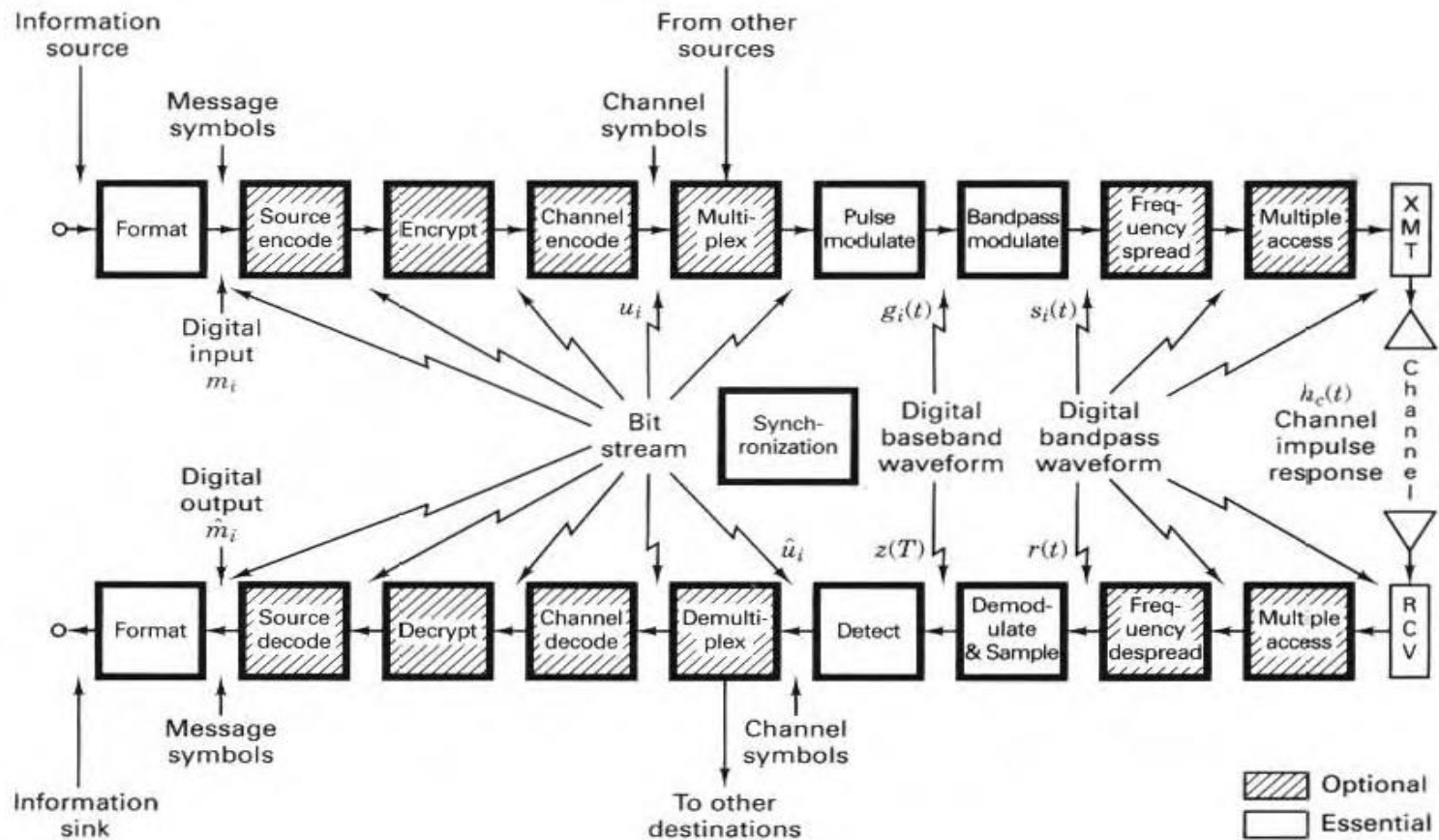




**Technika Radia Programowalnego
laboratorium –
wprowadzenie teoretyczne**



Modulacja BASK

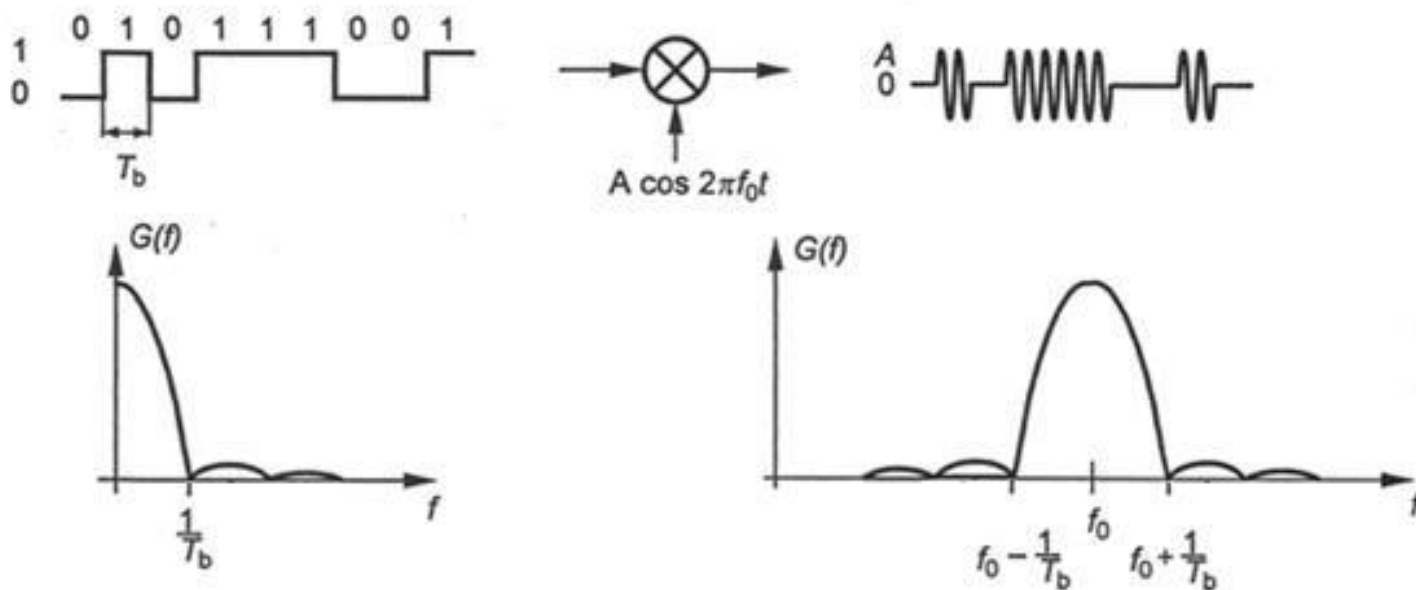
Modulacja cyfrowa BASK (z ang. *Binary Amplitude Shift Keying*) jest binarną modulacją amplitudy sygnału nośnego. Określenie „binarna” oznacza, że amplituda sygnału nośnego może przybierać jedynie dwie wartości A_1 i A_0 (wyższą i niższą) odpowiadające wartościom logicznym „1” i „0”. Impulsowy sygnał zmodulowany ma postać:

$$s(t) = \begin{cases} A_0 g(t) \cos \omega_n t & \text{dla wartości logicznej 0} \\ A_1 g(t) \cos \omega_n t & \text{dla wartości logicznej 1} \end{cases}$$

gdzie sygnał $g(t)$ jest to sygnał impulsowy o czasie trwania odpowiadającemu czasowi trwania bitu T_b :

$$g(t) = \begin{cases} 1 & \text{dla } 0 \leq t \leq T_b \\ 0 & \text{dla pozostałych} \end{cases}$$

Przykład takiej modulacji dla $A_0=0$ (modulacja OOK – *on-off keyed*) przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1 Modulacja BASK: sygnał modulujący, zmodulowany oraz ich widma.

Modulacja BFSK

Modulacja cyfrowa BFSK (z ang. *Binary Frequency Shift Keying*) polega na przyporządkowaniu elementom logicznym „1” i „0” impulsów fali nośnej o częstotliwości odpowiednio f_0 i f_1 . Sygnał zmodulowany można przedstawić w postaci:

$$s(t) = \begin{cases} Ag(t)\cos 2\pi f_0 t & \text{dla wartości logicznej 0} \\ Ag(t)\cos 2\pi f_1 t & \text{dla wartości logicznej 1} \end{cases}$$

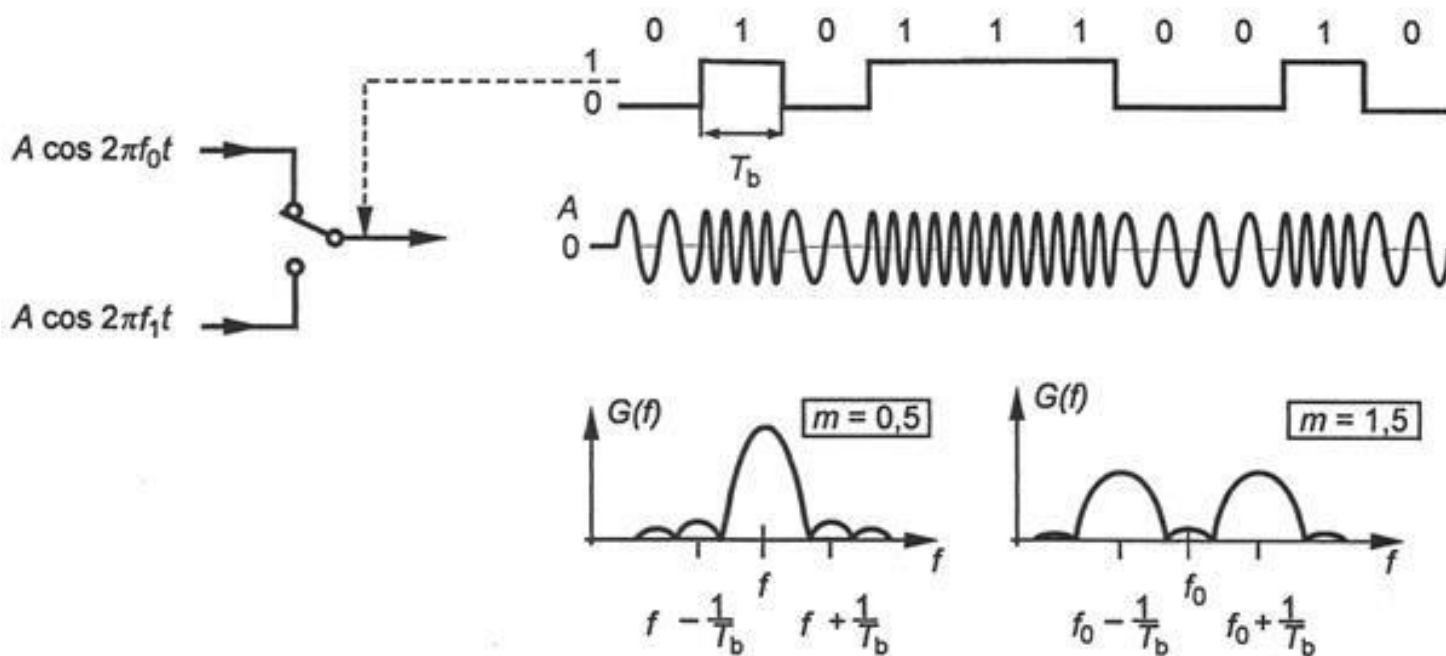
Parametrami modulacji BFSK są częstotliwość środkowa f_{sr} oraz dewiacja częstotliwości Δf , opisane wzorem:

$$f_{sr} = \frac{f_1 + f_0}{2} \quad \text{oraz} \quad \Delta f = \frac{f_1 - f_0}{2}$$

Wskaźnik modulacji m :

$$m = \frac{f_1 - f_0}{R_m}$$

Rysunek 2 przedstawia przykład modulacji BFSK oraz widmo modulacji dla dwóch różnych wartości wskaźnika modulacji. Jak można zauważyć kształt widma sygnału zmodulowanego zależy przede wszystkim od wskaźnika modulacji.



Rysunek 2 Modulacja BFSK.

Modulacja BPSK

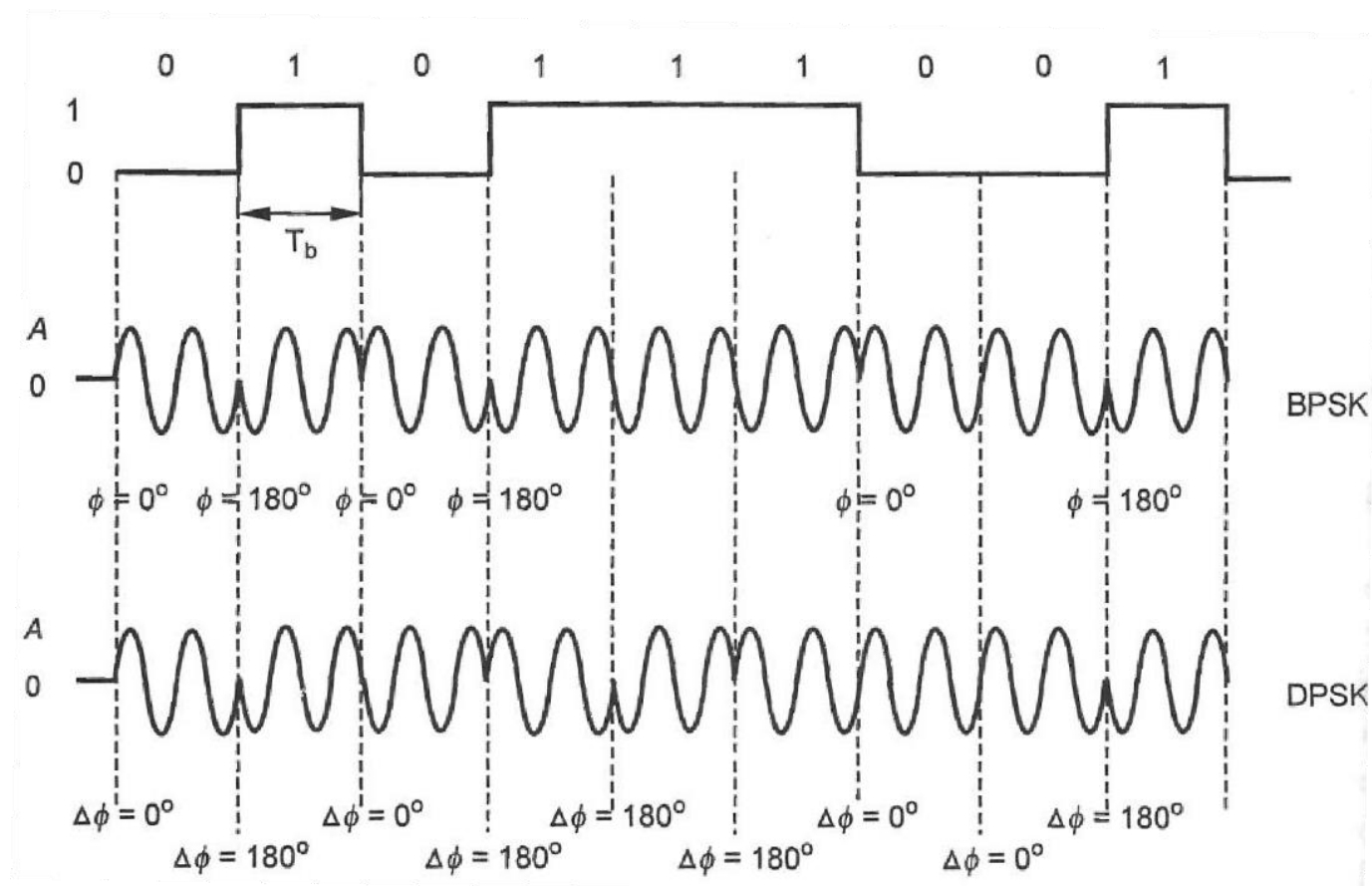
Modulacja BPSK (z ang. *Binary Phase Shift Keying*) podobnie jak poprzednie modulacje cyfrowe jest modulacją binarną. Jednak w przypadku tej modulacji elementom logicznym „1” i „0” przyporządkowywane są impulsy fali nośnej o stałej amplitudzie i częstotliwości oraz zmiennej fazach ϕ_0 i ϕ_1 . Sygnał taki można przedstawić jako:

$$s(t) = \begin{cases} Ag(t)\cos(2\pi ft + \phi_0) & \text{dla wartości logicznej 0} \\ Ag(t)\cos(2\pi ft + \phi_1) & \text{dla wartości logicznej 1} \end{cases}$$

Aby zapewnić najlepszą jakość modulacji, sygnały dla elementu logicznego **1** i **0** powinny się od siebie jak najbardziej różnić. Warunek ten jest osiągnięty gdy obie fazy różnią się od siebie o π radianów (np. $\phi_0 = 0^\circ$ i $\phi_1 = 180^\circ$).

Poprawny odbiór sygnałów BPSK wymaga znajomości fazy początkowej niezmodulowanej fali nośnej.

Niejednoznaczność fazy początkowej może prowadzić do błędnej interpretacji informacji. Problemu tego pozbawiona jest różnicowa modulacja z kluczowaniem fazy DPSK (z ang.: *Differential Phase Shift Keying*), w której informacja binarna jest odwzorowana przez różnicę faz pomiędzy poszczególnymi impulsami sygnału nośnego. Przykład modulacji BPSK i DPSK tego samego sygnału użytkowego przedstawiono na rysunku 3.



Rysunek 3 Modulacja BPSK oraz poniżej DPSK dla tego samego sygnału modulującego

Modulacja QAM

W przeciwieństwie do modulacji binarnych modulacja QAM jest modulacją mieszaną wielowartościową. Modulacje mieszane to grupa modulacji, w których zmieniana jest jednocześnie wartość więcej niż jednego parametru sygnału modulującego. Natomiast wielowartościowość oznacza modulację, w której jeden impuls sygnału zmodulowanego może zawierać w sobie więcej niż dwie wartości. Modulacja QAM jest modulacją jednocześnie amplitudy i fazy. Należy do grupy modulacji AM-PM. Ogólny wzór na zapis sygnał zmodulowany można wyrazić za pomocą wzoru:

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

Sygnał ten można przedstawić w formie:

$$s(t) = s_I(t)\cos(2\pi f_0 t) + s_Q(t)\sin(2\pi f_0 t)$$

gdzie: obwiednia chwilowa $A(t)$ i faza chwilowa $\phi(t)$ są wyrażone wzorami:

$$A(t) = \sqrt{s_I^2 + s_Q^2} \quad \text{oraz} \quad \phi(t) = \arctg \frac{s_Q(t)}{s_I(t)}$$

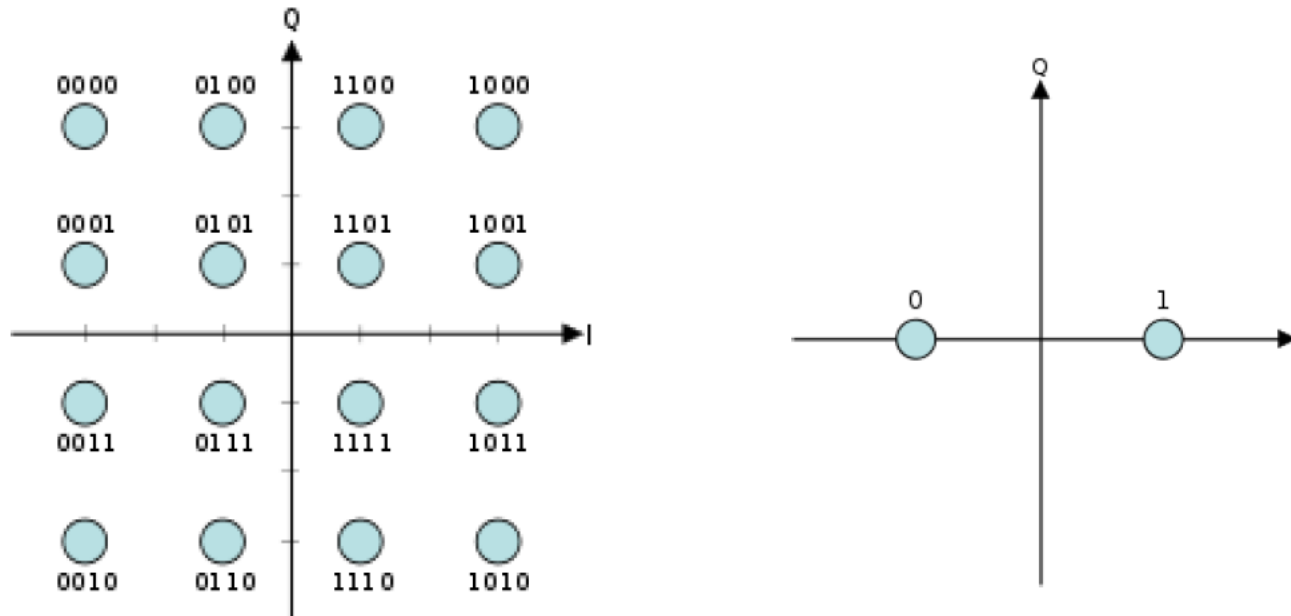
Składowa $s_I(t)$ nazywana jest składową synfazową, natomiast składowa $s_Q(t)$ nazywana jest składową kwadraturową sygnału $s(t)$. Z równania tego wynika, że sygnał zmodulowany można wytworzyć przy pomocy dwóch modulacji amplitudowych wykorzystujących odpowiednio kosinusoidalną i sinusoidalną falę nośną.

Danej wejściowej w koderze są dzielone na N elementów (bitów), które są następnie przekształcane na jedną z $2^N = M$ możliwych par elementów (i, q) . I tak wyróżniamy modulację 16-QAM dla $N=4$, 32-QAM dla $N=5$, 64-QAM dla $N=6$ itd.

Konstelacja sygnałowa

Konstelacja sygnałowa w modulacjach cyfrowych jest graficznym sposobem przedstawienia sygnałów odpowiadających poszczególnym wartościom elementów logicznych (sygnałów wzorcowych) na płaszczyźnie zespolonej. Dla większości modulacji cyfrowych, poza modulacjami częstotliwości, sygnały wzorcowe są sygnałami sinusoidalnymi o częstotliwości równej częstotliwości fali nośnej. Analogicznie do elektrycznych wykresów wskazowych możemy przedstawić amplitudę i fazę sygnału wzorcowego w postaci punktu na płaszczyźnie zespolonej. I tak dla modulacji BPSK wyróżnić możemy dwa sygnały wzorcowe o amplitudzie 1 i fazie odpowiednio 0° i 180° (rysunek 4 po prawej stronie). Dla modulacji 16-QAM i 32-QAM wyróżniamy odpowiednio 16 i 32 sygnały wzorcowe.

Konstelacja sygnałowa zawiera odpowiednio 16 i 32 punkty, przy czym rozkład tych punktów może być prostokątny lub kołowy (rysunek 4 po lewej).

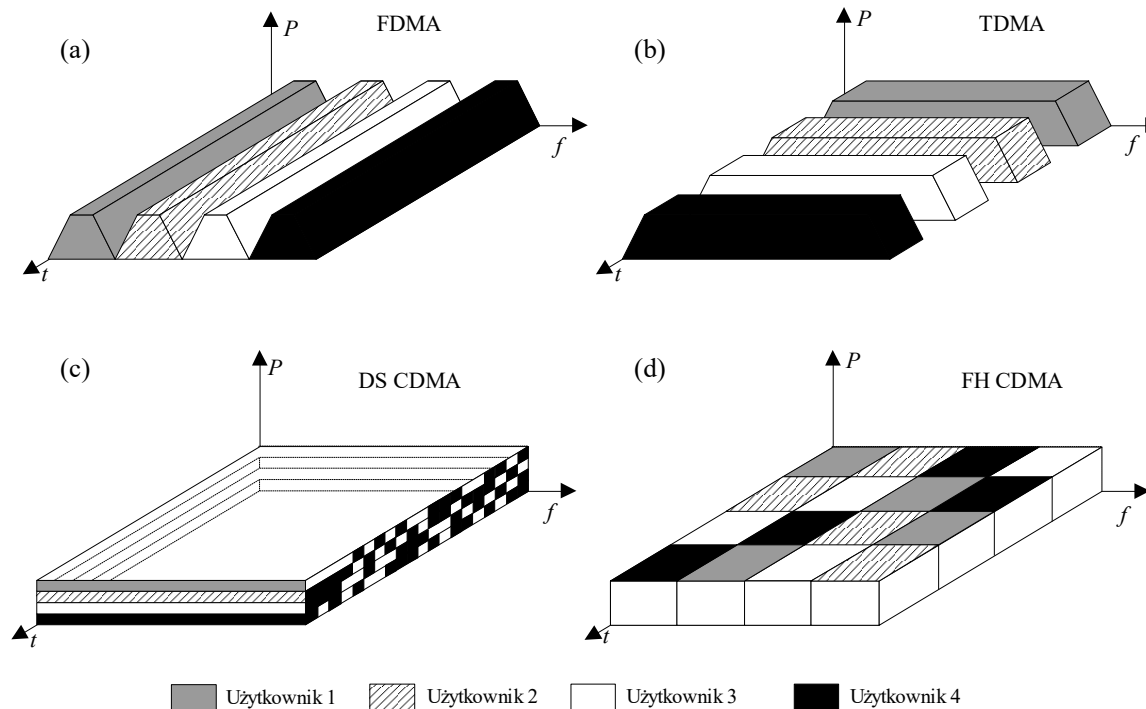


Rysunek 4 Konstelacja sygnałów: po lewej dla modulacji 16-QAM po prawej BPSK


Metody wspólnego użytkowania kanału radiowego

Podstawowe metody wspólnego użytkowania kanału radiowego są możliwe przez:

- podział częstotliwości tj. podział pasma kanału na **niezależne** podpasma (**F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess (FDMA))
- podział czasu tj. cykliczny przydział całego pasma kanału sygnałom cyfrowym kolejnych użytkowników w kolejnych, tj. **niezależnych** ramkach czasowych (**T**ime **D**ivision **M**ultiple **A**ccess (TDMA))
- podział kodowy tj. równoczesne niezależne przekazywanie sygnałów cyfrowych różnych użytkowników w oparciu o przyporządkowane im **niezależne** ciągi binarne (**C**ode **D**ivision **M**ultiple **A**ccess (CDMA))



Ilustracja metod wspólnego użytkowania kanału

- (a) System z podziałem częstotliwościowym. (b) System z podziałem czasowym
 (c) System z podziałem kodowo-czasowym: oznaczenie  - elementy ciągu binarnego rozpraszającego widmo.
 (d) System z podziałem kodowo-częstotliwościowym: oznaczenie: prostokąty na płaszczyźnie (f,t) o jednakowym zaciemnieniu lub białe określają podzakresy częstotliwości wybierane kolejno w czasie przez ciąg binarny rozpraszający widmo sygnałów odpowiedniego użytkownika. P - moc sygnału.

Wielodostęp z podziałem kodowym (z rozpraszaniem widma sygnałów - **S**pread **S**pectrum **M**ultiple **A**ccess (SSMA)) umożliwia więc równoczesne użytkowanie tego samego kanału w tym samym czasie, przy czym:

- sygnał użyteczny zajmuje pasmo częstotliwości na ogół wielokrotnie szersze, niż jest ono niezbędne do przesłania wiadomości (ciągu informacyjnego)
- rozszerzenie pasma (rozproszenie widma) sygnału użytecznego powstaje wskutek zastosowania niezależnych ciągów binarnych do ciągów informacyjnych różnych użytkowników
- odbiór synchroniczny z nadawanym (rozpraszającym) ciągiem binarnym jest niezbędny do skupienia widma sygnału użytecznego w odbiorniku i odtworzenia nadawanego ciągu informacyjnego.

Zastosowanie tego samego ciągu binarnego w nadajniku i odbiorniku do ciągu informacyjnego danego użytkownika umożliwia odtwarzanie przesyłanej informacji w odbiorniku, jeśli:

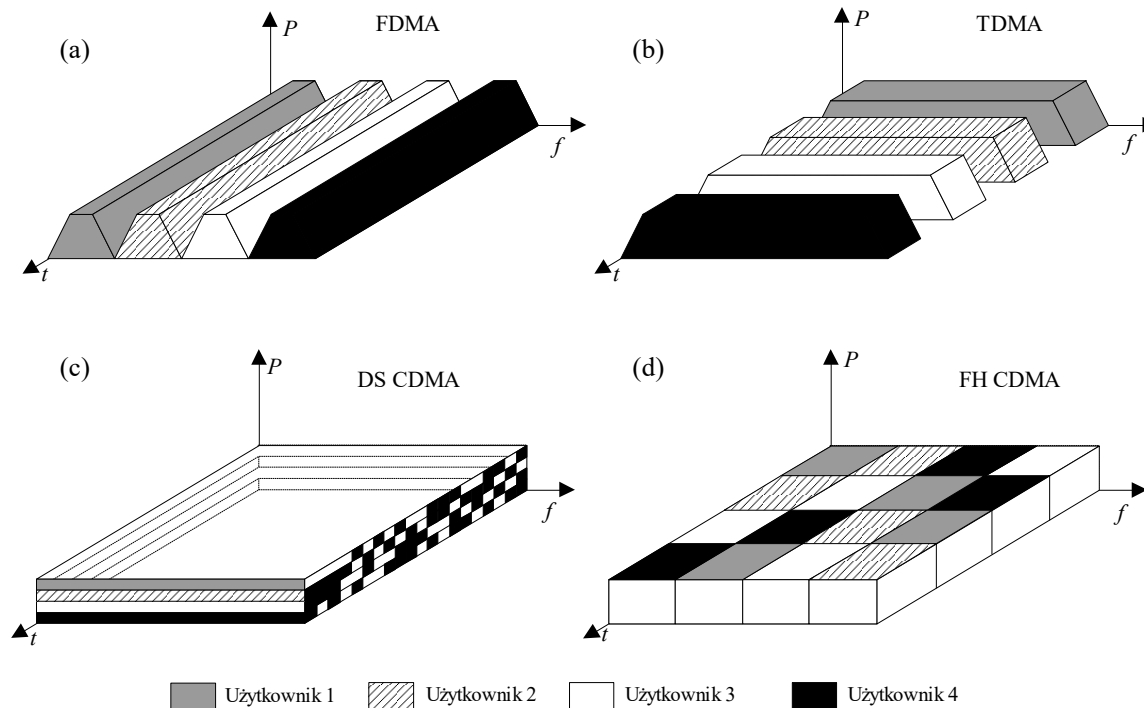
- każdy ciąg binarny, który faktycznie identyfikuje użytkownika, nie jest korelowany z ciągami binarnymi innych użytkowników
- dwa identyczne ciągi binarne przesunięte cyklicznie względem siebie w czasie przynajmniej o 1 element są niekorelowane.

Oznacza to, że przy spełnieniu powyższych warunków możliwy jest **niezależny** odbiór sygnałów użytecznych różnych użytkowników, jeśli nawet zajmują one to samo pasmo kanału w tym samym czasie.

Stosowanie ciągów binarnych o podanych właściwościach jest niezmiernie trudne i wymaga każdorazowo znajomości w odbiorniku ciągu binarnego zastosowanego przez nadajnik. Z tego względu w praktyce stosuje się najczęściej ciągi pseudoprzypadkowe (PP) jako ciągi rozpraszające widmo sygnałów w nadajniku i skupiające je w odbiorniku, **które nie są wprawdzie w pełni niezależne, lecz są prawie niezależne, a ponadto można je łatwo generować.**

Metody podziału kodowego:

- podział kodowo-czasowy (**D**irect **S**equence **CDMA** (DS CDMA))
- podział kodowo-częstotliwościowy (**F**requency **H**opping **CDMA** (FH CDMA))



Ilustracja metod wspólnego użytkowania kanału

(a) System z podziałem częstotliwościowym. (b) System z podziałem czasowym
 (c) System z podziałem kodowo-czasowym: oznaczenie - elementy ciągu binarnego rozpraszającego widmo. (d) System z podziałem kodowo-częstotliwościowym: oznaczenie: prostokąty na płaszczyźnie (f,t) o jednakowym zaciemnieniu lub białe określają podzakresy częstotliwości wybierane kolejno w czasie przez ciąg binarny rozpraszający widmo sygnałów odpowiedniego użytkownika. P - moc sygnału.

Podstawowe koncepcje CDMA pojawiły się już na przełomie lat 40/50-tych

Pierwotnym celem było uodpornienie cyfrowej transmisji w kanale na celowe zakłócenia i podsłuch w systemach radiokomunikacji wojskowej

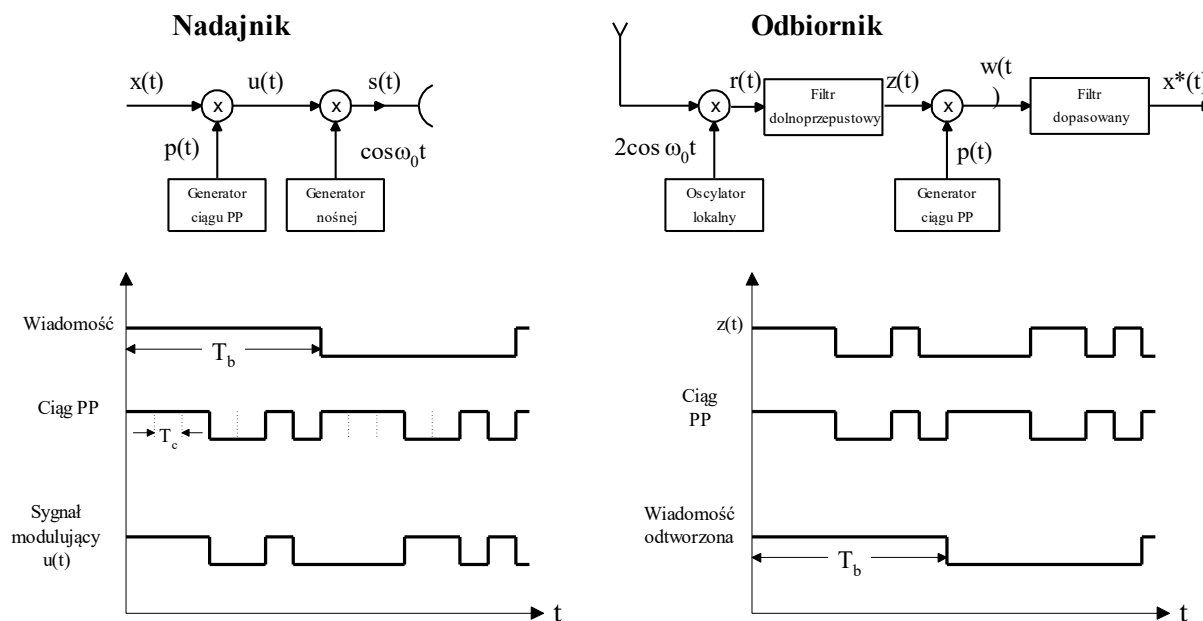
Nowymi celami, które sprecyzowano w latach 70-tych:

- wyznaczanie odległości z wysoką dokładnością dla potrzeb nawigacji satelitarnej wojskowej i cywilnej (system GPS)

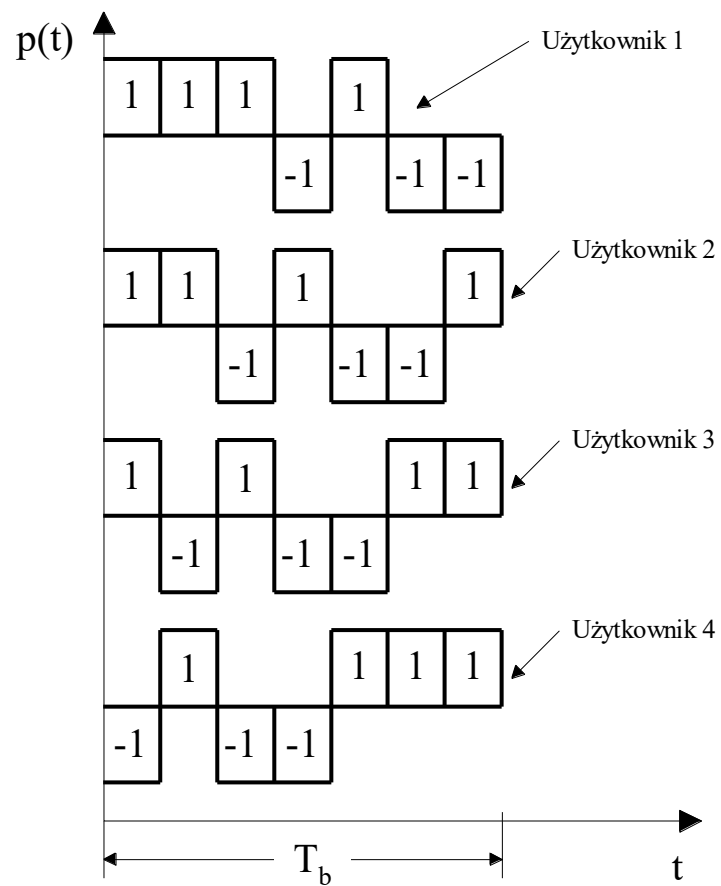
i w latach 80-tych dla potrzeb systemów cywilnych:

- przeciwdziałanie efektom zaników w systemach komórkowych,
- zwiększenie pojemności systemów komórkowych.

System radiokomunikacyjny z podziałem kodowo-czasowym (bezpośrednim rozpraszaniem widma sygnałów) (Direct Sequence CDMA (DS CDMA))



Schemat systemu radiokomunikacyjnego z podziałem kodowo-czasowym w przypadku kanału idealnego (bezszumowego). Oznaczenia: T_b - czas trwania sygnału przenoszącego informację elementarną (bit), T_c - czas trwania elementu ciągu binarnego rozpraszającego widmo sygnału (ang. chip)



Przykłady ciągów pseudoprzypadkowych

Realizacja rozpraszania widma sygnału przenoszącego ciąg informacyjny $x(t)$ o szybkości podawania bitów (informacji elementarnych) równej $R_b = \frac{1}{T_b}$ polega na mnożeniu każdego bitu wiadomości przez ciąg PP o szybkości podawania elementów równej $R_c = \frac{1}{T_c}$, przy czym $T_c \ll T_b$. Powstający w rezultacie sygnał $u(t)$ jest często w praktyce wykorzystywany do kluczowania fazy nośnej o tej samej częstotliwości dla wszystkich nadajników użytkujących kanał.

W języku angielskim elementowi ciągu PP nadano nazwę "*chip*" dla odróżnienia go od bitu reprezentującego informację elementarną wiadomości.

Zatem, zgodnie z rysunkiem, sygnał nadawany przyjmuje postać:

$$s(t) = x(t)p(t)\cos\omega_0t$$

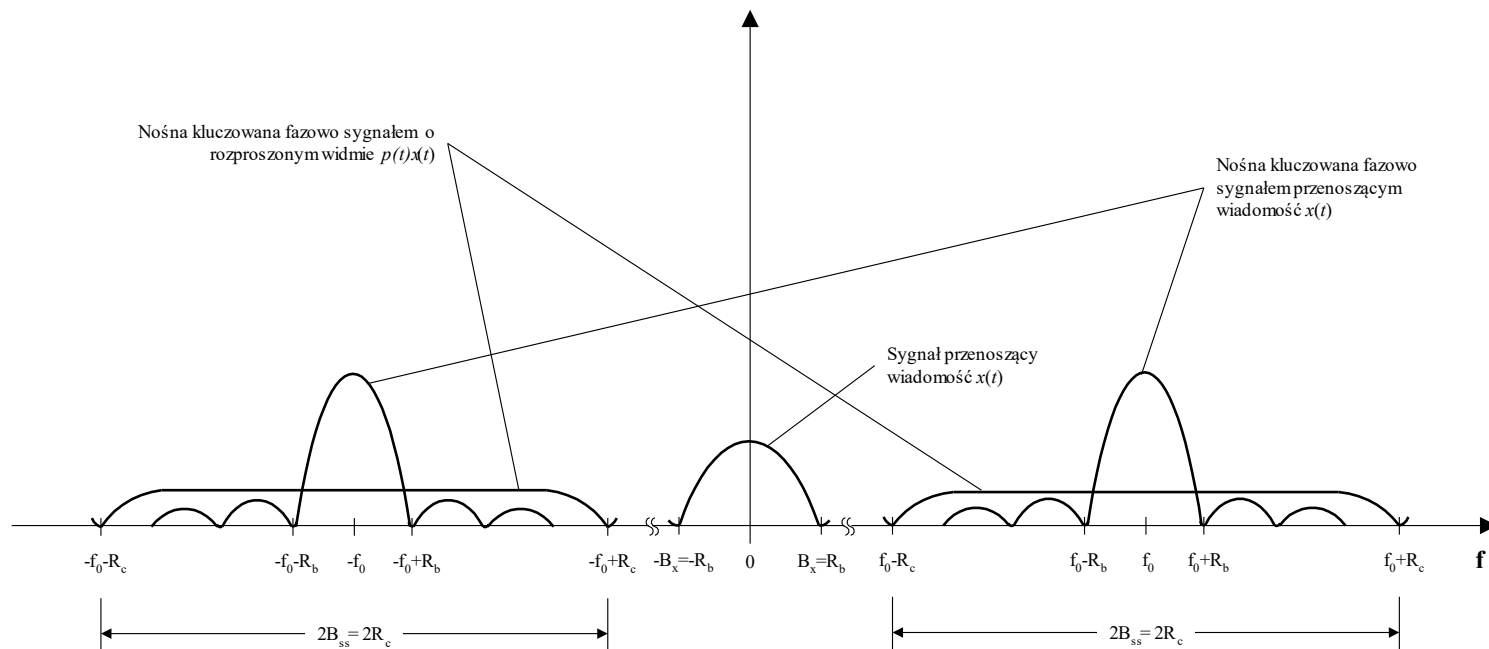
gdzie: $x(t)$ i $p(t)$ przyjmują wartości ze zbioru $\{1, -1\}$ tj.
 $x(t) = (2d_i - 1)D(t - iT_b)$, przy czym $t \in (t_a, t_b) = LT_b$, a (t_a, t_b) jest czasem trwania wiadomości, natomiast d_i , $i=1,2,...,L$, jest ciągiem bitów wiadomości $d_i \in \{0,1\}$,

$$S(f) \cong \frac{P}{R_c} \left[\frac{\sin \pi(f - f_0)/R_c}{\pi(f - f_0)/R_c} \right]^2$$

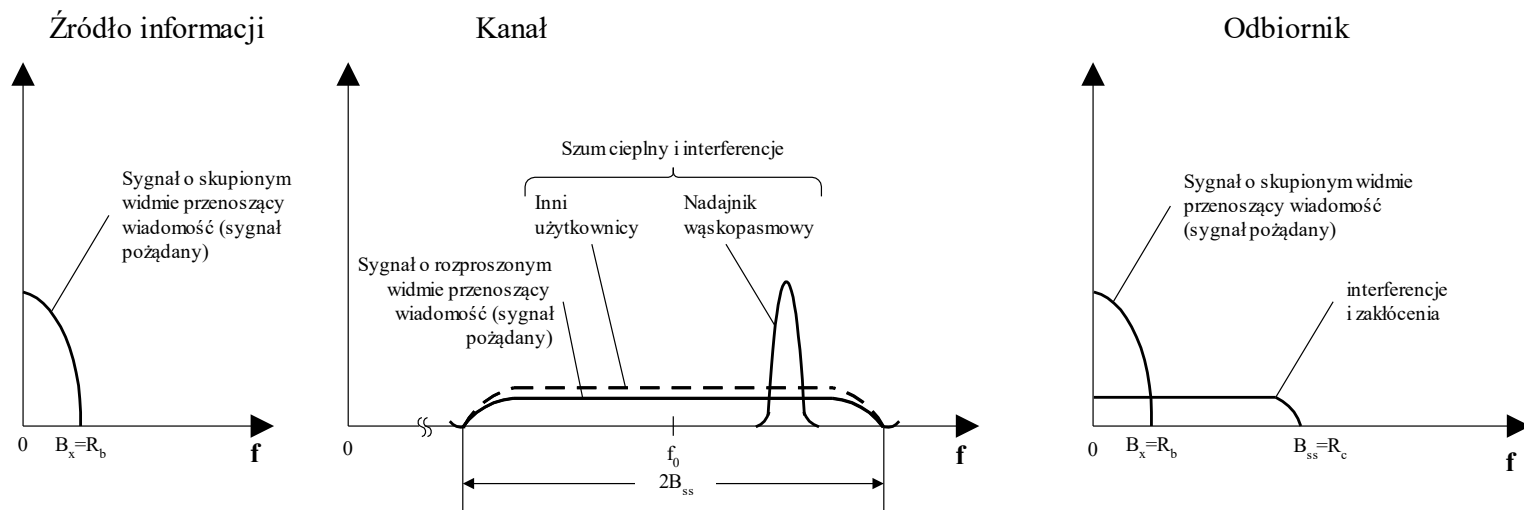
gdzie P jest mocą średnią nośnej, a f_0 oznacza częstotliwość nośnej.

Pasmo częstotliwości odpowiadające pierwszym wartościom zerowym funkcji $S(f)$ leżącym symetrycznie po obu stronach względem f_0 wynosi $B_{ss}=2R_c$ i jest R_c/R_b razy większe niż pasmo

nośnej kluczowanej fazowo jedynie sygnałem przenoszącym ciąg informacyjny $x(t)$.



Gęstość mocy sygnału użytecznego bez rozpraszania i z rozpraszaniem widma sygnału.



Widma sygnału użytecznego, szumu i interferencji oraz zakłóceń wąskopasmowych w systemie z podziałem kodowo-czasowym

Po stronie odbiorczej przeprowadzamy demodulację poprzez mnożenie zmodulowanej nośnej przez koherentny sygnał lokalnego oscylatora. W idealnym przypadku (dla kanału bezszumowego) otrzymamy

$$r(t) = x(t)p(t)\cos\omega_0 t \times 2\cos\omega_0 t = x(t)p(t) + x(t)p(t)\cos 2\omega_0 t$$

Na wyjściu filtra dolnoprzepustowego dostaniemy tylko pierwszą składową wyrażenia po prawej stronie wzoru. Jeśli więc lokalny ciąg PP generowany w odbiorniku jest synchroniczny z ciągiem PP zawartym w odebranym sygnale, to na wyjściu filtra dopasowanego otrzymamy

$$x^*(t) = x(t)p(t) \times p(t) = x(t)$$

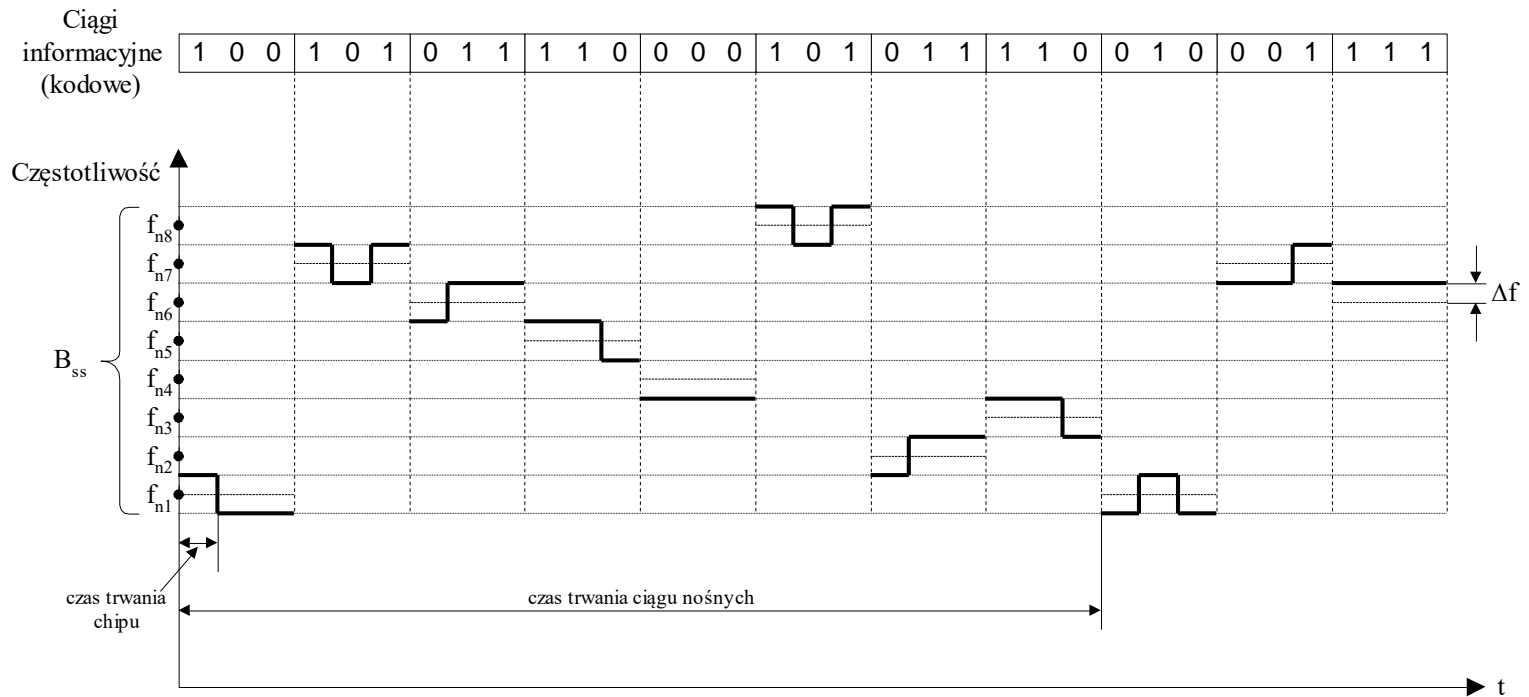
System radiokomunikacyjny ze zwielokrotnieniem kodowo-częstotliwościowym (Frequency Hopping Code Division Multiple Access (FH CDMA))

Znane są dwie formy FH CDMA o różnych właściwościach i jakości:

- powolne wybieranie nośnych
- szybkie wybieranie nośnych

Przy powolnym wybieraniu nośnych każdy kolejny sygnał elementarny (symbol) ciągu informacyjnego (kodowego) lub każdy blok sygnałów elementarnych (symboli) przesyłany jest na innej nośnej, wybieranej zgodnie ze ściśle określoną dla danego użytkownika kolejnością ze zbioru dostępnych w systemie nośnych, przy czym długość tego ciągu nośnych jest ustalona. Jeśli ciągi kolejno wybieranych nośnych (różne

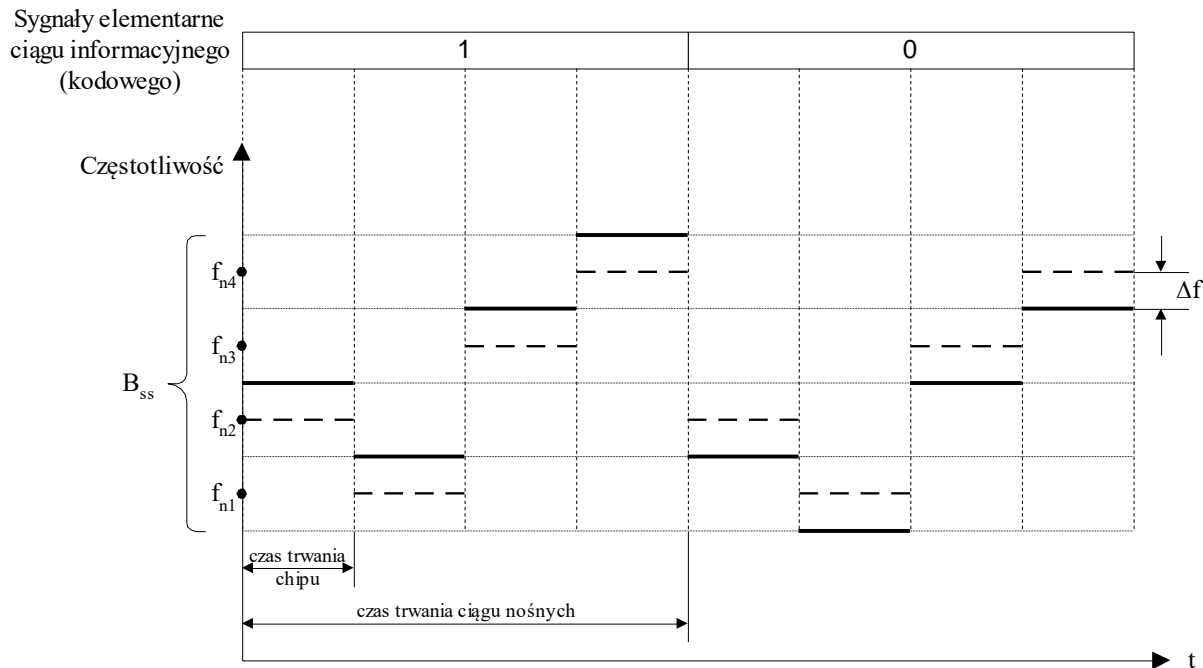
ciągi) dla różnych użytkowników są ortogonalne (prawie ortogonalne) w dziedzinie częstotliwości, to można uzyskać **niezależny (prawie niezależny) odbiór mimo użytkowania tego samego kanału szerokopasmowego przez wielu użytkowników w tym samym czasie.**



Przykład powolnego wybierania nośnych (3 sygnały elementarne / 1 nośną).

Oznaczenia: B_{ss} - pasmo systemu, f_{n1}, \dots, f_{n8} - częstotliwości nośne, Δf - odstrojenie częstotliwości nośnej w górę lub w dół w zależności od wartości binarnej sygnału elementarnego

Przy szybkim wybieraniu nośnych każdy sygnał elementarny (symbol) ciągu informacyjnego (kodowego) jest przesyłany na wielu nośnych wybieranych kolejno w czasie jego trwania, zgodnie ze ściśle określoną kolejnością przyporządkowaną danemu użytkownikowi. Jeśli ciągi kolejno wybieranych nośnych (różne ciągi) przyporządkowane różnym użytkownikom są ortogonalne (prawie ortogonalne), to można uzyskać **niezależny (prawie niezależny) odbiór mimo użytkowania tego samego kanału szerokopasmowego przez wielu użytkowników w tym samym czasie.**



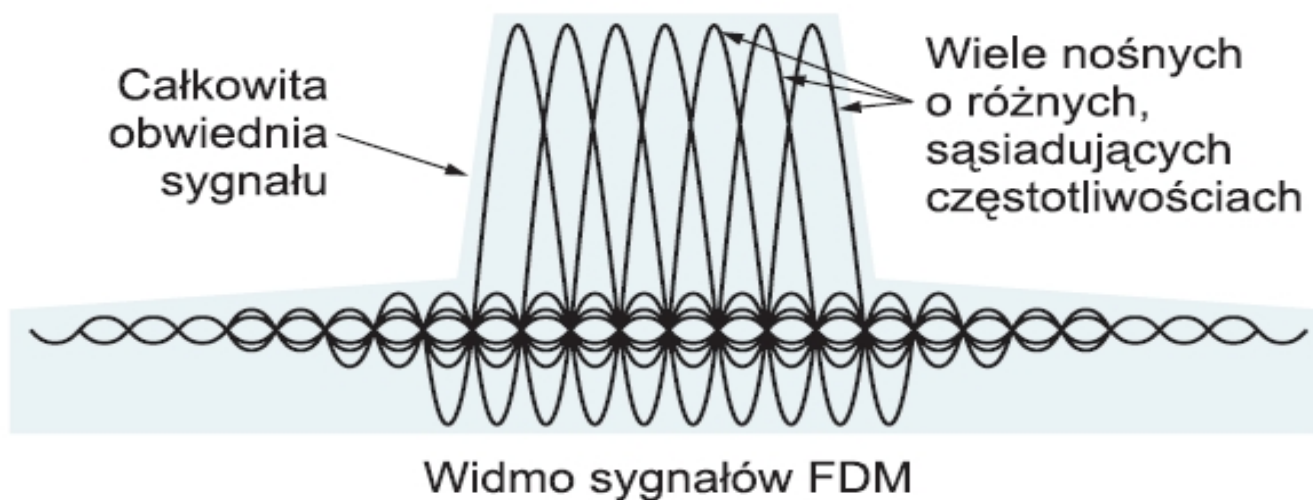
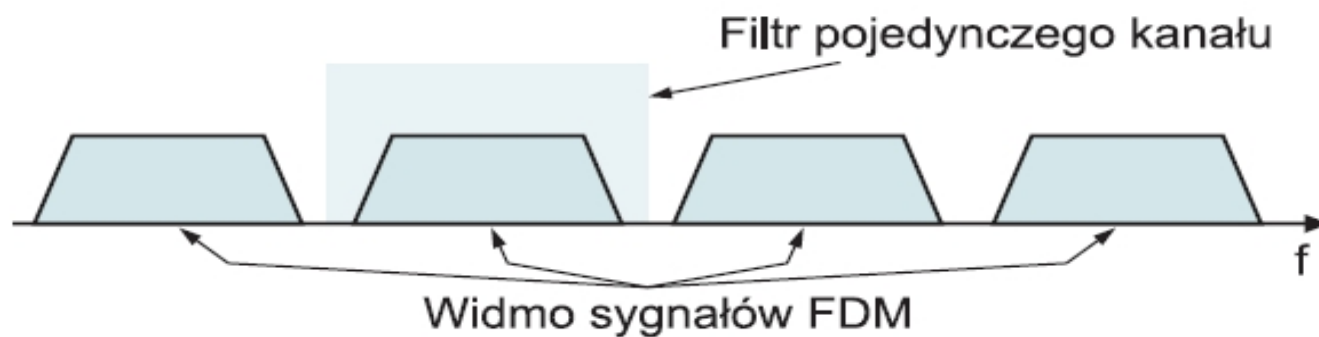
Przykład szybkiego wybierania nośnych przy przesyłaniu sygnałów elementarnych określonego użytkownika (4 nośne / sygnał elementarny).

Oznaczenia: B_{ss} - pasmo systemu, f_{n1}, \dots, f_{n4} - częstotliwości nośne, Δf - odstrojenie częstotliwości nośnej w górę lub w dół w zależności od wartości binarnej sygnału elementarnego

Technika rozpraszania widma była pierwotnie stosowana wyłącznie w systemach wojskowych, w których pseudoprzypadkowe wybieranie nośnych znacznie utrudniało celowe i możliwie najbardziej dotkliwe zakłócanie ich pracy, które przyjmowało formę interferencji wielotonowych lub impulsowych o dużej mocy. Obecnie techniki te są z powodzeniem wykorzystywane w zastosowaniach cywilnych (np. sieci bezprzewodowe Bluetooth).

OFDM (ang. *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*, Ortogonalne zwielokrotnianie w dziedzinie częstotliwości) – metoda zwielokrotnienia w dziedzinie częstotliwości polegająca na jednoczesnej transmisji wielu strumieni danych na ortogonalnych częstotliwościach nośnych.

Rozłożenie transmisji o dużej przepływności na kilka wolniejszych strumieni umożliwia pracę systemu w kanałach, w których występuje zjawisko wielodrogowości. Jest szeroko stosowana w technice dostępu do internetu ADSL czy systemie telewizji cyfrowej DVB-T i DVB-T2.



Zalety

- Efektywne wykorzystanie pasma
- Możliwa kontrola stanu kanału radiowego i dostosowanie do niego parametrów odbioru
- Dobrze radzi sobie z interferencjami międzysymbolowymi i zanikami powodowanymi przez wielodrogowość
- Możliwość stosunkowo prostej implementacji z użyciem algorytmu FFT
- Zmniejszona wrażliwość na niedokładność synchronizacji symbolowej
- Przestrajalne filtry w odbiornikach podkanałów nie są wymagane (w przeciwieństwie do tradycyjnej FDM)

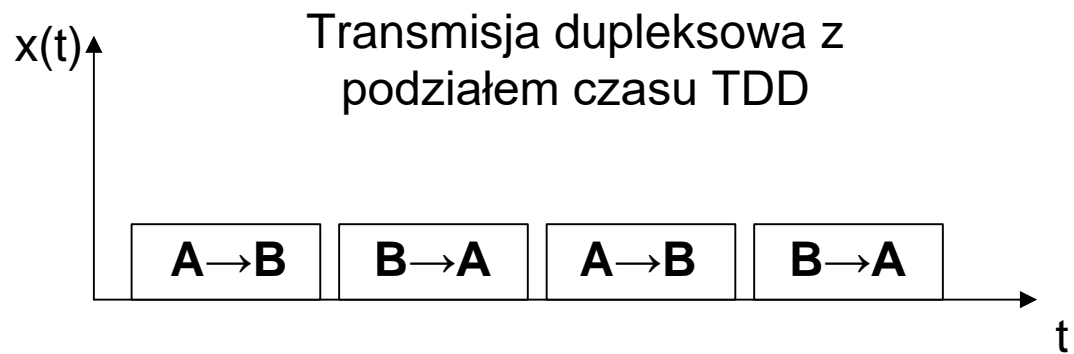
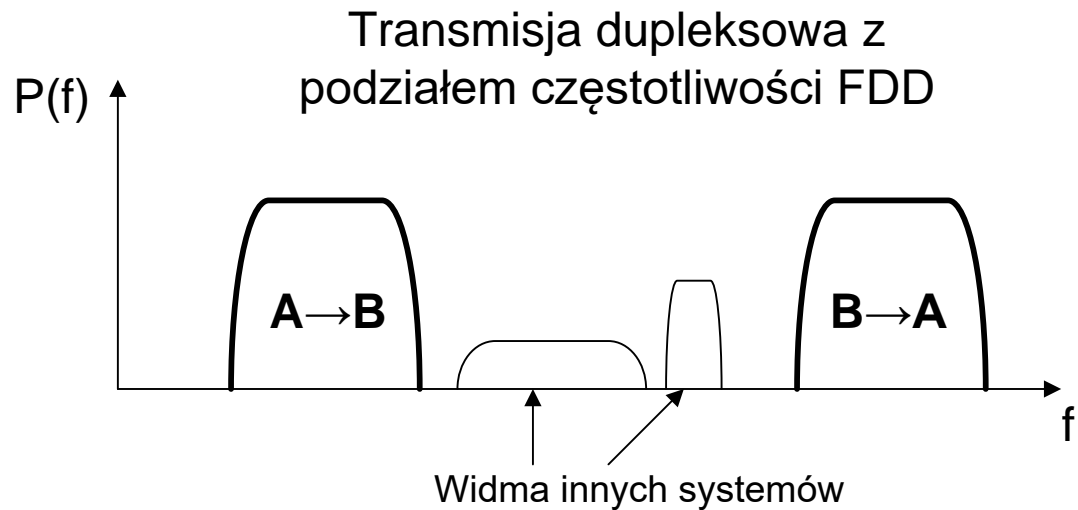
Wady

- Wrażliwość na efekt Dopplera
- Wrażliwość na problemy z synchronizacją częstotliwości nośnej
- Niekorzystny kształt widma mocy (wysoki stosunek mocy maksymalnej do mocy średniej, PAPR), wymagający użycia liniowego toru nadawczo-odbiorczego.
- Obniżona efektywność transmisji wynikająca z zastosowania cyklicznego prefiksu i okresu ochronnego

Metody transmisji dwukierunkowej

Transmisja jednokierunkowa jest charakterystyczna dla systemów rozsyłczych, takich jak radiofonia i telewizja. W innych systemach odbywa się zazwyczaj w dwóch kierunkach. Rozmowa telefoniczna jest tego najprostszym przykładem. Podobnie jest w przypadku transmisji danych, gdy wymagany jest kanał zwrotny lub transmisja jest po prostu dwukierunkowa inaczej mówiąc dwukierunkowa. Kolejnym problemem jest więc organizacja dwukierunkowej wymiany informacji [1].

W pierwszej metodzie transmisji dwukierunkowej pasmo częstotliwości przypisane systemowi jest podzielone pomiędzy dwa kierunki transmisji. Tego rodzaju transmisja jest nazywana **transmisją dwukierunkową z podziałem częstotliwości (FDD – Frequency Division Duplex)**. Pasma przydzielone poszczególnym kierunkom transmisji muszą być rozłączne a odstęp częstotliwości występujący pomiędzy nimi może być wykorzystywany przez np. inne systemy. W wielu przypadkach pasma dla obu kierunków mają jednakową szerokość. Metoda ta jest korzystna gdy wymagana jest niezależna transmisja w obu kierunkach [1].



Przykłady transmisji dwukierunkowej [1]

Transmisja dwupięsowa z podziałem czasu (TDD – Time Division Duplex) jest kolejną metodą transmisji dwupięsowej. W tym przypadku całe pasmo jest użyte do transmisji w obu kierunkach natomiast oś czasu jest podzielona na szczeliny przypisane obu kierunkom transmisji. Podobnie jak w przypadku metody TDMA i tym razem zdefiniowana jest struktura ramki. Metoda TDD jest korzystna jeśli czas propagacji sygnału jest krótki w porównaniu ze stosowanymi blokami danych. Muszą być przewidziane przedziały ochronne nie tylko z powodu czasu propagacji, ale również z powodu konieczności przełączania kierunków transmisji. W bardziej zaawansowanych systemach

czas przypisany obu kierunkom transmisji może być dostosowany do własności realizowanej usługi. W przypadku niektórych zastosowań metoda TDD jest bardziej elastyczna i może w konsekwencji skutkować większą przepływnością [1].

Transmisja z podziałem czasu lub częstotliwości jest stosowana wraz z jedną z metod wspólnego użytkowania kanału (wielodostępu). W praktyce występują systemy stosujące wielodostęp FDMA/TDMA z transmisją FDD (np. GSM), FDMA/TDMA z transmisją TDD (system telefonii bezprzewodowej DECT) CDMA z FDD (system komórkowy IS-95 i UMTS WCDMA/FDD) lub też CDMA z transmisją TDD (UMTS WCDMA/TDD) [1].