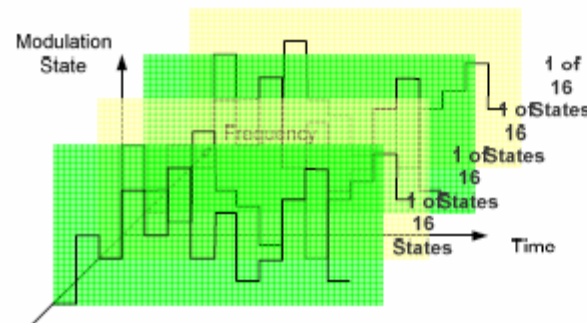
Single carrier
simple modulation
(e.g. ASK)

1 bit at a time



Single Carrier
Complex Modulation
(e.g. 16QAM)

4 bits at a time



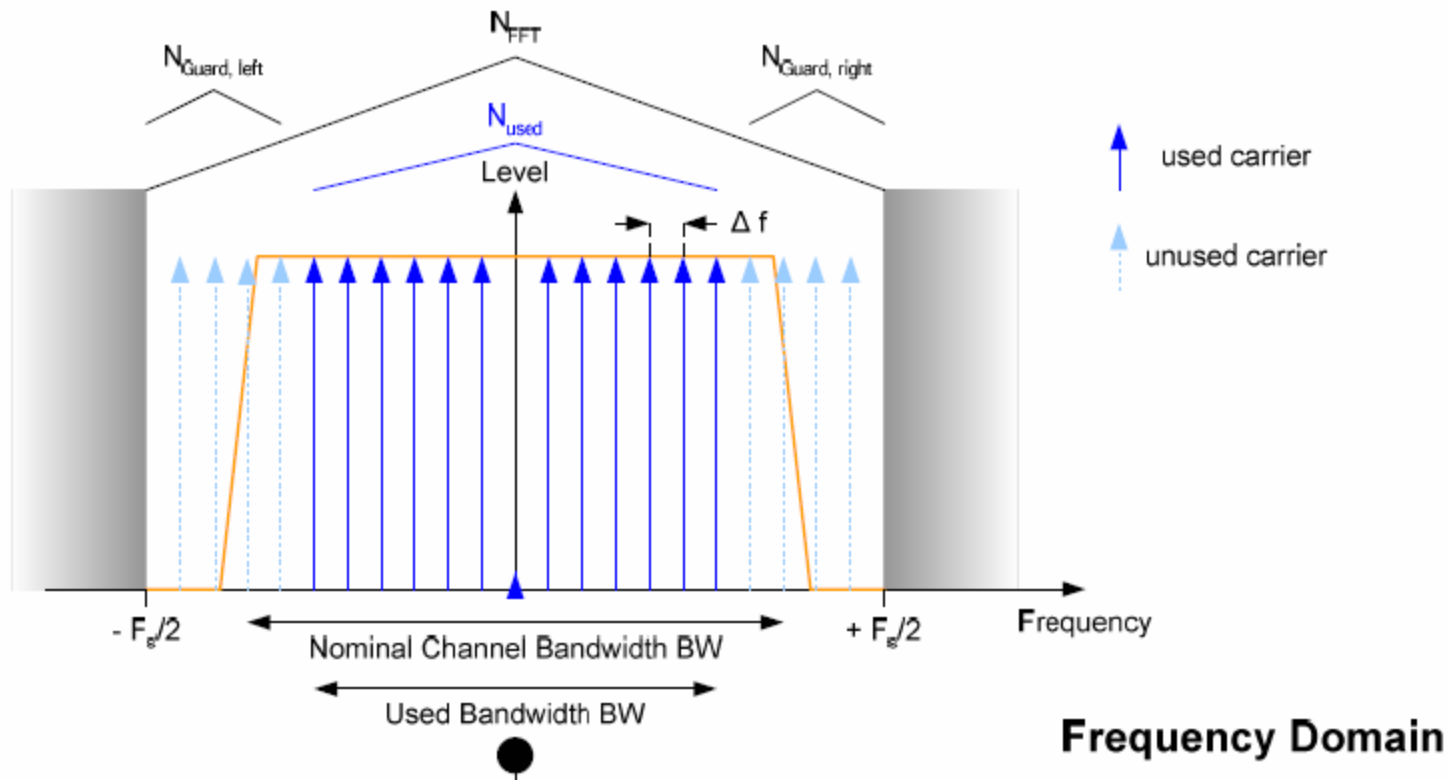
Multicarrier
complex modulation
(e.g. four carrier 16QAM)

16 bits at a time



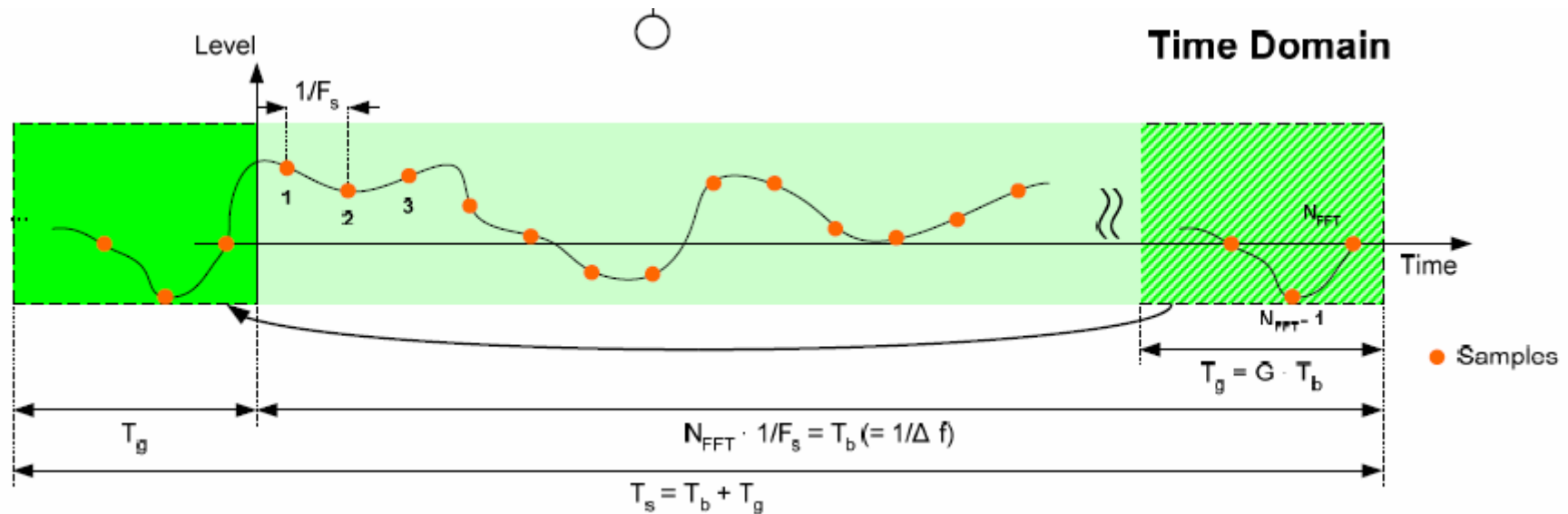


Modulacja OFDM

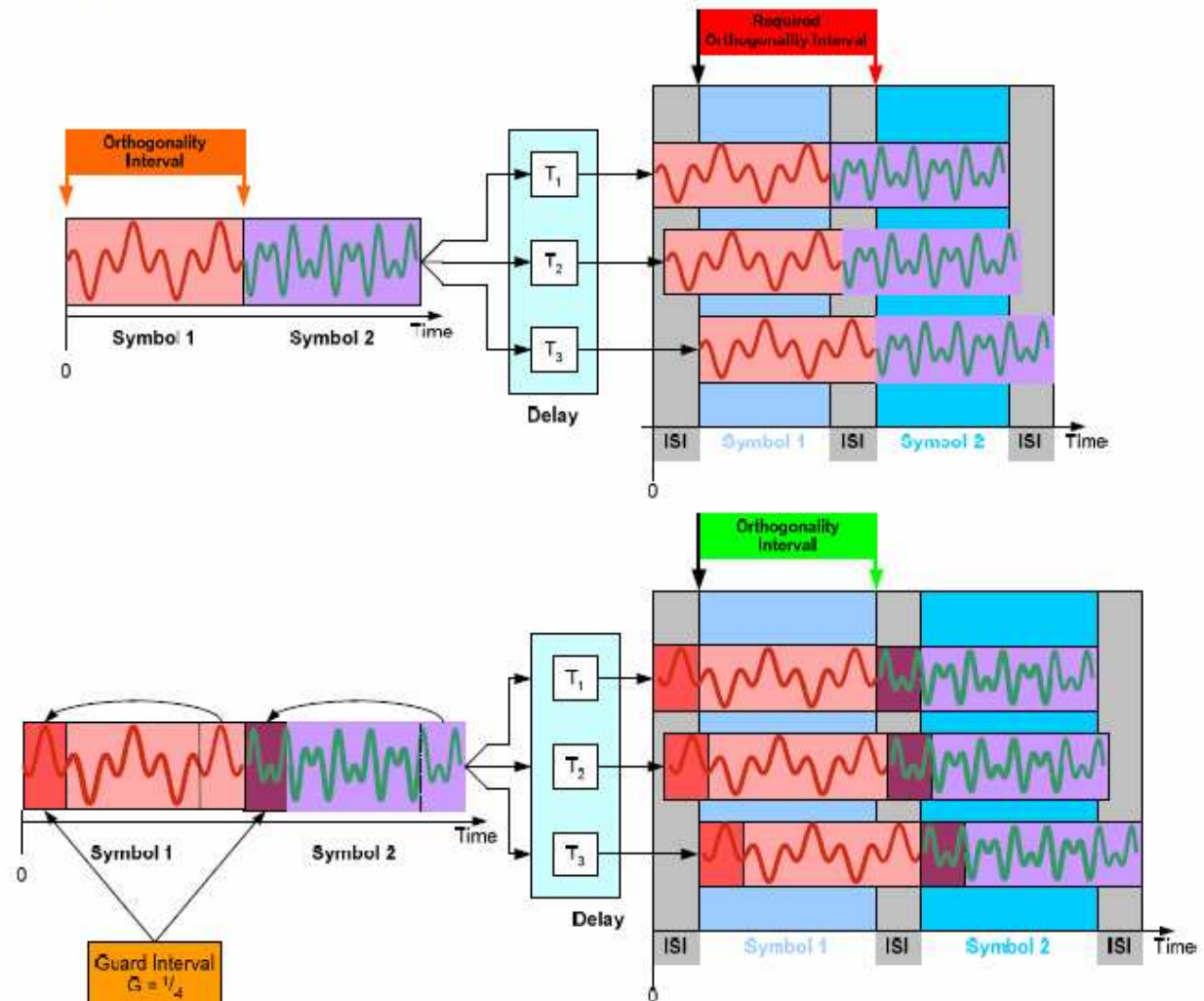




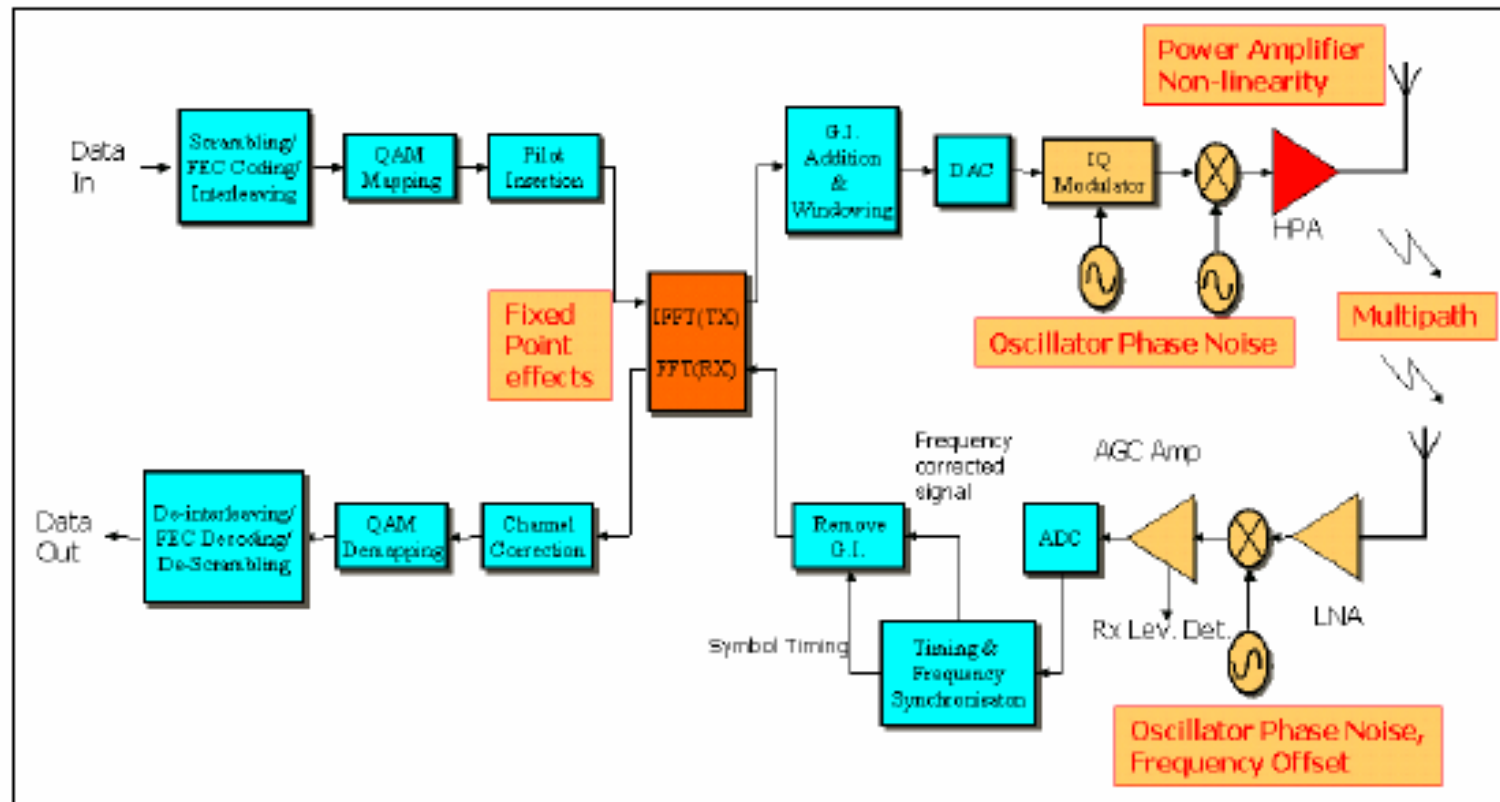
Modulacja OFDM



Modulacja OFDM

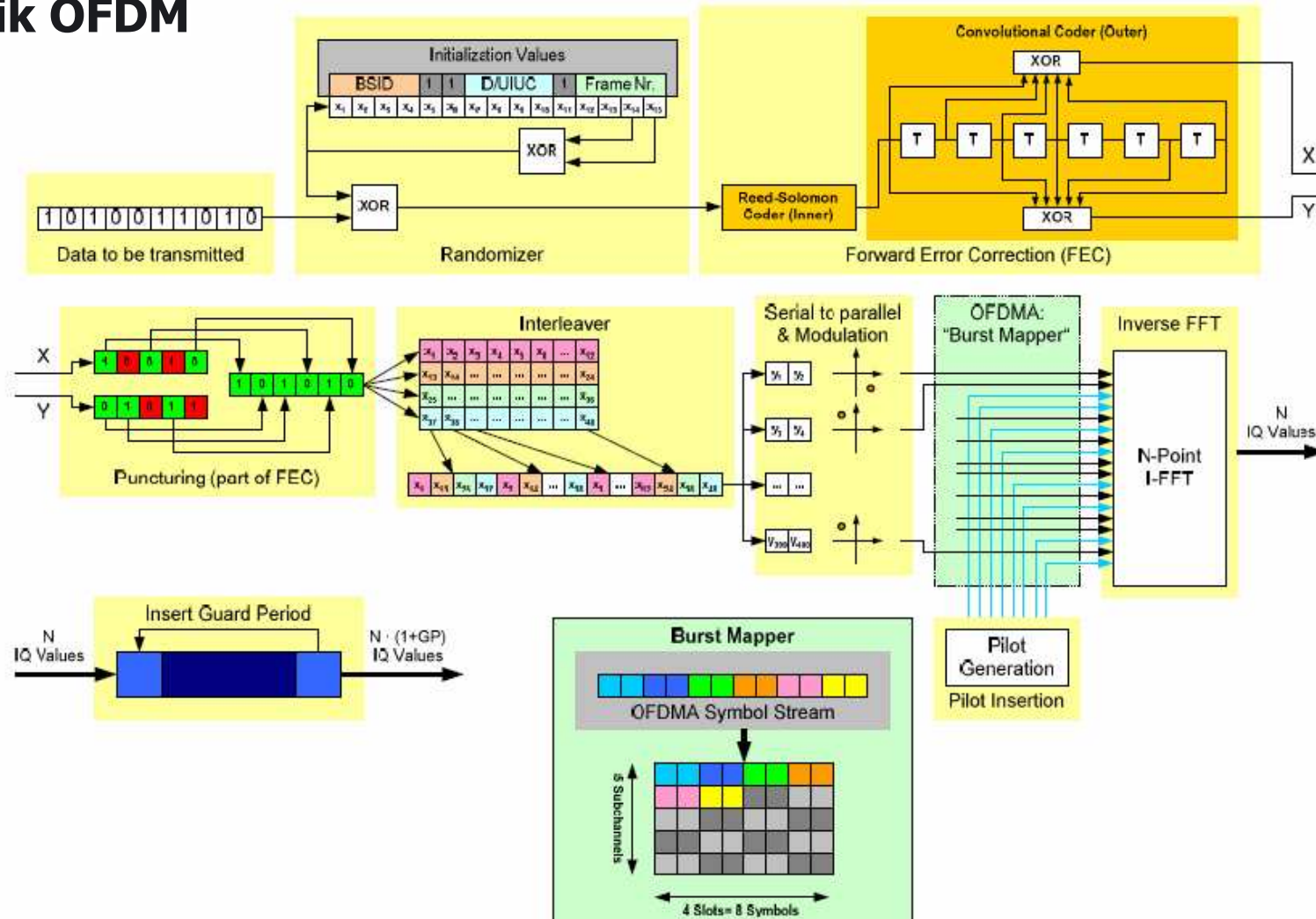


Nadajnik OFDM





Nadajnik OFDM





KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Prezentacja multimedialna współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Metody modulacji cyfrowej

- Wybór metody modulacji
- Fundamentalne ograniczenia szybkości transmisji narzucają:
 - stosunek sygnał/szum (odstęp sygnału od szumu)
 - dostępna szerokość pasma częstotliwości





Metody modulacji cyfrowej

Odstęp sygnału od szumu

Odstęp sygnału od szumu (signal-to-noise ratio, SNR) opisuje o ile razy moc sygnału użytecznego P_s jest większa od mocy zakłóceń (szumu) P_n . Parametr ten wyrażany jest w decybelach (dB).

$$\text{SNR} = 10 \log \frac{P_s}{P_n}$$



Metody modulacji cyfrowej

- **Szybkość modulacji** (transmisji) czyli, **baud rate** jest miarą liczby symboli wysyłanych w czasie sekundy, czyli wyrażona w bodach częstość modulacji podnośnej używanej do transmisji danych.
- Jednostką szybkości modulacji jest **bod** (ang. **baud**) oznaczający jedną zmianę kształtu sygnału w ciągu sekundy.
- Nazwa jednostki „bod” pochodzi od nazwiska francuskiego inżyniera Emila Baudota twórcy telegrafu z klawiaturą alfanumeryczną.



Metody modulacji cyfrowej

- **Przepływność** (ang. capacity, data rate) określa szybkość przesyłania informacji cyfrowej w kanale transmisyjnym.
- Jednostką przepływności jest bit/s (ang. bps). Większymi jednostkami są:
 - kbit/s (10^3 bitów na sekundę) - kilobity na sekundę,
 - Mbit/s (10^6 bitów na sekundę) - megabity na sekundę,
 - Gbit/s (10^9 bitów na sekundę) - gigabity na sekundę,
 - Tbit/s (10^{12} bitów na sekundę) - terabity na sekundę,
 - Pbit/s (10^{15} bitów na sekundę) - petabity na sekundę.



Metody modulacji cyfrowej

skrętka (kat. 5)	100 Mbit/s, 100m
kabel koncentryczny 50 Ω	100 Mbit/s, 200m
światłowód wielomodowy	100 Mbit/s, 2 km
światłowód jednomodowy	2.4 Gbit/s, 40 km
linia telefoniczna cyfrowa	1.5 Mbit/s, 5 km
linia telefoniczna analogowa	56 kbit/s, 10 km
łącze radiowe (LAN)	54 Mbit/s, 100m
łącze radiowe (WAN)	2 Mbit/s, 5 km
łącze optyczne (FSO)	2,5 Gbit/s, 200 m

Przepływności przykładowych mediów transmisyjnych





Metody modulacji cyfrowej

Prawo Nyquista

Zgodnie z prawem Nyquista dla kanałów idealnych (bez szumu) przepływność C kanału jest opisana wzorem:

$$C = 2 \cdot B \cdot \log_2 (M) \text{ [bit/s]}$$

B – szerokość pasma częstotliwości w kanale w Hz

M – ilość dyskretnych poziomów sygnału
(transmisja binarna = dwa poziomy, 0 i 1)





Metody modulacji cyfrowej

- Przykład 1

- dla sygnału podnośnej o $B = 20000$ Hz, na której dane są kodowane metodą 4-FSK (z 4 poziomami) przepływność wynosi:
- $C = 2 \cdot 20000 \cdot \log_2 (4) = 80000$ [bit/s]

- Przykład 2

- dla standardowej linii telefonicznej o paśmie $B = 3100$ Hz przy 8-wartościowej metodzie modulacji przepływność wynosi:
- $C = 2 \cdot 3100 \cdot \log_2 (8) = 18600$ [bit/s]

- Przykład 3

- w szerokopasmowej metodzie modulacji o $B = 100000$ Hz, przy 256-wartościowej metodzie modulacji 256QAM uzyskamy przepływność:
- $C = 2 \cdot 100000 \cdot \log_2 (256) = 1,6$ [Mbit/s]





Metody modulacji cyfrowej

Prawo Shannona

Prawo Shannona-Hartleya definiuje maksymalną przepływność kanału C_{max} w zależności od B – szerokości pasma kanału i SNR – odstępu sygnału od szumu (wyrażonego nie w dB, a w mierze liniowej):

$$C_{max} = B \cdot \log_2 (1 + \text{SNR})$$

B – szerokość pasma częstotliwości w kanale w Hz

SNR – odstęp sygnału od szumu





Metody modulacji cyfrowej

Przykład 1

w szerokopasmowej metodzie modulacji o $B = 100000$ Hz, przy 256-wartościowej metodzie modulacji 256QAM i przy 10 dB (równy 10 razy także w mierze liniowej) odstępie sygnału od szumu uzyskamy przepływność:

$$C_{\max} = 100000 \cdot \log_2 (1 + 10) = 346 \text{ [kbit/s]}$$

Przykład 2

w szerokopasmowej metodzie modulacji o $B = 100000$ Hz, przy 256-wartościowej metodzie modulacji 256QAM i przy 40 dB (równy 10000 razy w mierze liniowej) odstępie sygnału od szumu uzyskamy przepływność:

$$C_{\max} = 100000 \cdot \log_2 (1 + 10000) = 1,33 \text{ [Mbit/s]}$$



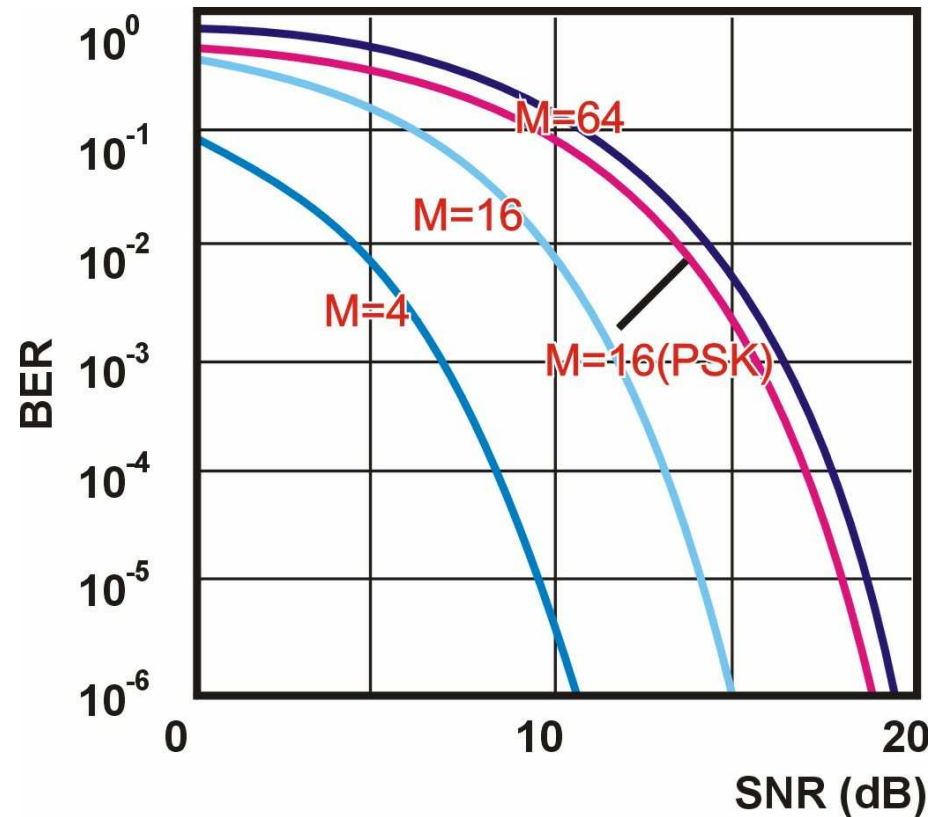


Metody modulacji cyfrowej

- **Bitowa stopa błędu** (ang. bit error rate, BER) określana jest jako prawdopodobieństwo przekłamania pojedynczego bitu podczas transmisji:
 - $BER = \text{ilość bitów odebranych błędnie} / \text{ilość bitów nadanych}$
- Zwykle wartości BER wynoszą $10^{-6} \div 10^{-9}$ (w zależności od zastosowań). Oprócz bitowej stopy błędu, zwanej też czasem elementową, definiuje się blokową stopę błędów, dotyczącą bloków bitów.



Metody modulacji cyfrowej



Zależność bitowej stopy błędów od stosunku sygnału do szumu dla wielowartościowych modulacji M-PSK



Metody modulacji cyfrowej

- **Sprawność energetyczna** η_p określa jaka wartość mocy odbieranego sygnału jest potrzebna dla uzyskania określonego współczynnika bitowej stopy błędów BER (jest ona odwrotnie proporcjonalna do BER).
- Ze wzrostem współczynnika BER maleje wartość η_p , ponieważ energia jest wtedy wykorzystywana do transmitowania większej ilości błędnych bitów.





Metody modulacji cyfrowej

Skuteczność wykorzystania widma (lub skuteczność spektralna)

η_B jest definiowana jako stosunek przepływności C do szerokości pasma B kanału transmisyjnego

$$\eta_B = \frac{C}{B} = 2 \cdot \log_2 M \quad [b / s / Hz]$$

gdzie: M jest ilością dyskretnych poziomów sygnału.

Maksymalna do osiągnięcia skuteczność wykorzystania widma jest ograniczona szumami występującymi w kanale poprzez współczynnik SNR

$$\eta_{B \max} = \frac{C_{\max}}{B} = \log_2 (1 + SNR) \quad [b / s / Hz]$$





Metody modulacji cyfrowej

Miarą jakości systemów modulacji z widmem rozproszonym jest **zysk przetwarzania** G , podawany w dB i informujący w jakim stopniu stosunek sygnał/szum (SNR) na wyjściu układu SNR_{wy} poprawił się w stosunku do wartości sygnał/szum na jego wejściu SNR_{we} :

$$G \text{ [dB]} = SNR_{wy}/SNR_{we}$$

Dla systemów z rozpraszaniem widma wartość zysku przetwarzania równa się stosunkowi szerokości pasma rozproszonego sygnału w kanale radiowym B_{ss} [Hz] do szerokości pasma sygnału informacyjnego B [Hz].

$$G = B_{ss}/B$$





Podsumowanie

- Dla osiągnięcia dużej przepływności łączy zamiast tradycyjnych, binarnych metod modulacji stosuje się metody wielowartościowe.
- Dość efektywne metody QPSK wymagają jednak liniowych wzmacniaczy mocy.
- Często wykorzystywaną techniką modulacji jest GMSK, gdyż jest bardzo efektywna i nie wymaga stosowania liniowych wzmacniaczy.
- Wielowartościowe metody modulacji o dużych ilościach poziomów podnośnej M zapewniają duże przepływności, ale są bardzo wrażliwe na zakłócenia i interferencje.
- Metody modulacji z widmem rozproszonym są bardzo odporne na zakłócenia i zapewniają wysoki stopień zabezpieczenia transmisji przed nieupoważnionym dostępem.



Piotr Korbel

Bezprzewodowe sieci telekomunikacyjne

Modulacje cyfrowe w systemach łączności bezprzewodowej

Zadanie nr 14 – Studia podyplomowe „Bezprzewodowe systemy nadzoru i monitorowania”



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Prezentacja multimedialna
współfinansowana przez Unię Europejską
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego
w projekcie

*„Innowacyjna dydaktyka bez ograniczeń
– zintegrowany rozwój Politechniki Łódzkiej –
zarządzanie Uczelnią,
nowoczesna oferta edukacyjna
i wzmacniania zdolności do zatrudniania
osób niepełnosprawnych”*



Politechnika Łódzka
Instytut Elektroniki

90-924 Łódź, ul. Żeromskiego 116,
tel. 042 631 28 83
www.kapitalludzki.p.lodz.pl