

Wyższa Szkoła Informatyki Stosowanej
i Zarządzania

SYGNAŁY SZEROKOPASMOWE

dr inż. Janusz DUDCZYK

ZAGADNIENIA

- Cel stosowania modulacji szerokopasmowych;
 - Rodzaje modulacji szerokopasmowych;
 - Wykrywanie i analiza sygnałów typu FH;
 - Wykrywanie i analiza sygnałów typu DS.
-

Cel stosowania modulacji szerokopasmowych

- Adresowanie modulacji szerokopasmowych;
 - Umożliwienie zwielenia krotnienia kanału transmisyjnego;
 - Uodpornienie emisji na zakłócenia celowe i przypadkowe;
 - Utrudnienie wykrycia sygnału.
-

Podstawy teoretyczne pracy systemów szerokopasmowych

Twierdzenie Shannona o przepływności kanału komunikacyjnego.

$$c = W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = 1,44 \cdot W \cdot \ln \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

c – przepływność kanału telekomunikacyjnego [bit/sek];

W – szerokość pasma przenoszonego kanału [Hz];

S/N – sygnał/szum.

WNIOSEK:

Aby przesyłać sygnał o danym poziomie przy zachowaniu zadanej szerokości i prędkości transmisji, można zwiększyć szerokość pasma sygnału nie zmieniając jego poziomu bez zmiany prędkości transmisji. W wyniku tego procesu można minimalizować S/N (oszczędności ekonomiczne). Dodatkowo system nie zakłóca innych systemów oraz jednocześnie jest mniej podatny na wykrycie i rozpoznanie. **Poszerzenie pasma odbywa się poprzez rozproszenie widma.**

Rodzaje modulacji szerokopasmowych

Odmiany podstawowe:

- Sygnały typu DS/SS (*Direct Sequence Spread Spectrum*);
- Sygnały typu FH/SS(*Frequency Hopping Spread Spectrum*);
- Sygnały typu TH/SS (*Time Hopping Spread Spectrum*).

Sygnały hybrydowe:

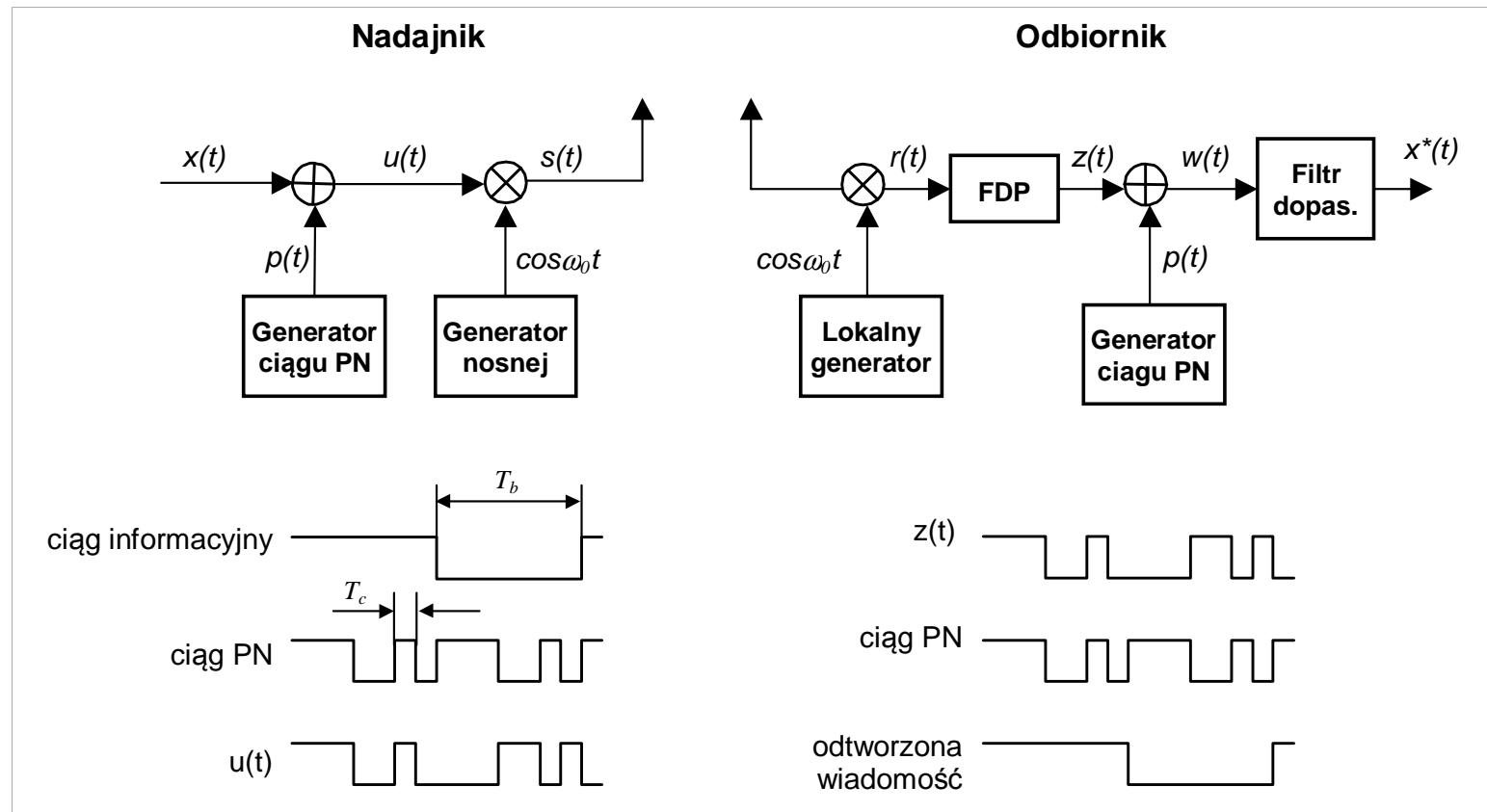
- Sygnały typu TH+FH;
 - Sygnały typu FH+DS;
 - Sygnały typu CRH (*Chip Rate Hopping*).
-

Modulacja typu DS/SS

DS/SS (ang. *Direct Sequence Spread Spectrum*) polega na szybkim kluczowaniu fazy sygnału nośnego ciągiem pseudolosowym (różnym dla różnych użytkowników), o przepływności znacznie większej niż szerokość pasma sygnału informacji.

Sygnały generowane w powyższy sposób, w dziedzinie częstotliwości, przyjmują postać sygnałów szumopodobnych. Uzyskane dzięki pseudolosowej sekwencji rozpraszającej szerokie pasmo sygnału, pozwala na wierne przesyłanie informacji w sytuacji nawet wtedy, gdy obwiednia widma sygnału znajduje się poniżej tła szumowego.

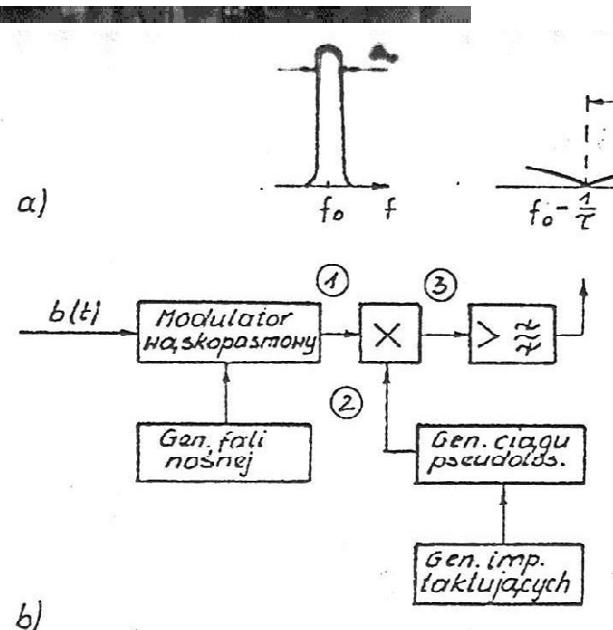
Modulacja typu DS/SS



Schematy odbiornika i nadajnika sygnałów DS/SS w przypadku przesyłania danych cyfrowych.

Modulacja typu DS/SS

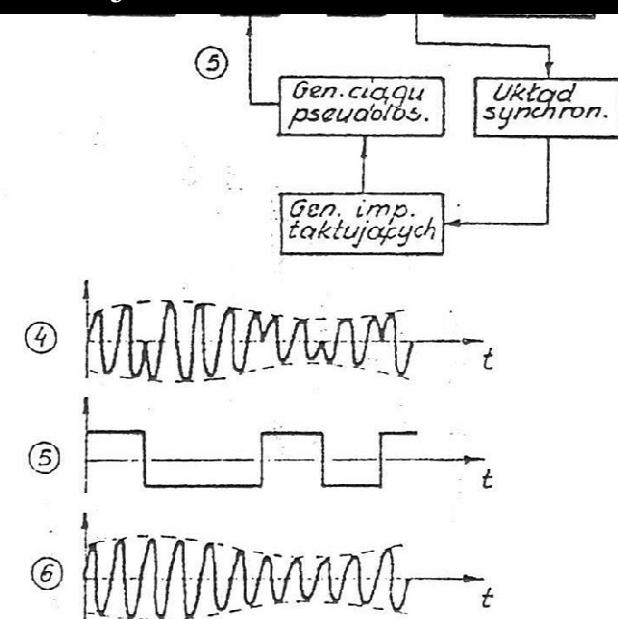
Schemat blokowy systemu.



Przebiegi czasowe sygnałów.

W momencie zmiany stanu ciągu pseudolosowego następuje modulacja fazy sygnału.

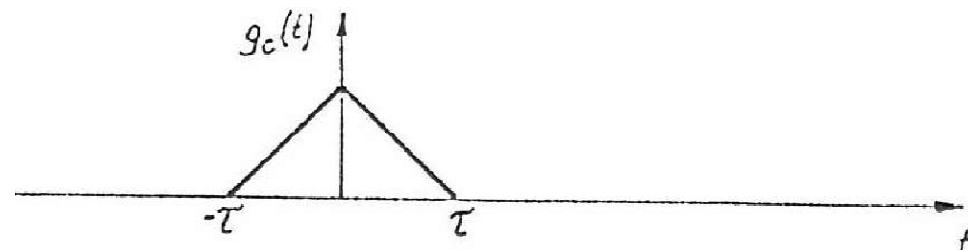
Po stronie odbiorczej odebrany sygnał szerokopasmowy mnożony jest przez identyczny ciąg pseudolosowy, zsynchronizowany z ciągiem w nadajniku. W rezultacie następuje „zdjęcie” dodatkowej manipulacji fazy. Widmo sygnału zostaje skupione do pierwotnego pasma B_0 , poprzez zastosowanie układu mnożącego. Sygnał skupiony poddawany jest klasycznej demodulacji.



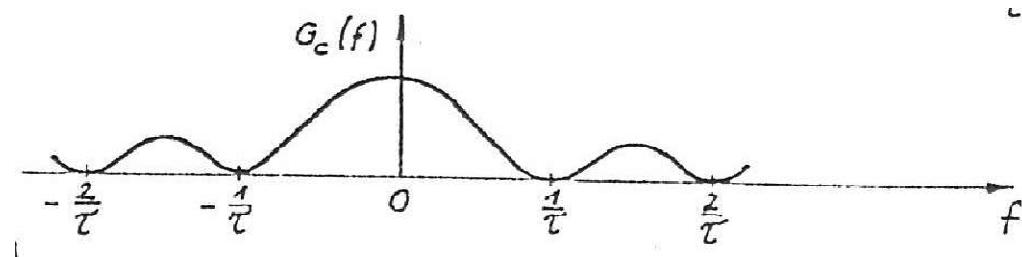
Zasada działania systemu DS.

Modulacja typu DS/SS - funkcja autokorelacji ciągu pseudolosowego

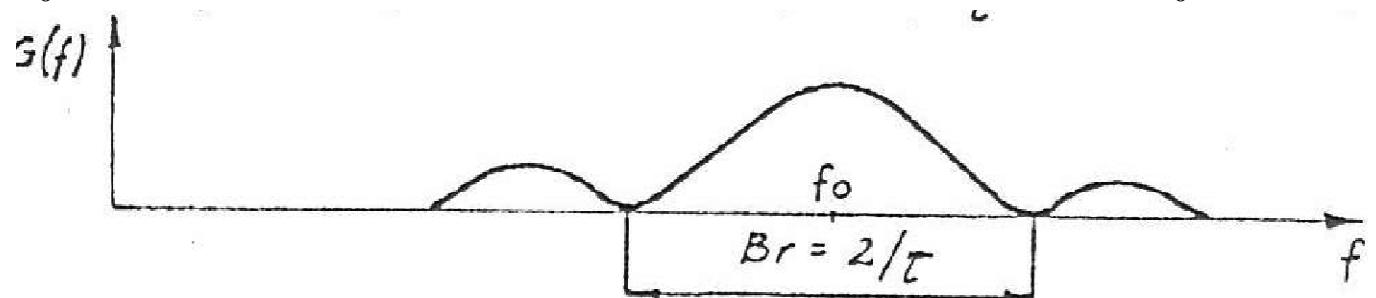
Funkcja autokorelacji ciągu pseudolosowego ma postać:



Widmowa gęstość mocy ciągu pseudolosowego ma postać \sin^2



W wyniku przemnożenia ciągu pseudolosowego przez sygnał wąskopasmowy o częstotliwości środkowej f_0 , widmowa gęstość mocy przesunie się do częstotliwości f_0 .



Modulacja typu DS/SS

Szerokość pasma sygnału rozproszonego jest określona następująco:

$$B_R = B_0 + 2 \cdot \frac{1}{\tau}$$

τ – elementarny czas w ciągu pseudolosowym

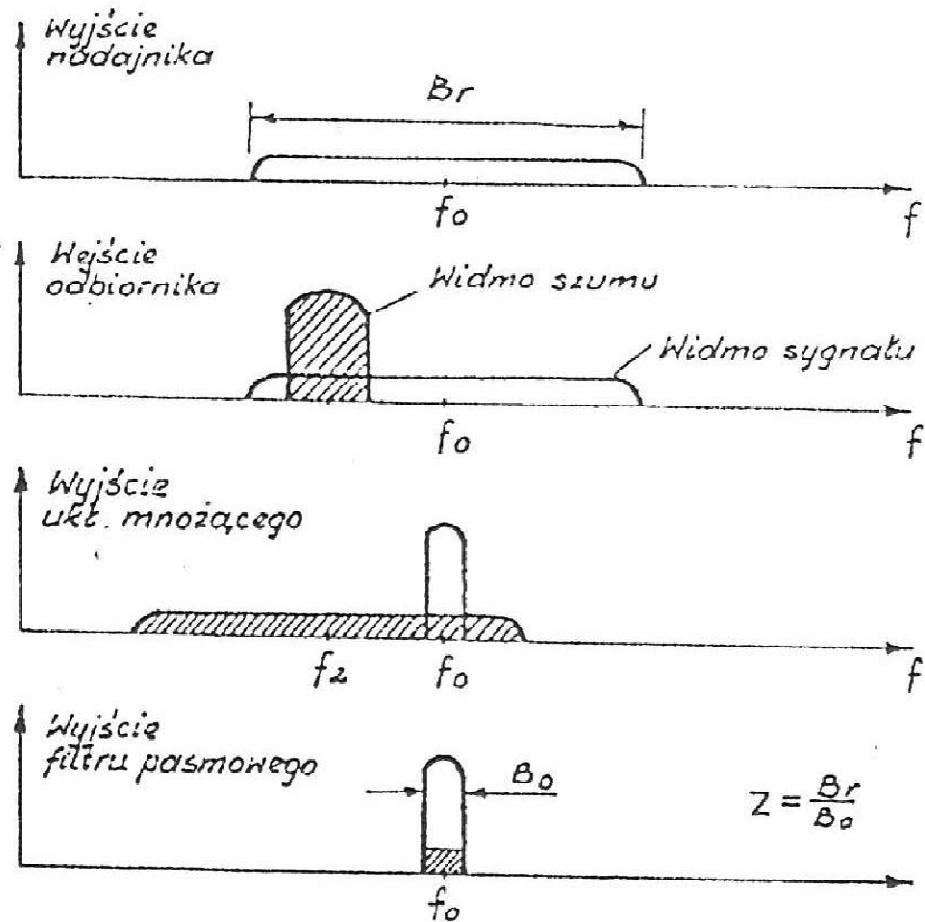
$$\text{dla } B_0 \ll \frac{2}{\tau} \Rightarrow B_R = \frac{2}{\tau}$$

W praktyce $B_0 = 8kHz$; $\frac{1}{\tau} = 5MHz$; $B_R = 8kHz + 10MHz \approx 10MHz$

Modulacja typu DS/SS – mechanizm powstawania zysku przetwarzania w systemie DS

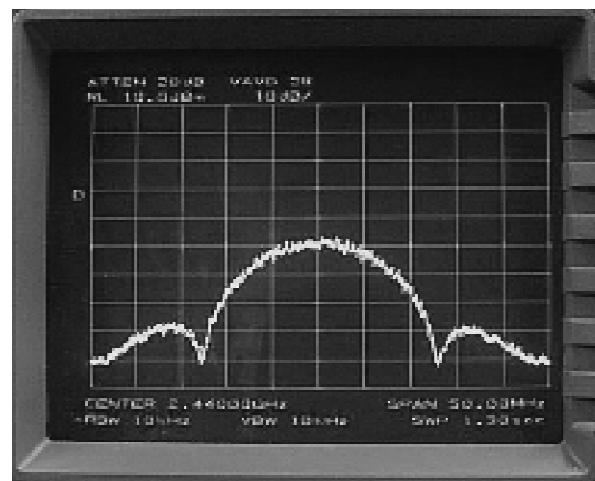
Wpływ f_s jest eliminowany mimo, że po stronie nadawczej poziom f_2 jest większy od sygnału użytecznego.

Sygnal zakłócający f_2 zostaje rozproszony w szerokim widmie i wycięty w filtrze.

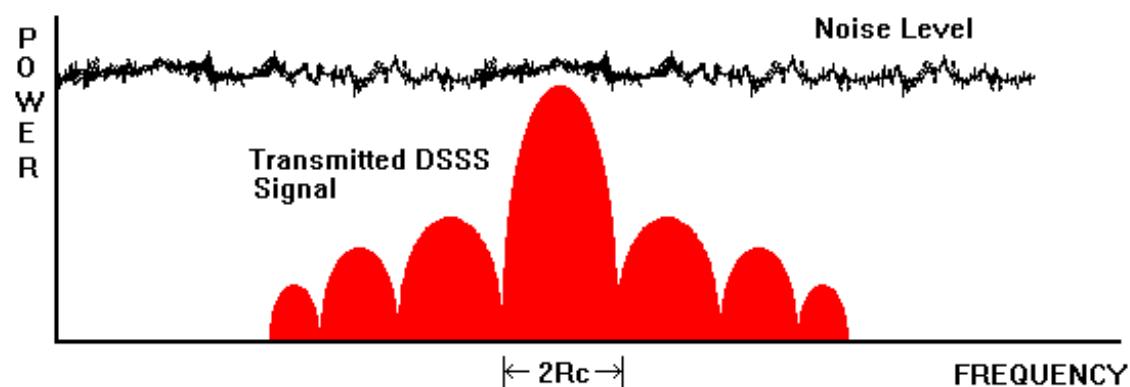


1. Trudno określić użyty ciąg rozpraszający i ustalić częstotliwość pracy;
2. Zastosowanie w systemach satelitarnych i radiowych.

Modulacja typu DS/SS



Zobrazowanie na analizatorze widma sygnału typu DS/SS.



Gęstość widmowa mocy sygnałów DS/SS.

Modulacja typu DS/SS

W systemach DS/SS jako modulacje wysokiej częstotliwości wykorzystywane są manipulacje fazy:

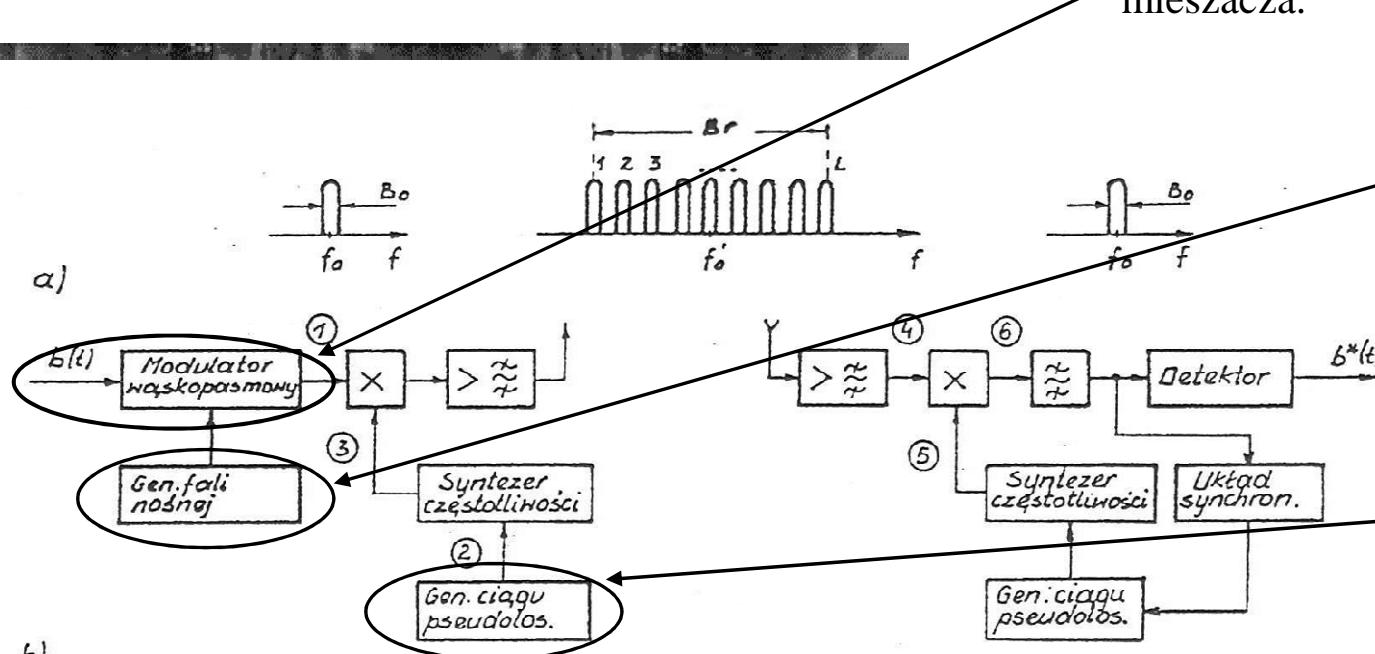
- dwuwartościowa bezwzględna manipulacja fazy **BPSK** (ang. *Binary Phase Shift Keyed*);
- czterowartościowa bezwzględna manipulacja fazy **QPSK** (ang. *Quaternary PSK*);
- rozstrojona manipulacja fazy **OQPSK** (ang. *Offset Keyed QPSK*);
- manipulacja fazy z minimalnym przesunięciem / z kształtowanymi impulsami **MSK / SQPSK** (ang. *Minimum Shift Keyed / Staggered QPSK*).

Modulacja typu FH/SS

FH/SS (ang. *Frequency Hopping Spread Spectrum*) polega na tym, że częstotliwość sygnału nośnego zmienia się skokowo w szerokim paśmie według algorytmu określonego ciągiem pseudolosowym. Ciągi pseudolosowe są różne dla różnych użytkowników. W odróżnieniu od sygnału DS, sygnał FH nie jest równomiernie rozproszony w całej szerokości zajmowanego pasma częstotliwościowego ale skupiony jest wokół wielu losowo dobieranych częstotliwości, na których przesyłane są dane.

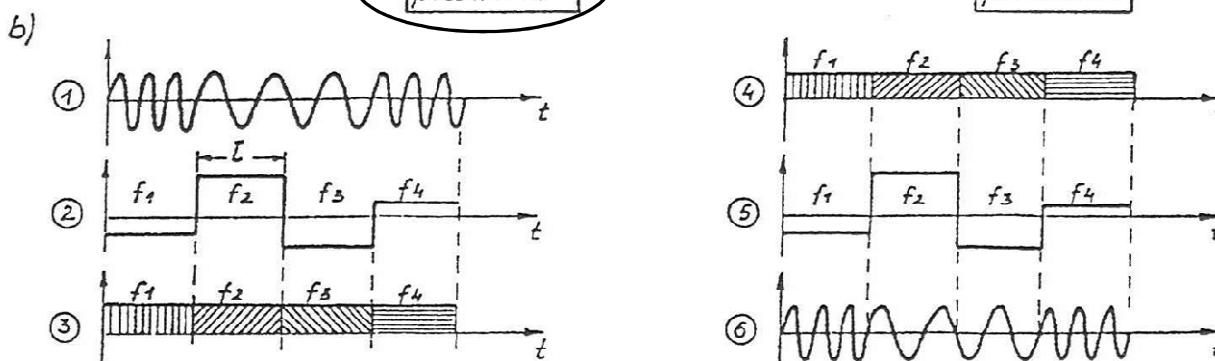
Modulacja typu FH/SS

Modulator wytwarzający emisję FSK podawaną na wejście mieszacza.



Sygnal o losowo zmieniającej się częst. na skutek sterowania syntezy ciągiem pseudolosowym

Generator ciągu pseudolosowego. Sygnal modulujący w postaci binarnej.



Przebiegi czasowe sygnałów.

Zasada działania systemu FH.

Modulacja typu FH/SS

Sygnal FSK zostaje rozproszony lecz f_n zmienia się w sposób losowy. Będzie występował na określonej f_n w określonym czasie 3÷20 ms. Są to różne częstotliwości zmieniające się proporcjonalnie do ciągu pseudolosowego.

Pasmo sygnału na każdej z częstotliwości jest równe $B_0 + \frac{2}{\tau}$

Jeśli $B_0 \gg \frac{2}{\tau}$ to można przyjąć, że nie następuje poszerzenie pasma B_0 . Częstotliwości podnośne powinny być tak dobrane, aby widma sygnału były przystające.

W paśmie rozproszenia B_R mieści się L – elementarnych kanałów o paśmie B_0 .

$$L = \frac{B_R}{B_0} = Z \quad \text{Zysk systemu FH; } Z=L$$

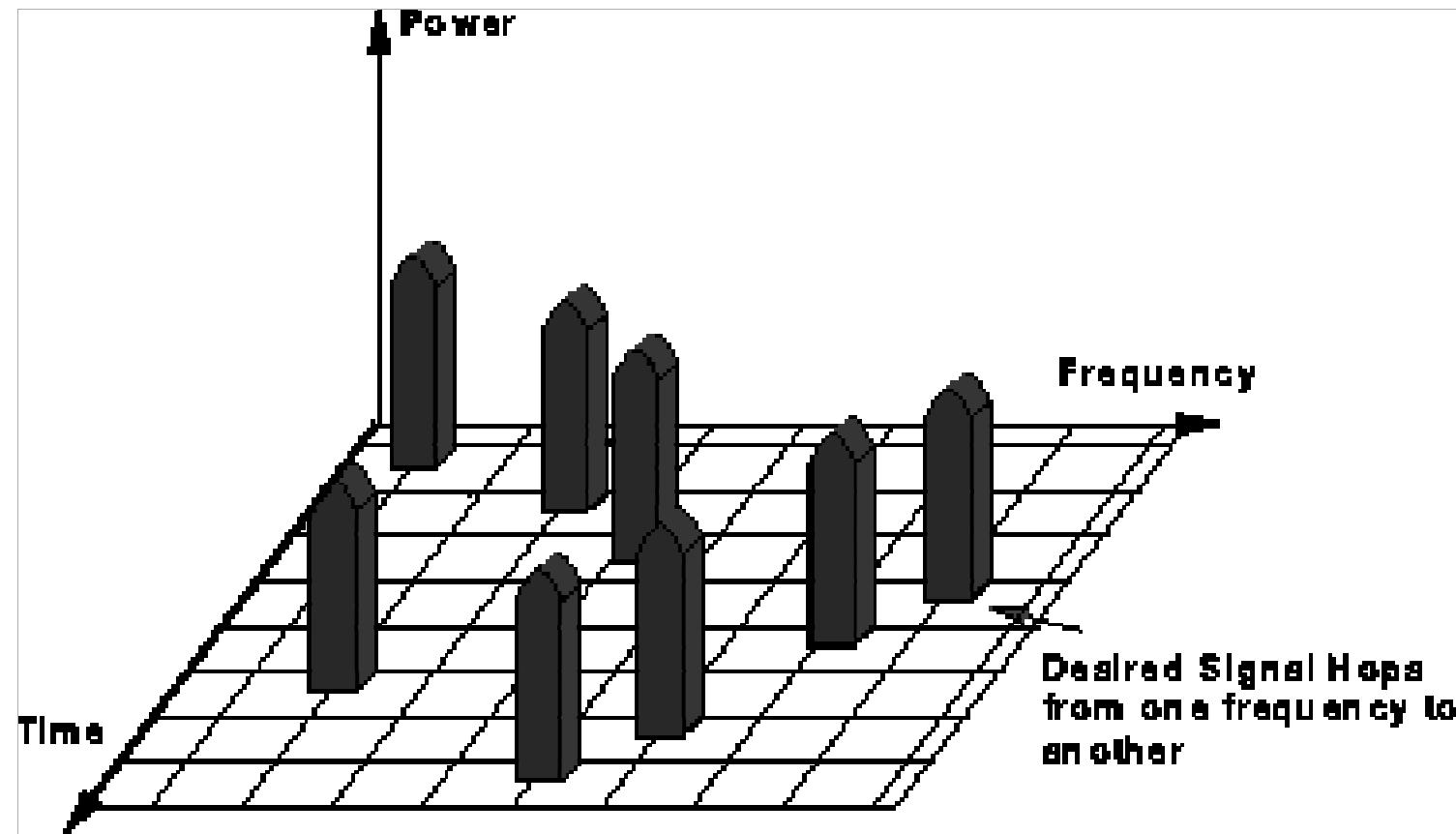
W praktyce: $B_R = 6,4\text{MHz}$ lub 10 MHz ; $B_0 = 25\text{ kHz}$

Modulacja typu FH/SS

Oba syntezery muszą być dwuetapowo synchronizowane.

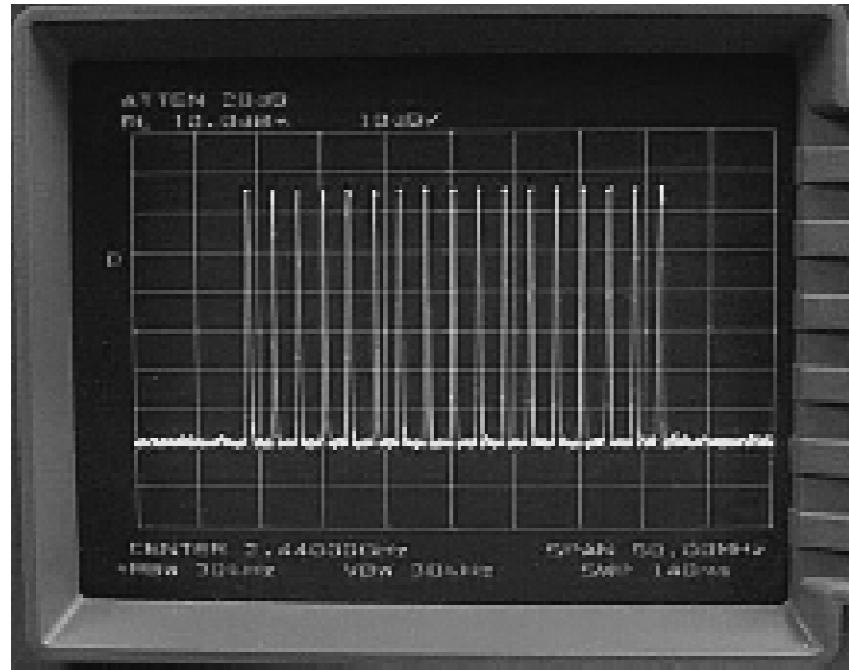
- Pierwotna synchronizacja (radiostacja MASTER wysyła sygnał synchronizacji (znany i wąskopasmowy) do podrzędnych radiostacji SLAVE;
- Synchronizacja skali czasu (pozostanie stacji w synchronizacji na czas około 24 h).

Modulacja typu FH/SS



Sygnal FH we współrzędnych trójwymiarowych (czas, częstotliwość, moc).

Modulacja typu FH/SS



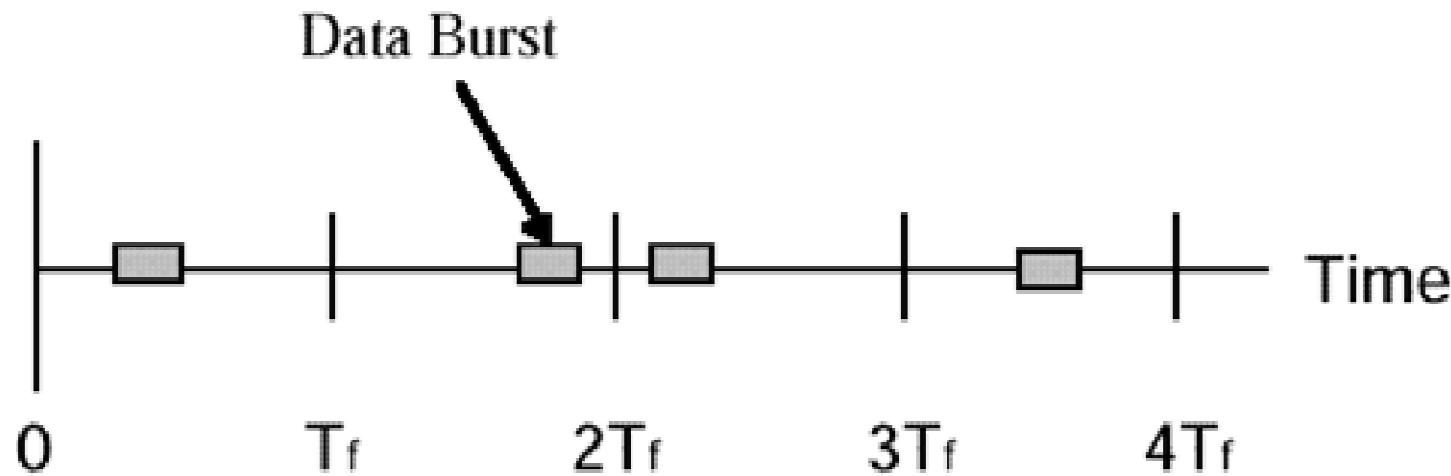
Długookresowe (uśrednione) widmo sygnału typu FH/SS.

Realne szybkości kluczowania współczesnych urządzeń wykorzystujących emisje FH wynoszą 100-1000 skoków/sek. Pasmo skakania może wynosić od kilkuset kHz do kilkudziesięciu MHz.

Modulacja typu TH/SS

TH/SS (ang. *Time Hopping Spread Spectrum*) polega na tym, że sekwencja kodowa ciągu pseudolosowego steruje włączaniem i wyłączaniem nadajnika. W systemie tym, czas transmisji jest dzielony na wąskie odcinki w ramach określonego przedziału czasu. W ramach każdego wąskiego odcinka czasowego jest przesyłany pakiet informacji za pomocą pseudolosowego schematu różnego dla różnych użytkowników. Taka postać sygnału jako modulacji szerokopasmowej znalazła zastosowanie głównie w powiązaniu z FH. Zasadniczą różnicą między FH, a T/FH, w kwestii rozdzielenia czasu trwania częstotliwości i zmian częstotliwości jest to, że w systemach FH transmitowana częstotliwość zmienia się wraz z każdym kolejnym czasem trwania bitu kodu, podczas gdy **w systemach T/FH częstotliwość może zmienić się tylko przy przejściu z zera na jedynkę w sekwencji kodowej.**

Modulacja typu TH/SS



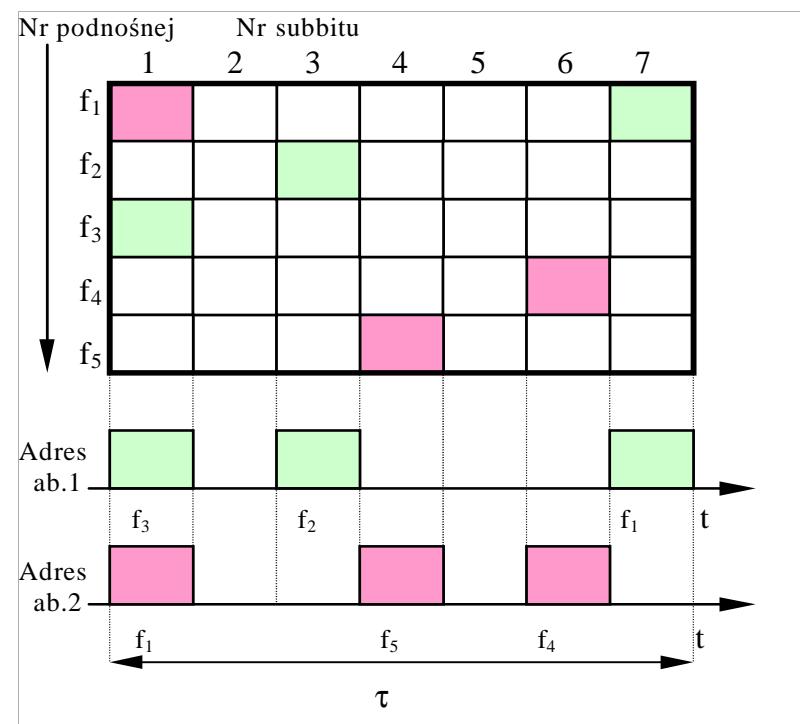
Sygnal TH/SS. Każda z przesyłanych paczek 'burst' zawiera „k” bitów danych. Moment pojawiienia się paczki jest ścisłe określony sekwencją pseudolosową.

Modulacje złożone (hybrydowe)

Łączenie modulacji szerokopasmowych pozwala na uzyskanie dodatkowych korzyści polegających na zwiększeniu możliwości rozpraszania widma, poprawie odporności na zakłócenia, dalszym utrudnieniu wykrycia sygnału oraz uzyskaniu łatwiejszego wielodostępu i adresowania. Najczęściej stosowanymi sygnałami hybrydowymi są połączone modulacje FH i DS, oraz TH i DS.

Sygnały typu TH+FH

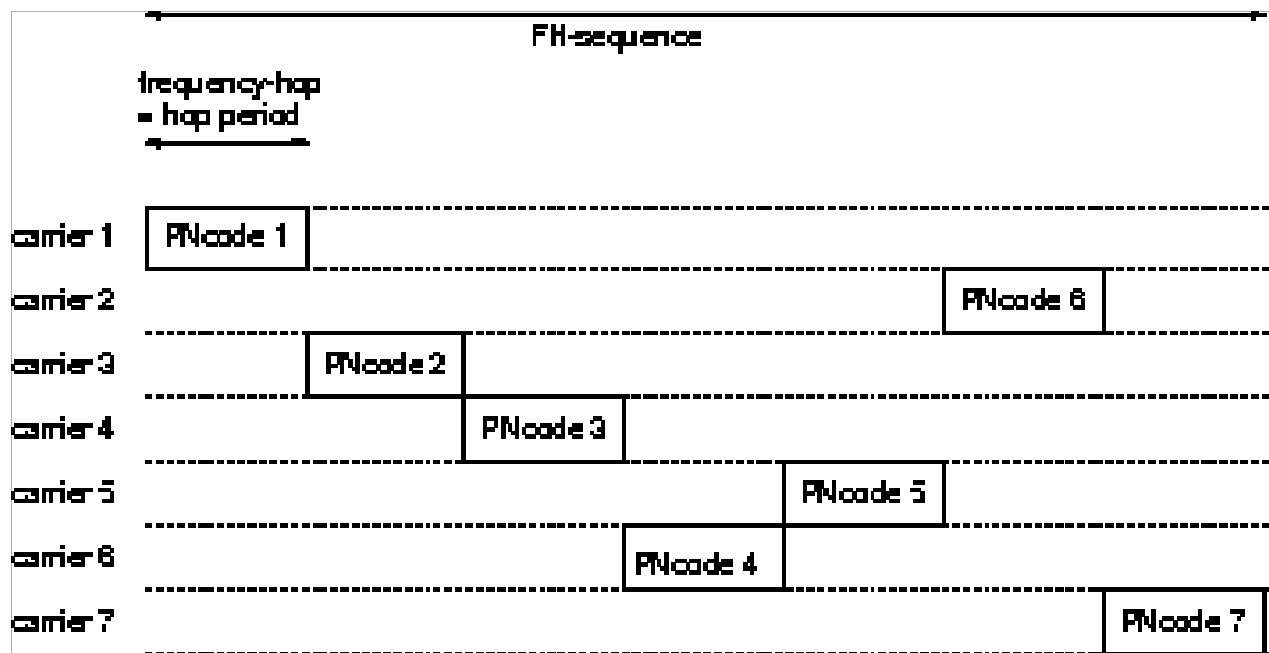
Sygnały typu TH+FH. Przykładowym systemem TH/FH może być system matrycowy. W systemie tym informacja binarna przesyłana jest przy pomocy krótkich impulsów o różnej częstotliwości w różnym czasie (tzw. matryca czasowo częstotliwościowa, która jest różna dla różnych użytkowników).



Przykładowa matryca czasowo-
częstotliwościowa sygnału TH+FH dla
dwóch abonentów

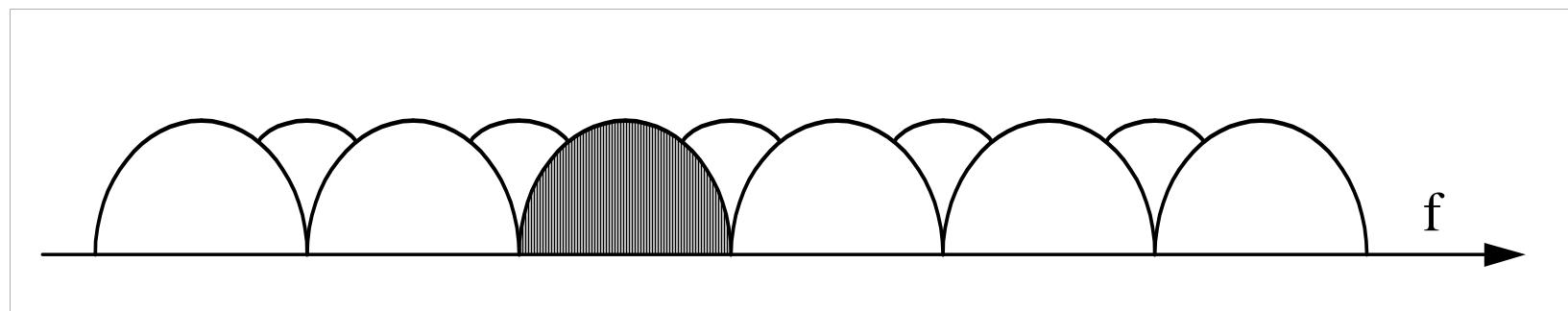
Sygnały typu FH+DS

Sygnały typu FH+DS. Modulacja FH/DS zawiera sygnał zmodulowany DS, w którym okresowo zmienia się częstotliwość środkowa. Całkowity sygnał szerokopasmowy złożony jest z określonej liczby sygnałów charakterystycznych dla systemu DS. Sygnał DS pokrywający część pasma pojawia się w tym paśmie na bardzo krótki odcinek czasu, narzucony przez wzorzec FH.



Struktura
częstotliwościowo-czasowa
sygnału typu DS+FH.

Sygnały typu FH+DS



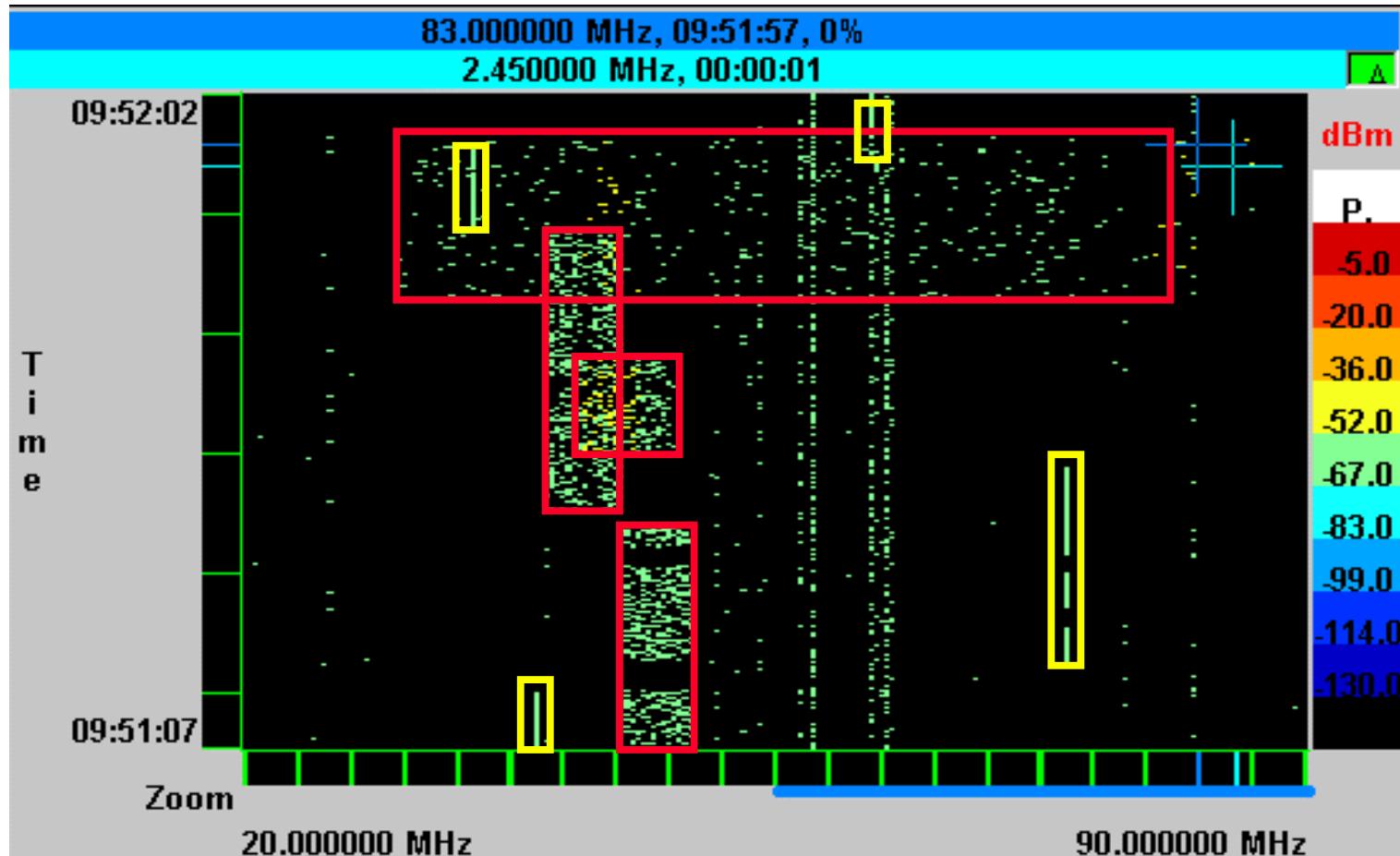
Widmo częstotliwościowe hybrydowego sygnału FH+DS.

Wykrywanie i analiza sygnałów typu FH – wykorzystanie spektrogramu

Pomimo tego, że sygnały FH traktuje się jako sygnały szerokopasmowe, to jednak w krótkich przedziałach czasu (w obrębie czasu trwania skoku) są to typowe sygnały wąskopasmowe zwykle o stosunkowo wysokim SNR.

Wykrywanie emisji FH najczęściej realizuje się metodą szybkiego szeregowego przeszukiwania pasma częstotliwości, w którym pracuje nadajnik emisji FH. Najprostszą metodą stwierdzenia obecności emisji FH jest przedstawienie elementarnych wyników detekcji sygnałów przekraczających zdefiniowany wcześniej próg w postaci tzw. spektrogramu czyli trójwymiarowego zobrazowania sygnału we współrzędnych: poziom sygnału / częstotliwość / czas. Zobrazowanie tego typu umożliwia określenie wykorzystywanego przez nadajnik FH zakresu częstotliwości oraz momentów rozpoczęcia i zakończenia emisji. Możliwe jest także wykorzystanie informacji o poziomie sygnału w celu wstępniego rozróżnienia poszczególnych źródeł sygnałów.

Wykrywanie i analiza sygnałów typu FH – wykorzystanie spektrogramu

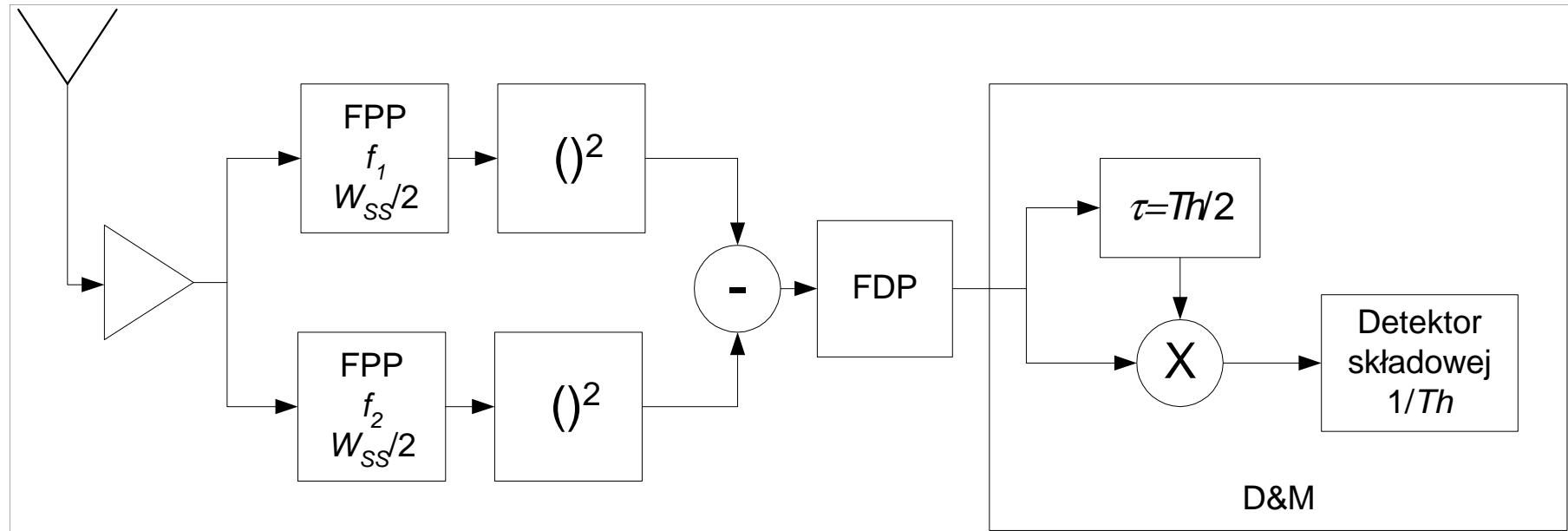


Spektrogram emisji typu FH oraz FF.

Wykrywanie i analiza sygnałów typu FH – wykorzystanie układu DAM

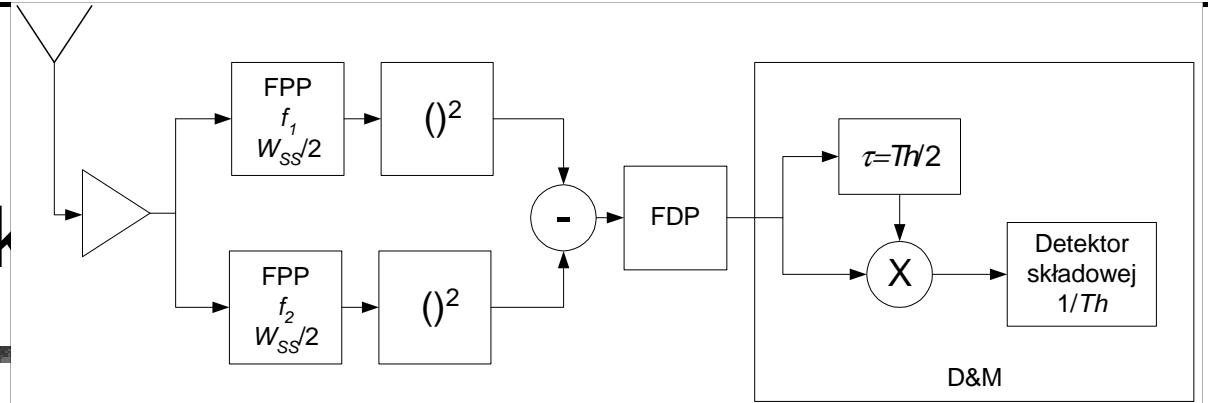
W większości stosowanych emisji FH zmiana częstotliwości nośnej odbywa się losowo w sposób synchroniczny. W związku z tym, prędkość zmian częstotliwości jest stała. Określenie szybkości zmian częstotliwości nośnej sygnału FH, można wykorzystać do klasyfikacji wykrytych sygnałów typu FH lub też do wykrywania sygnałów o określonej szybkości zmian częstotliwości. Określenie szybkości zmian częstotliwości nośnej w sygnale FH możliwe jest za pomocą tzw. układu *Delay & Multiply*. W celu jego wykorzystania można zastosować poniższe rozwiązanie.

Wykrywanie i analiza sygnałów typu FH – wykorzystanie układu DAM



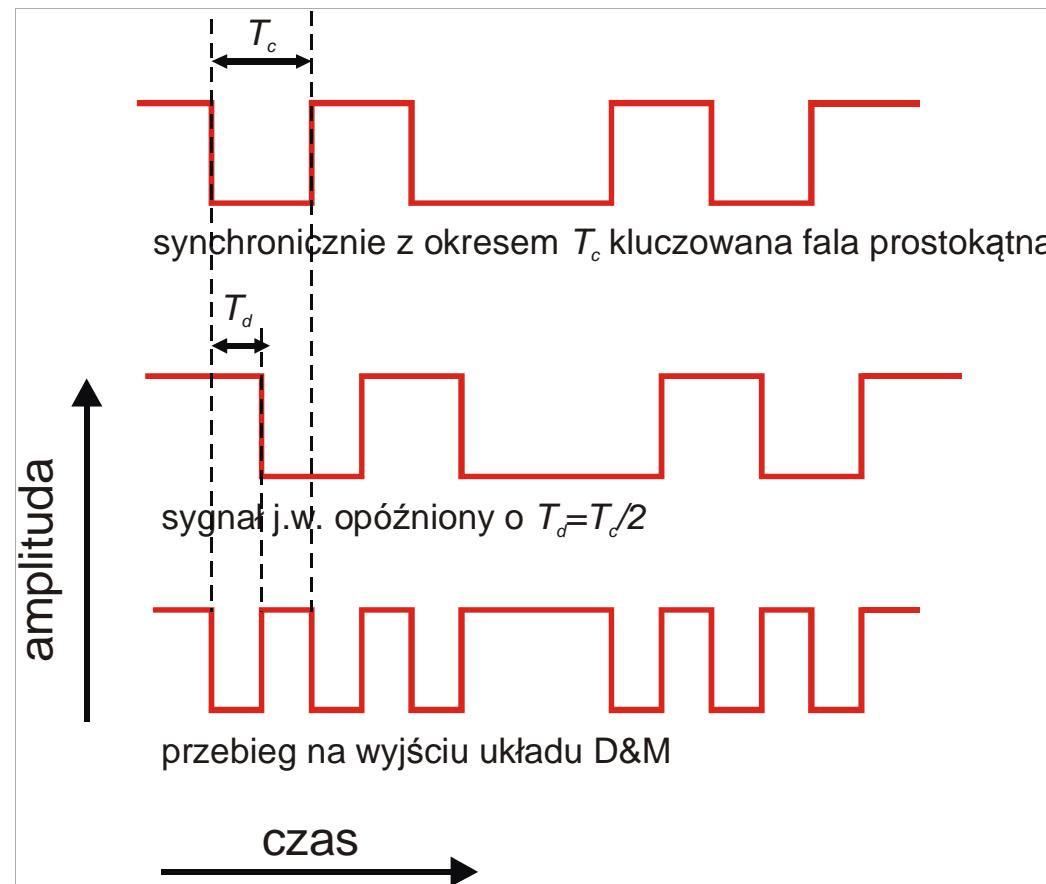
Zastosowanie układu Delay and Multiply (DAM) do określania szybkości kluczowania częstotliwości sygnałów FH.

Wykrywanie typu FH – wyk.



Zasada działania układu jest następująca. Analizowane pasmo badanego sygnału zostaje podzielone na dwa przyległe podzakresy o pasmach $W_{SS}/2$ za pomocą dwóch filtrów pasmowo przepustowych FPP, gdzie W_{SS} oznacza pasmo emisji FH. Do wyjścia filtrów dołącza się detektory obwiedni lub detektory energii (np. w postaci układów nieliniowych drugiego rzędu). Zakłada się, że kluczowanie częstotliwości nośnej odbywa się synchronicznie, w sposób losowy, w przydzielonym zakresie pracy W_{SS} radiostacji FH. W związku z powyższym czas przebywania w paśmie każdego filtra jest krotnością pewnego odstępu jednostkowego. W celu dwukrotnego zwiększenia amplitudy (oraz wydzielenia jednego sygnału) wyjścia detektorów dołącza się do układu różnicowego. Na wyjściu układu różnicowego umieszcza się filtr dolnoprzepustowy. Uzyskany sygnał podaje się na wejście układu D&M. Najodpowiedniejszą wartością opóźnienia w układzie D&M jest połowa oczekiwanej czasu trwania pojedynczego skoku T_h .

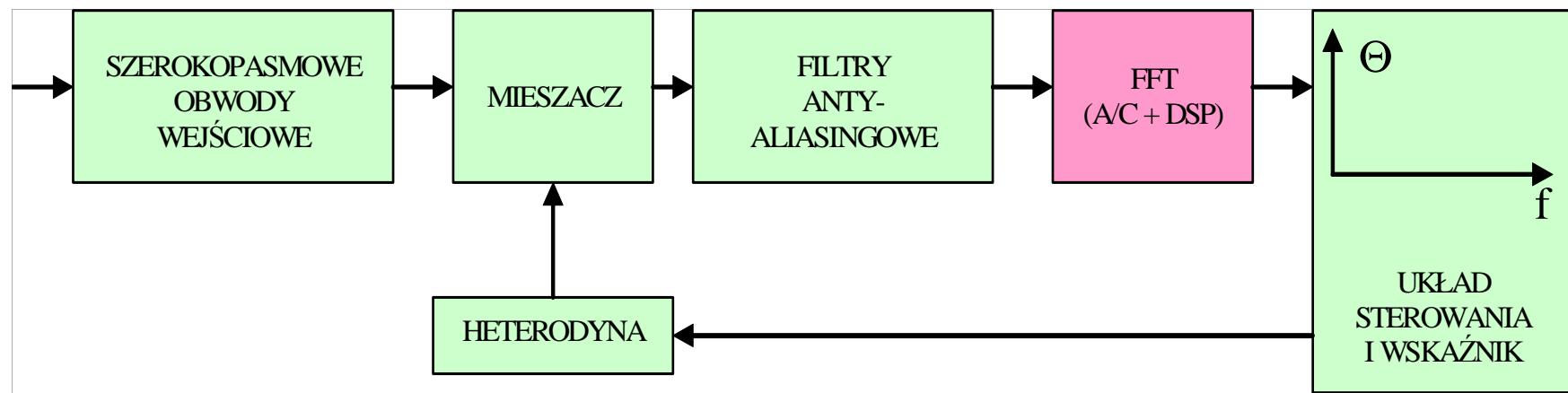
Wykrywanie i analiza sygnałów typu FH – wykorzystanie układu DAM



Przebiegi czasowe w układzie DAM określania szybkości kluczowania.

Wykorzystanie układu DAM umożliwia wykrywanie sygnału FH o znanej szybkości kluczowania lub określenie szybkości kluczowania w przypadku gdy nie jest ona znana.

Wykrywanie i analiza sygnałów typu FH – namierzanie emisji



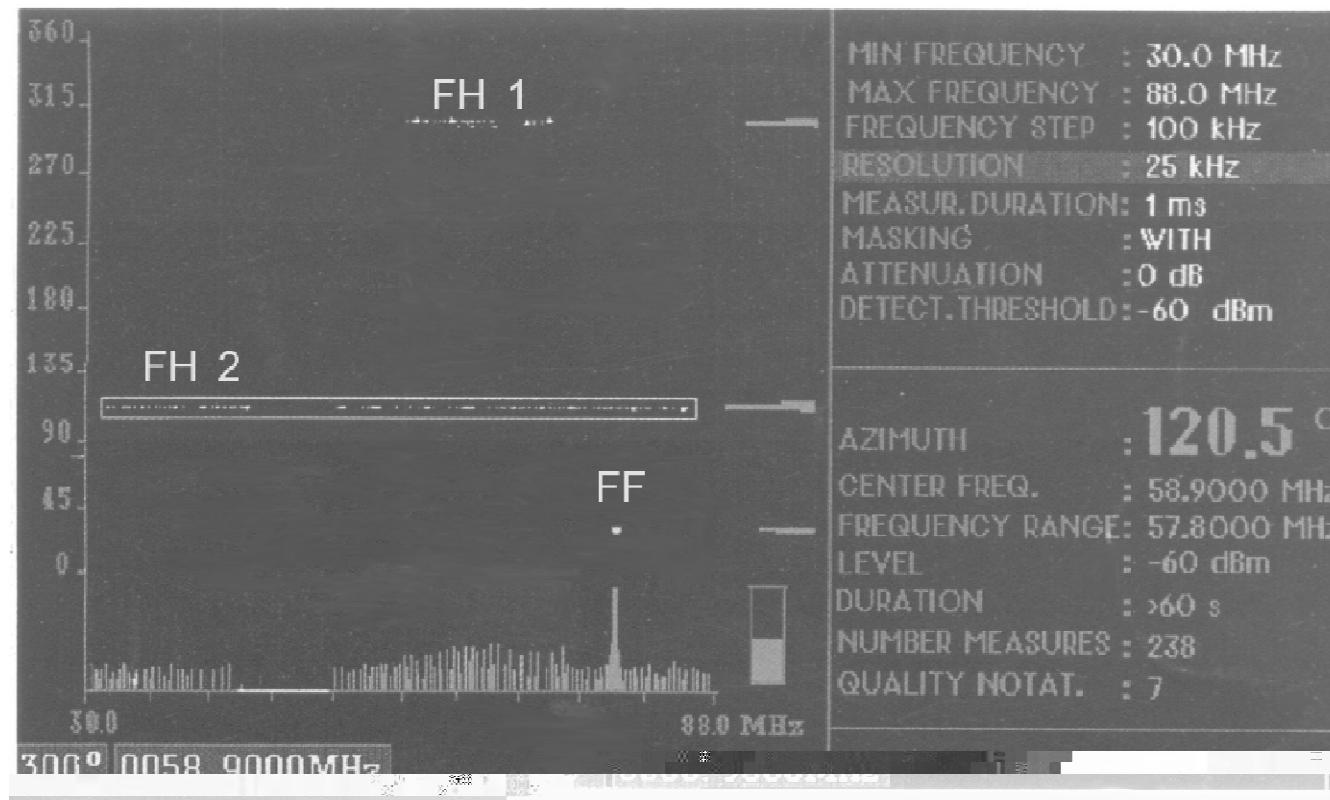
Schemat układu do wykrywania sygnałów typu FH.

Wykrywanie i analiza sygnałów typu FH – namierzanie emisji

Wykrycie emisji FH najczęściej związane jest z jej namierzaniem. Tylko jednoczesne namierzenie może dać odpowiedź, czy wykrywana radiostacja pracuje w trybie FH. W celu prawidłowej interpretacji wyników wykrywania i namierzania, od dawna stosowany jest sposób przedstawiania ich we współrzędnych: **azymut - częstotliwość**. Tylko ułożone na stałym azymucie, równomiernie rozłożone w określonym przedziale częstotliwości punkty świadczą o pracy stacjonarnej radiostacji FH. Radiostacja pracująca na stałej częstotliwości (FF) zobrazowywana jest we współrzędnych częstotliwość-azymut w postaci punktu.

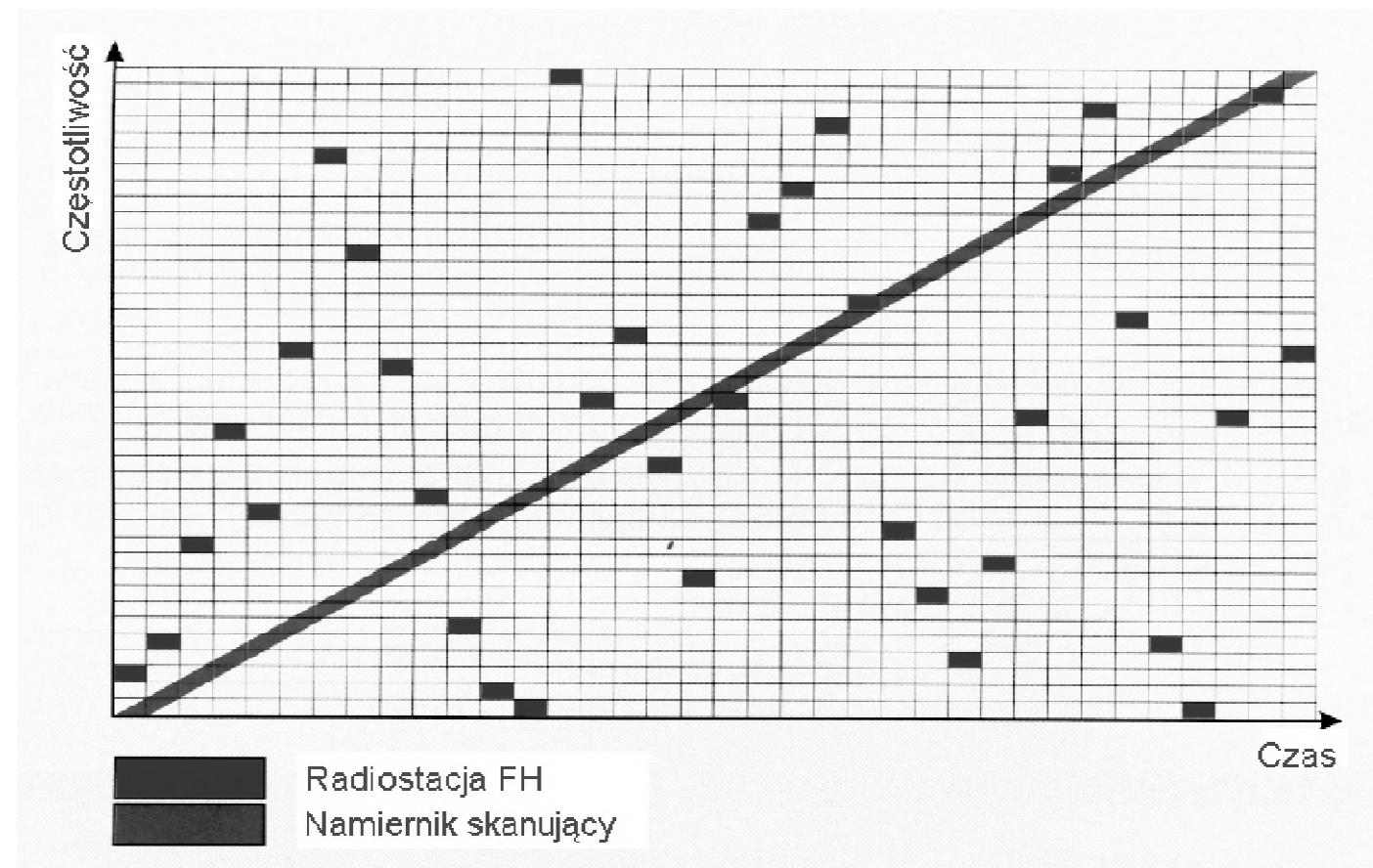
Wykrywanie i analiza sygnałów typu FH – poprawna klasyfikacja

We współczesnych namiernikach radiowych wykrywanie sygnału FH realizuje się metodą szybkiego przeszukiwania (*skanowania*) pasma częstotliwości, w którym pracuje radiostacja FH.



Sposób prezentacji wyników wykrywania i namierzania.

Wykrywanie i analiza sygnałów typu FH – poprawna klasyfikacja



Ilustracja wykrywania sygnału FH przez szybkie skanowanie pasma.

Wykrywanie i analiza sygnałów typu FH – poprawna klasyfikacja

W przedstawionych poniżej zależnościach przyjęto następujące oznaczenia:

dla radiostacji FH:

T_d - czas trwania skoku (równy 1/szybkość skakania);

T_{com} - czas trwania emisji;

dla namiernika skanującego:

S_s - szybkość skanowania;

B_W - szerokość skanowanego pasma;

T_m - czas potrzebny do wykonania pomiaru azymutu.

Wykrywanie i analiza sygnałów typu FH – poprawna klasyfikacja

Prawdopodobieństwo P_1 wykrycia jednego skoku w czasie jego trwania

$P_1 = (\text{pasmo częstotliwości skanowane przez namiernik w czasie trwania jednego skoku radiostacji}) / (\text{szerokość skanowanego pasma})$

$$P_1 = (S_S T_d) / B_W$$

Prawdopodobieństwo $P_{(J/N)}$ wykrycia dokładnie J skoków z liczby N skoków (w czasie trwania emisji)

$$P_{(J/N)} = \frac{N!}{J!(N-J)!} P_1^J (1-P_1)^{N-J}$$

$$\frac{N!}{J!(N-J)!}$$

- liczba wszystkich kombinacji J z N

$$P_1^J$$

- prawdopodobieństwo wykrycia dowolnych J skoków

$$(1-P_1)^{N-J}$$

- prawdopodobieństwo nie wykrycia (N-J) skoków

Wykrywanie i analiza sygnałów typu FH – poprawna klasyfikacja

Prawdopodobieństwo $P_{(>K/N)}$ wykrycia więcej niż K skoków z liczby N skoków (w czasie trwania emisji)

$$P_{(>K/N)} = 1 - \sum_{I=0}^K P_{(I/N)}$$

Całkowita liczba skoków (N) radiostacji zależy od czasu wymiany radiowej (T_{com}) oraz od czasu trwania skoku (T_d): $N = T_{com}/T_d$

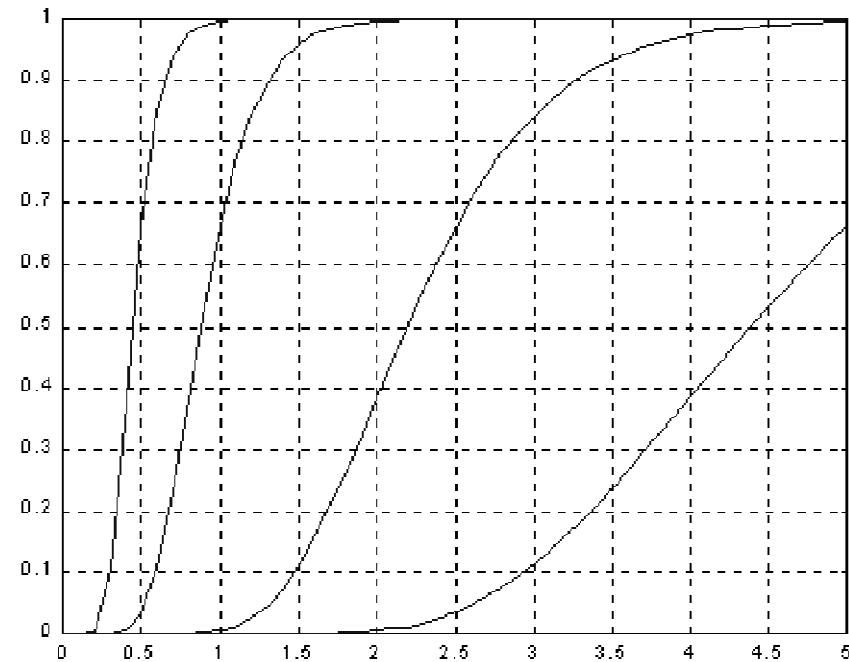
Praktycznie przyjmuje się, że w celu stwierdzenia, że radiostacja pracuje w trybie FH należy wykryć i namierzyć co najmniej 10 jej skoków. Natomiast w celu oszacowania takich parametrów technicznych jak częstotliwość środkowa, czy pasmo skakania, należy oczywiście wykryć i namierzyć większą liczbę skoków.

Wykrywanie i analiza sygnałów typu FH – poprawna klasyfikacja

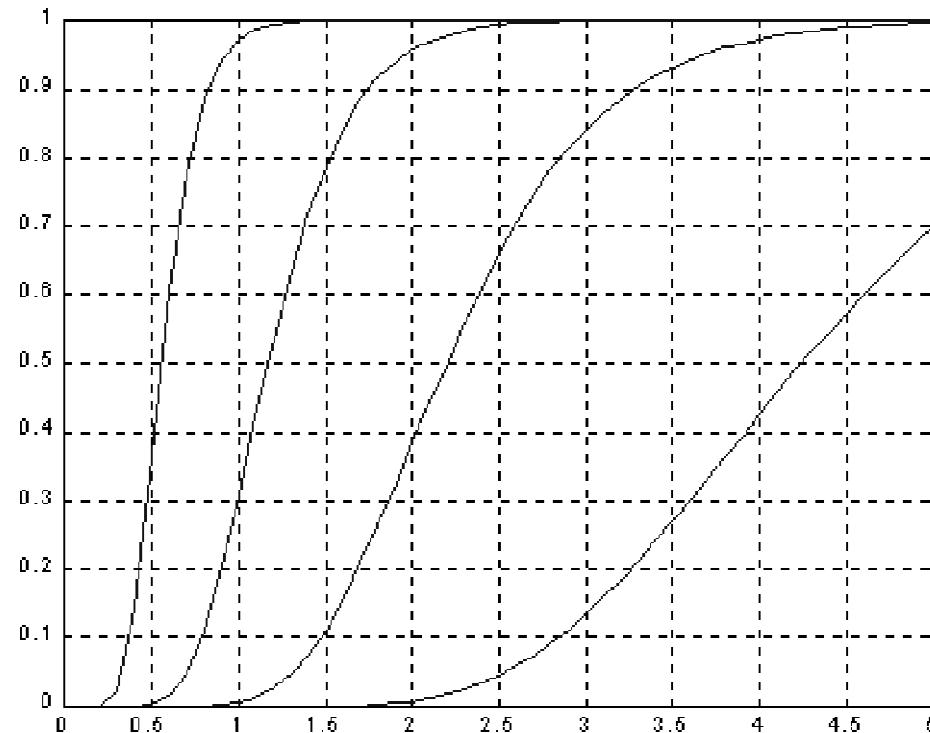
Wyniki obliczeń szybkości klasyfikacji emisji FH.

1. zakres skakania radiostacji FH 5 MHz
 - odstęp między kanałami 25 kHz
 - czas trwania skoku rdst FH 3 ms
 - pasmo skanowania 5 MHz
 - rozdzielczość skanowania 25 kHz
 - czas dostrojenia do kanału 1 ms
 - liczba wykrytych skoków 10

Wpływ szerokości skanowanego pasma na szybkość klasyfikacji sygnału FH, skanowane pasmo:
1, 2, 5; 10 MHz -na wykresie krzywe od lewej do prawej.

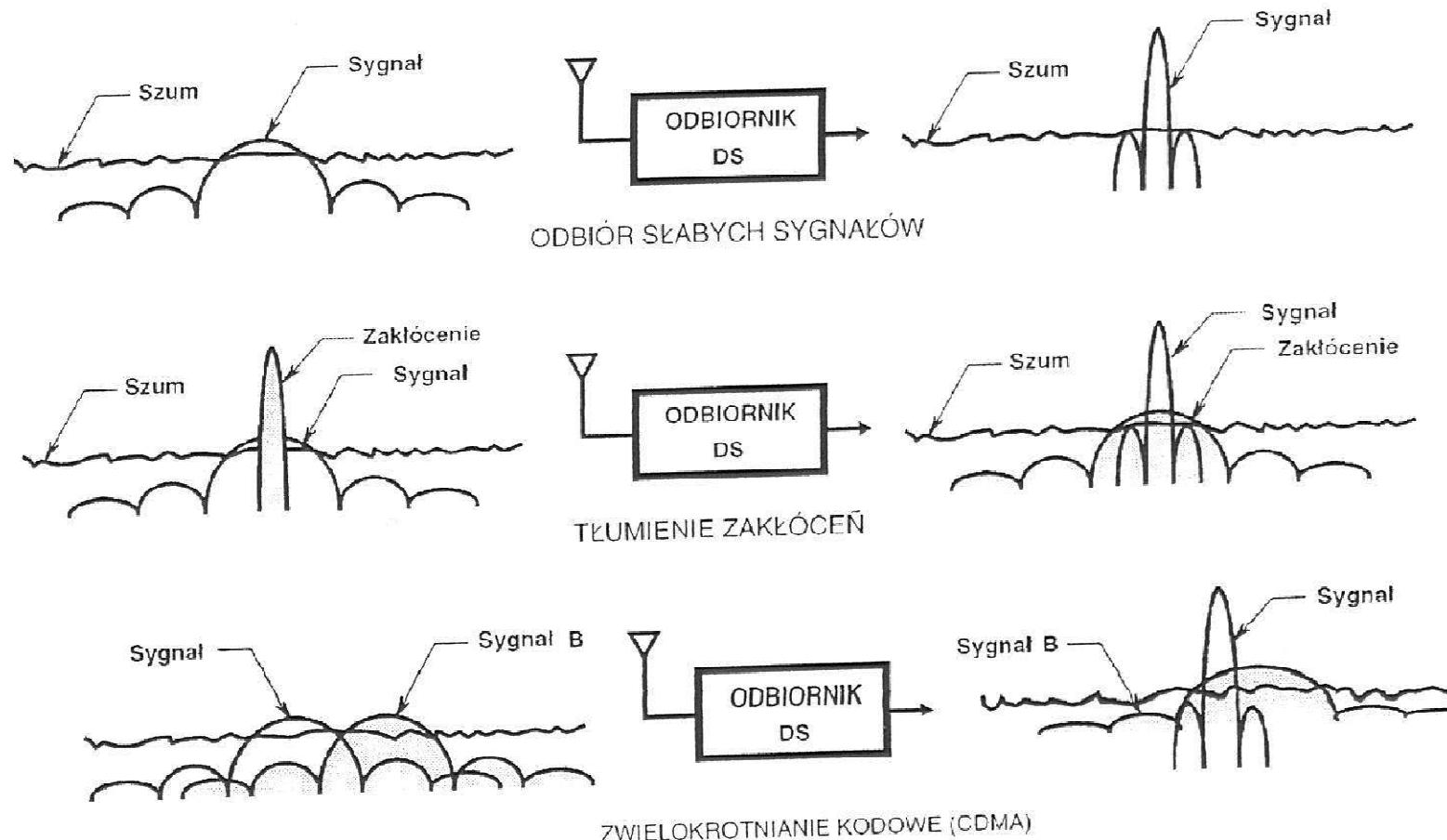


Wykrywanie i analiza sygnałów typu FH – poprawna klasyfikacja



Wpływ czasu dostrojenia namiernika do kolejnych częstotliwości (szybkości przestrajania) na szybkość klasyfikacji sygnału FH, czas przestrojenia na nową częstotliwość: 0.2; 0.5; 1; 2 ms (lub 125; 50; 25; 12.5 MHz/sek) -na wykresie krzywe od lewej do prawej.

WNIOSKI – właściwości modulacji z rozproszonym widmem



DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ