

Technika Bezprzewodowa i Anteny – laboratorium

Instrukcja do laboratorium nr 5

wersja v08

dr inż. Sebastian Kozłowski

**Instytut Radioelektroniki i Technik Multimedialnych
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
POLITECHNIKA WARSZAWSKA
Warszawa 2024**

1. ĆWICZENIE NR 5: WŁAŚCIWOŚCI SYGNAŁÓW Z MODULACJAMI CYFROWYMI	3
1. Cel i zakres ćwiczenia	3
2. Wprowadzenie do ćwiczenia	3
2.1. Schemat blokowy cyfrowego systemu radiowego	3
2.2. Kanał Gaussa	6
2.3. Kanał wąskopasmowy	7
2.4. Efekt Dopplera	8
2.5. Kształtowanie impulsu	9
2.6. Synchronizacja symbolowa	12
3. Stanowiska pomiarowe	15
4. Symulator cyfrowego systemu radiowego	16
5. Przebieg ćwiczenia	18
5.1. Część pomiarowa	18
5.2. Część symulacyjna	18
5.2.1. Brak zniekształceń wnoszonych przez kanał radiowy	18
5.2.2. Kanał AWGN	20
5.2.3. Kanał wąskopasmowy	20
5.2.4. Kanał wąskopasmowy o zmiennym tłumieniu z uwzględnieniem efektu Dopplera	21
6. Literatura pomocnicza	21
7. Zaliczenie	22

1. Ćwiczenie nr 5: właściwości sygnałów z modulacjami cyfrowymi

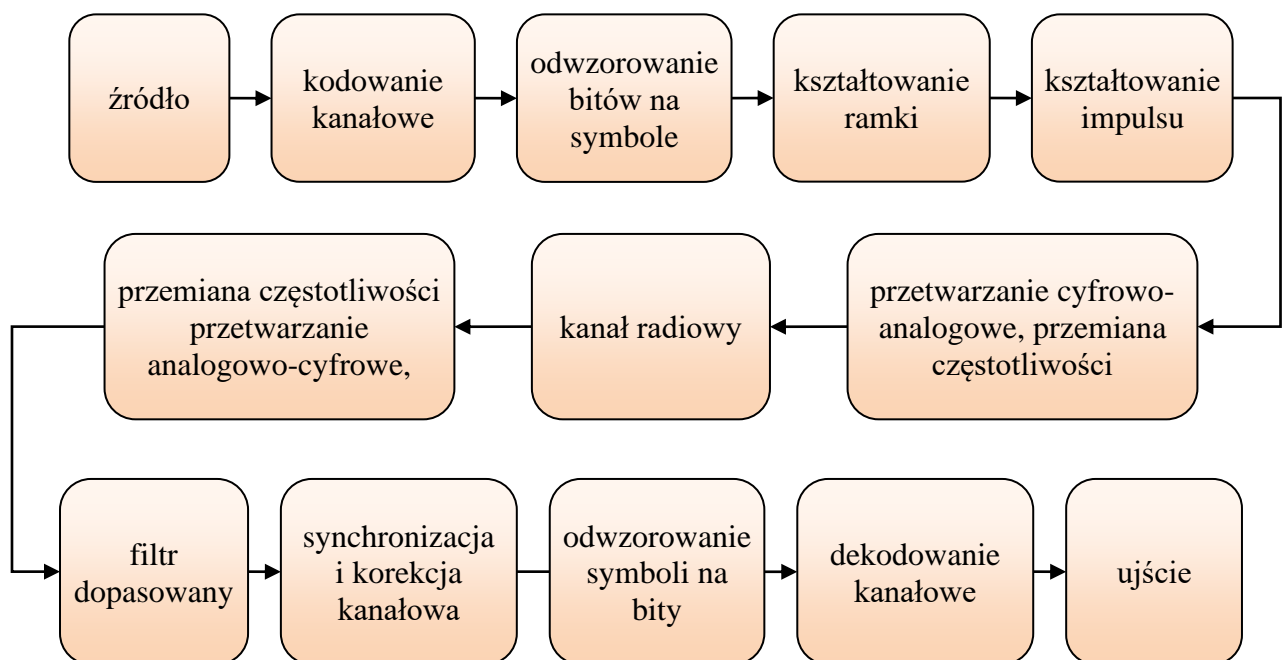
1. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z właściwościami sygnałów z modulacjami cyfrowymi. W ramach laboratorium obserwowany jest wpływ poszczególnych elementów toru radiowego oraz kanału radiowego na przesyłany sygnał.

2. Wprowadzenie do ćwiczenia

2.1. Schemat blokowy cyfrowego systemu radiowego

Ogólny schemat blokowy cyfrowego systemu radiowego został przedstawiony na rys.2.1.



Rys.2.1 Schemat cyfrowego systemu radiowego

Blok oznaczony jako źródło wytwarza strumień bitów niosących informacje, które mają być przesłane drogą radiową. W bloku tym mogą być realizowane operacje takie jak kodowanie źródłowe i multipleksacja, czyli łączenie w jeden szeregowy strumień bitów kilku osobnych strumieni np. audio, video czy danych. Na wyjściowym strumieniu bitów wykonuje się następnie operacje mające na celu zabezpieczenie przesyłanej informacji przed błędami wynikającymi z zakłóceń wprowadzanych przez kanał radiowy. W najprostszym przypadku będzie to

kodowanie kanałowe, przy czym w praktyce często stosuje się kilka następujących po sobie różnych koderów kanałowych i bloków przeplotu (ang. interleaver) dostosowanych do przewidywanych właściwości kanału radiowego. W zależności od standardu transmisji, na dowolnym z dotychczas opisanych etapów przetwarzania do strumienia bitów mogą być wprowadzane dodatkowe bity przenoszące informacje ułatwiające później realizację procesu odbioru. Zakodowany strumień bitów podlega odwzorowaniu („mapowaniu”) na symbole zgodnie z wybranym schematem modulacji. Następnie strumień symboli dzielony jest na ramki, które mogą być uzupełniane pomocniczymi symbolami umożliwiającymi odbiornikowi wykonanie stosowanych pomiarów i usunięcie z odebranego sygnału zniekształceń wprowadzonych przez kanał radiowy. Takie dodatkowe symbole mogą być umieszczone na początku każdej ramki, tworząc tzw. preambułę, mogą znajdować się w środku (midambuła) lub na końcu ramki (postambuła), mogą też być rozrzucone po ramce zgodnie ze znanym w odbiorniku wzorcem. Następnie w bloku kształtowania impulsu za pomocą odpowiedniego filtra dolnoprzepustowego formuje się odpowiednio łagodne przejścia pomiędzy kolejnymi symbolami, co prowadzi do kontrolowanego ograniczenia szerokości pasma przesyłanego sygnału.

Cyfrowy sygnał wyjściowy bloku kształtowania impulsu podawany jest na dwa przetworniki cyfrowo-analogowe, po jednym dla części synfazowej I oraz kwadraturowej Q sygnału. Analogowe sygnały I i Q doprowadzane są do mieszacza kwadraturowego, w którym następuje przemiana częstotliwości w górę. Operacja ta prowadzi do przesunięcia widma sygnału z częstotliwości zerowej na wybraną częstotliwości fali nośnej f_c^1 i można ją rozumieć jako zmodulowanie amplitudy i fazy fali nośnej sygnałami odpowiednio $|I+jQ|$ oraz $\arg(I+jQ)$. Sygnał radiowy stanowiący wynik przemiany częstotliwości jest po wzmocnieniu za pomocą odpowiedniego wzmacniacza mocy doprowadzany do anteny nadawczej.

W analogowej części odbiornika sygnał jest wzmacniany za pomocą wzmacniacza niskoszumnego, po czym wykonywane są operacje odwrotne do wykonywanych w analogowej części nadajnika, tzn. przemiana częstotliwości w dół z rozdzieleniem sygnału na część synfazową i kwadraturową oraz konwersja analogowo-cyfrowa w torach I i Q .

Dalsze przetwarzanie odbywa się na cyfrowym sygnale zespolonym $I+jQ$. Sygnał ten podawany jest na filtr dopasowany, a następnie podawany do bloku synchronizacji i korekcji kanałowej. W bloku tym wykonywane są typowo następujące operacje:

¹ Jest to architektura z pojedynczą przemianą częstotliwości. Istnieją rozwiązania, w których stosuje się więcej stopni.

- Synchronizacja symbolowa. Polega ona na wytypowaniu za pomocą odpowiedniego algorytmu próbek odpowiadających symbolom konstelacji i odrzuceniu próbek odpowiadających przejściom pomiędzy kolejnymi symbolami.
- Synchronizacja częstotliwości fali nośnej. Widmo sygnału na wyjściu mieszacza odbiorczego nigdy nie będzie wyśrodkowane dokładnie na częstotliwości zerowej. Zjawisko to ma dwie przyczyny:
 - Efekt Dopplera.
 - Nieidealność oscylatorów lokalnych generujących sygnały fali nośnej dla mieszaczy nadawczego i odbiorczego. W praktyce częstotliwości tych sygnałów zawsze będą się nieznacznie różniły. Mimo że różnice te mogą wynosić poniżej jednej milionowej częstotliwości nominalnej, są wystarczająco duże, żeby uniemożliwić poprawny odbiór.

Przesunięcie częstotliwości musi być na bieżąco mierzone i eliminowane tak, aby środek widma sygnału odebranego znajdował się dokładnie na częstotliwości zerowej.

- Korekcja amplitudy i fazy. Po zapewnieniu synchronizacji symbolowej i częstotliwościowej uzyskuje się wykres konstelacji, któremu należy przywrócić nominalną amplitudę i fazę.
- Synchronizacja ramkowa. W otrzymanym ciągu symboli należy zidentyfikować granice poszczególnych ramek, a następnie symbole pomocnicze dodane podczas operacji formowania ramek. Symbole te zostały wprowadzone, aby umożliwić wykonanie opisanych powyżej operacji synchronizacji i korekcji i nie niosą żadnej informacji użytecznej dla końcowego użytkownika systemu, dlatego też powinny zostać usunięte.

Po wykonaniu synchronizacji i korekcji kanałowej otrzymuje się strumień symboli, który należy odwzorować na strumień bitów (operacja ta potocznie nazywana jest „demapowaniem” dla zaznaczenia odwrotności do odwzorowywania bitów na symbole - „mapowania”). Ciąg ten podlega następnie dekodowaniu kanałowemu. Jeżeli liczba błędów na wejściu bloku dekodera jest mniejsza od pewnej wartości granicznej, to wszystkie błędy zostaną naprawione i strumień bitów na wyjściu tego bloku będzie tożsamy ze strumieniem bitów wygenerowanym przez źródło. W przeciwnym przypadku pewna liczba błędów pozostanie nieusunięta. W zależności od algorytmów i protokołów zaimplementowanych w bloku oznaczonym na rys.2.1 jako ujście, błędy takie można zignorować, np. godząc się na chwilowe zakłócenie obrazu lub dźwięku, można spróbować je usunąć za pomocą dodatkowego przetwarzania lub też wysłać do nadajnika informację zwrotną z prośbą o powtórne nadanie uszkodzonej części sygnału.

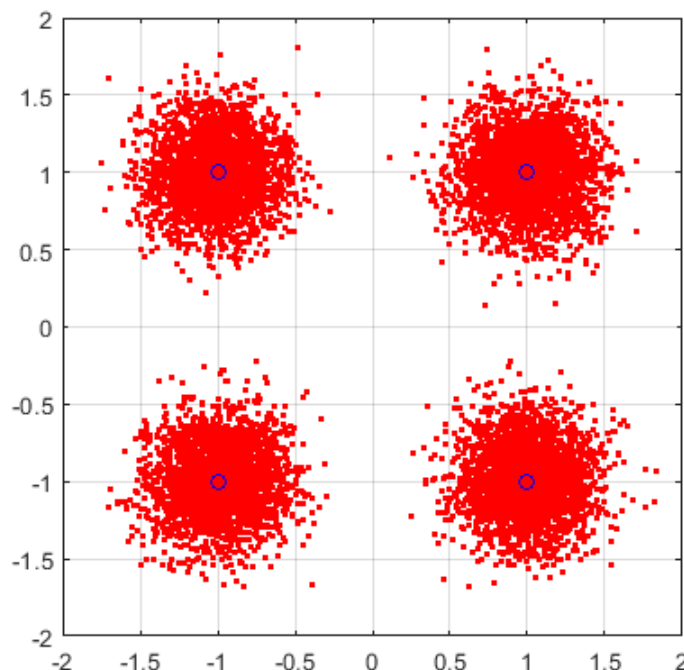
2.2.Kanał Gaussa

Gaussowski model kanału radiowego (kanał AWGN, ang. Additive White Gaussian Noise, addytywny biały szum Gaussa) wyraża się wzorem:

$$y(n) = x(n) + \sqrt{P_n/2} \cdot s(n) \quad (2.1)$$

gdzie $x(n)$ oznacza ciąg próbek sygnału nadawanego w paśmie podstawowym, $y(n)$ – ciąg próbek sygnału odbieranego w paśmie podstawowym, zaś $s(n)$ – ciąg próbek szumu gausowskiego. Części rzeczywista i urojona sygnału szumowego $s(n)$ są niezależnymi zmiennymi losowymi o rozkładzie normalnym o mocy średniej $\sigma_s^2 = 1$ i wartości średniej 0. Można udowodnić, że amplituda sygnału zakłócającego $|\sqrt{P_n/2} \cdot s(n)|$ ma rozkład Rayleigha, faza $\arg(\sqrt{P_n/2} \cdot s(n))$ ma rozkład jednostajny w zakresie $\langle 0, 2\pi \rangle$, natomiast moc średnia wynosi P_n .

Na rys.2.2 przedstawiono wpływ kanału Gaussa na sygnał z modulacją QPSK. Można zaobserwować, że poszczególne symbole (czerwone punkty) nie są zlokalizowane dokładnie w miejscach nominalnych punktów konstelacji (niebieskie okręgi). Na skutek dodawanego w kanale szumu każdy z symboli $y(n)$ jest przesunięty względem swojego nominalnego punktu o wartość $\sqrt{P_n/2} \cdot s(n)$.



Rys.2.2 Wpływ kanału Gaussa na sygnał z modulacją QPSK

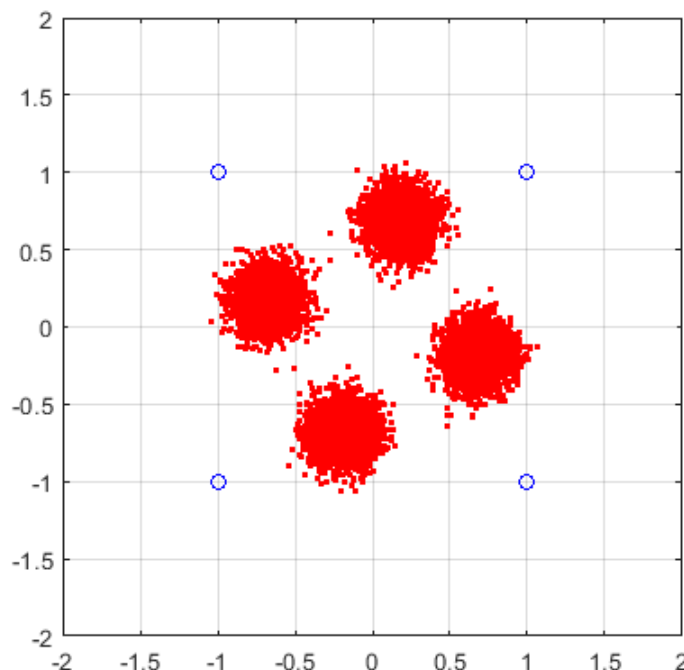
2.3. Kanał wąskopasmowy

Wąskopasmowy kanał radiowy można zdefiniować równaniem:

$$y(n) = h \cdot x(n) + \sqrt{P_n/2} \cdot s(n) \quad (2.2)$$

Znaczenie symboli $x(n)$, $y(n)$, $s(n)$ oraz P_n jest takie same, jak w przypadku równania (2.1), natomiast h jest dolnopasmową zespoloną odpowiedzią impulsową kanału radiowego, nazywaną też w skrócie współczynnikiem kanału. Przyjęto tu założenie, że wartość h nie zależy od czasu (kanał stacjonarny), które jest prawdziwe pod warunkiem, że nadajnik, odbiornik oraz wszystkie elementy środowiska propagacyjnego pozostają nieruchome. W praktyce można przyjąć, że założenie to pozostaje prawdziwe dla krótkiego odcinka czasu, rzędu milisekund. Typowo zakłada się, że kanał radiowy nie zmienia się w czasie transmisji pojedynczej ramki danych.

Na rys.2.3 przedstawiono wpływ kanału wąskopasmowego na sygnał z modulacją QPSK dla $h = 0.5 \cdot e^{j\pi/6}$. Oprócz obecności szumu, który powoduje zastąpienie punktów konstelacji „chmurkami”, można zaobserwować, że konstelacja sygnału odebranego jest przeskalowana o czynnik $|h| = 0.5$ i obrócona o kąt $\arg(h) = \pi/6$. Oba te efekty muszą zostać wyeliminowane w odbiorniku za pomocą odpowiednich algorytmów korekcji amplitudy i fazy.



Rys.2.3 Wpływ kanału wąskopasmowego na sygnał z modulacją QPSK

2.4. Efekt Dopplera

Efekt Dopplera występuje wtedy, gdy zmienia się odległość między nadajnikiem i odbiornikiem, i objawia się przesunięciem częstotliwości odbieranego sygnału o wartość:

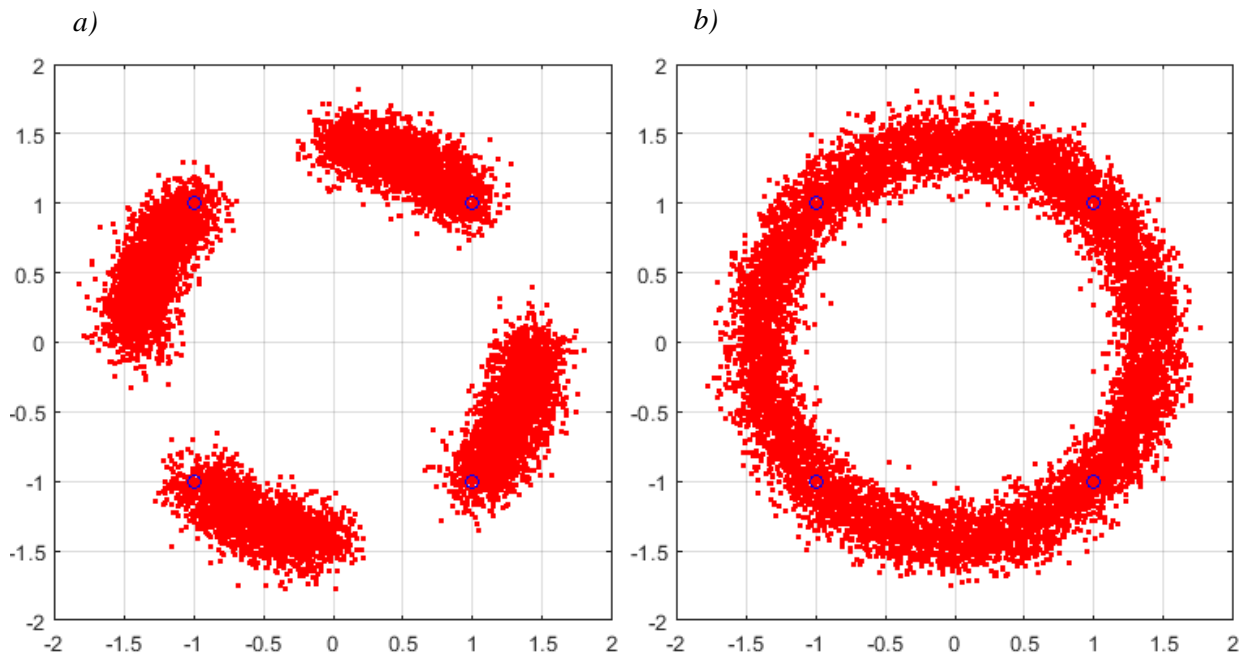
$$\Delta f = \frac{v_r}{c} \cdot f_c \quad (2.3)$$

gdzie v_r jest składową prędkości odbiornika względem nadajnika wzdłuż linii je łączącej, c oznacza prędkość światła, a f_c to częstotliwość sygnału nadawanego. Prędkość v_r jest dodatnia, gdy odbiornik zbliża się do nadajnika, i ujemna w przeciwnym przypadku.

Na wykresie konstelacji sygnału odbieranego efekt Dopplera objawia się obrotem konstelacji zgodnie ze wzorem:

$$y_{Dopp}(n) = y(n) \cdot e^{j \cdot 2\pi n T_s \Delta f} \quad (2.4)$$

gdzie T_s jest okresem próbkowania sygnału $y(n)$. Z postaci równania (2.4) wynika, że w czasie obserwacji Δt konstelacja obróci się o kąt $\psi = 2\pi \Delta f \Delta t$. W związku z tym gdy czas Δt jest krótki, punkty konstelacji zostają zastąpione łukami (rys.2.4a), natomiast w przypadku dłuższych czasów obserwacji – okręgami (rys.2.4b).



Rys.2.4 Wpływ efektu Dopplera na sygnał z modulacją QPSK: a) krótki czas obserwacji, b) długi czas obserwacji

Efekt Dopplera musi być na bieżąco korygowany w odbiorniku, co jest zadaniem trudnym, ponieważ przesunięcie częstotliwości Δf jest zazwyczaj stosunkowo szybkozmienną

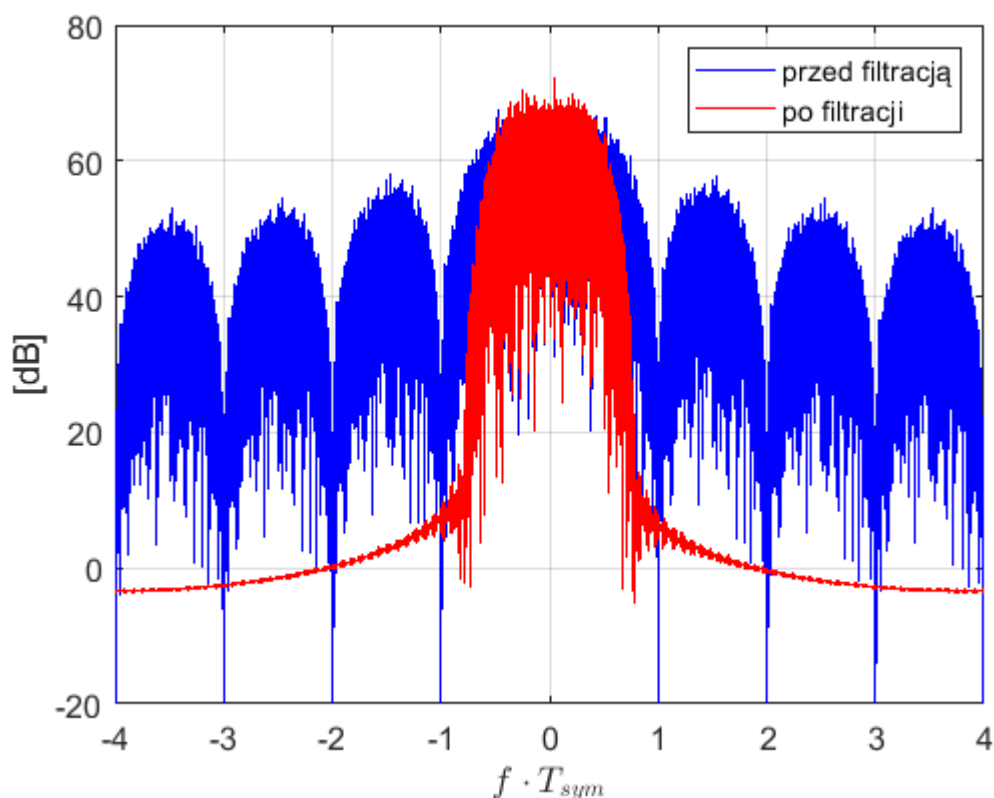
funkcją czasu. Proces śledzenia zmian tej wartości i korekcji obrotu konstelacji nosi nazwę synchronizacji częstotliwości nośnej (ang. carrier recovery).

Należy zauważyć, że zastosowanie algorytmu synchronizacji częstotliwości nośnej spowoduje korekcję nie tylko efektu Dopplera, ale też przesunięcia częstotliwości spowodowanego przez nieidealność oscylatorów lokalnych generujących sygnały fali nośnej dla mieszaczy nadawczego i odbiorczego (p. roz. 2.1). W odbiorniku nie ma możliwości stwierdzenia, z którego z wymienionych zjawisk wynika obserwowany brak synchronizacji częstotliwościowej.

2.5. Kształtowanie impulsu

W wielu rozważaniach dotyczących sygnałów z modulacjami cyfrowymi przyjmuje się w uproszczeniu, że zmodulowany sygnał składa się z ciągu symboli, z których każdy jest odcinkiem kosinusoidy (fali nośnej) o amplitudzie i fazie wynikającej z założonej konstelacji sygnału. W chwili, gdy kończy się jeden symbol i zaczyna kolejny, następuje skokowa zmiana amplitudy i/lub fazy. Na wykresie konstelacji wyglądałoby to w taki sposób, że sygnał pozostaje w wybranym punkcie konstelacji przez czas trwania symbolu T_{sym} , po czym natychmiast przechodzi do innego punktu konstelacji, gdzie ponownie pozostaje przez czas T_{sym} , itd.

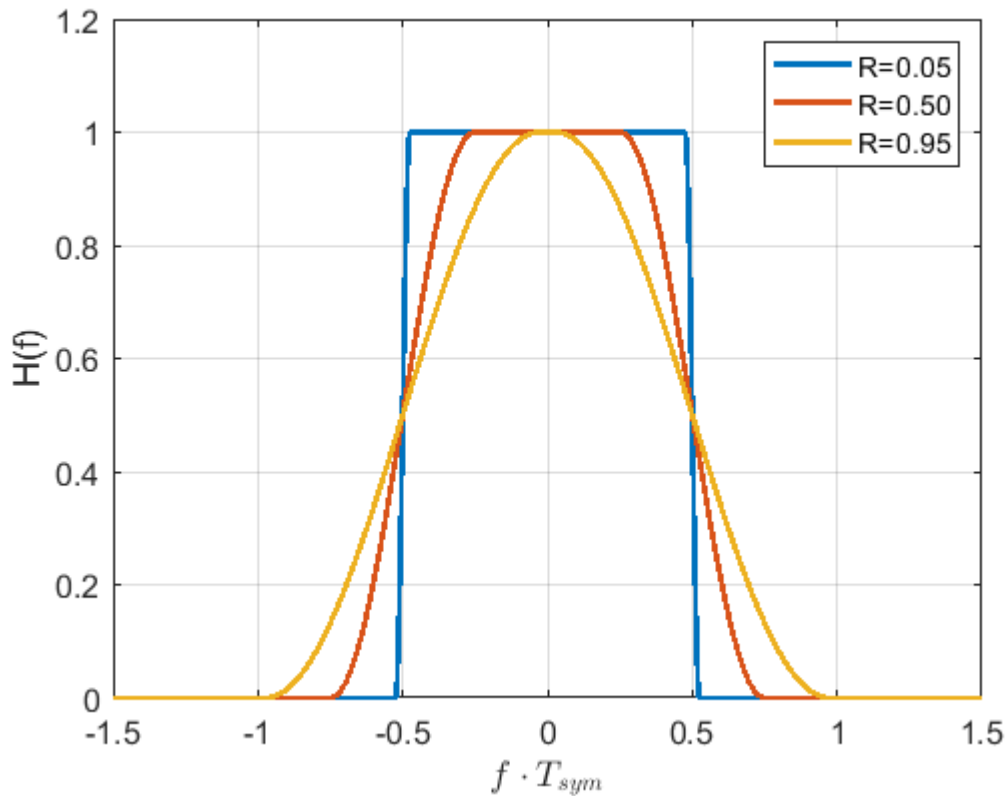
Sygnał o opisanym powyżej przebiegu charakteryzuje się widmem przedstawionym na rys.2.5 kolorem niebieskim. Widmo to składa się z listka głównego o szerokości $2/T_{sym}$ oraz powoli zanikających listków bocznych. Przesłanie sygnału o tak szerokim paśmie drogą radiową byłoby zarówno trudne z przyczyn technicznych, jak i nieopłacalne za względu na konieczność zajęcia szerokiego zakresu częstotliwości na potrzeby transmisji o stosunkowo niewielkiej prędkości. W związku z powyższym sygnał nadawany musi zostać poddany filtracji dolnoprzepustowej, która w kontrolowany sposób ograniczy jego pasmo. Operację taką nazywamy kształtowaniem impulsu (ang. pulse shaping).



Rys.2.5 Widmo sygnału przed i po filtracji dolnoprzepustowej

Sygnał po filtracji powinien nadal reprezentować ciąg symboli zgodnych z założonym schematem modulacji. Spełnienie tego warunku wymaga, aby zastosowany filtr posiadał pewne specjalne właściwości. Jednym z najczęściej stosowanych filtrów jest filtr podniesionego kosinusa² (ang. raised cosine) o transmitancji przedstawionej na rys.2.6. Współczynnik poszerzenia pasma R (ang. roll-off) pozwala regulować szerokość pasma przepustowego filtra, która zmienia się od $1/T_{sym}$ dla $R \rightarrow 0$ do $2/T_{sym}$ dla $R \rightarrow 1$.

² W modulacjach częstotliwościowych stosuje się tu powszechnie filtr Gaussa, który nie będzie omawiany w ramach niniejszego laboratorium.



Rys.2.6 Transmitancja filtra podniesionego kosinusa w zależności od współczynnika R .

Po operacji kształtowania impulsu uzyskuje się widmo zaznaczone na rys.2.5 kolorem czerwonym. Ze względu na niski poziom listków bocznych można przyjąć, że cała energia sygnału skupiona jest w listku głównym o szerokości:

$$B = \frac{1+R}{T_{sym}} \quad (2.5)$$

W praktyce filtrację dolnoprzepustową realizuje się nie za pomocą pojedynczego filtra podniesionego kosinusa w nadajniku, a za pomocą zespołu dwóch filtrów o transmitancji „pierwiastek z podniesionego kosinusa” (ang. square-root raised cosine). Jeden z tych filtrów znajduje się w nadajniku i pełni funkcję układu kształtowania impulsu, a drugi umieszczony jest w odbiorniku w charakterze filtra dopasowanego (rys.2.7). Dwa układy o transmitancjach $\sqrt{H(f)}$ połączone szeregowo można zastąpić układem zastępczym o transmitancji:

$$\sqrt{H(f)} \cdot \sqrt{H(f)} = H(f) \quad (2.6)$$

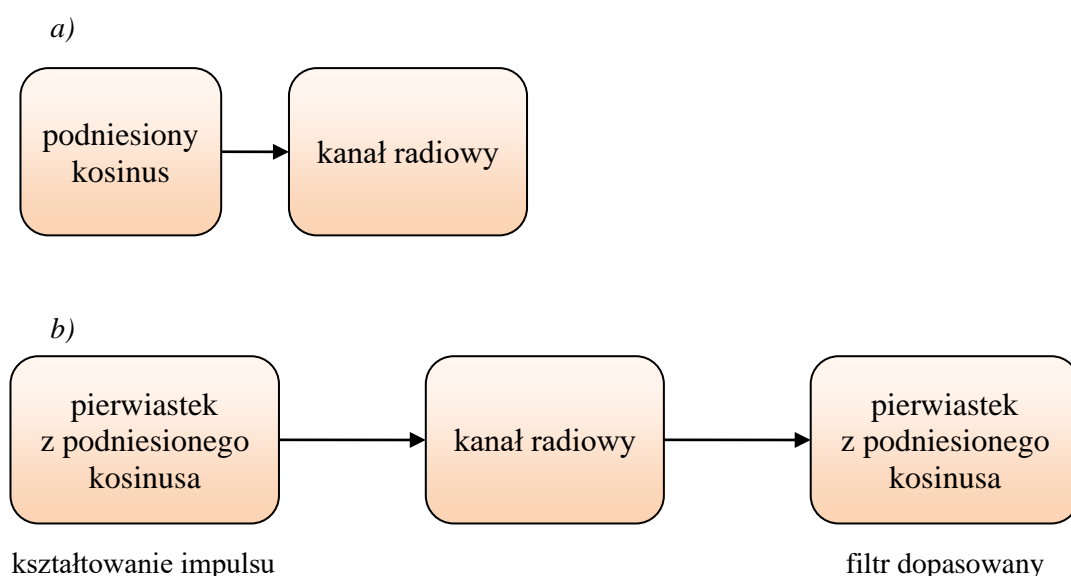
w związku z czym sygnał na wyjściu filtra dopasowanego ma taką postać, jakby został przefiltrowany za pomocą pojedynczego filtra podniesionego kosinusa.

Zarówno filtr „podniesiony kosinus”, jak i „pierwiastek z podniesionego kosinusa”, mają odpowiedź impulsową o nieskończonej ilości współczynników, w związku z czym

w praktycznych realizacjach konieczne jest jej ograniczenie. Liczbę współczynników reguluje się parametrem nazywanym opóźnieniem filtra d i wynosi ona:

$$L = 2du + 1 \quad (2.7)$$

gdzie u jest współczynnikiem nadpróbkowania sygnału, czyli liczbą próbek przypadających na czas trwania symbolu T_{sym} . Im mniejszy współczynnik poszerzenia pasma R , tym większa powinna być długość odpowiedzi impulsowej L . Przyjęcie zbyt małej długości L prowadzi do zniekształcenia sygnału wyraźnie widocznego na wykresie konstelacji, a z drugiej strony implementacja filtra o długiej odpowiedzi impulsowej wymaga zastosowania urządzeń o odpowiednio dużej mocy obliczeniowej, co przekłada się m. in. na pobór prądu.

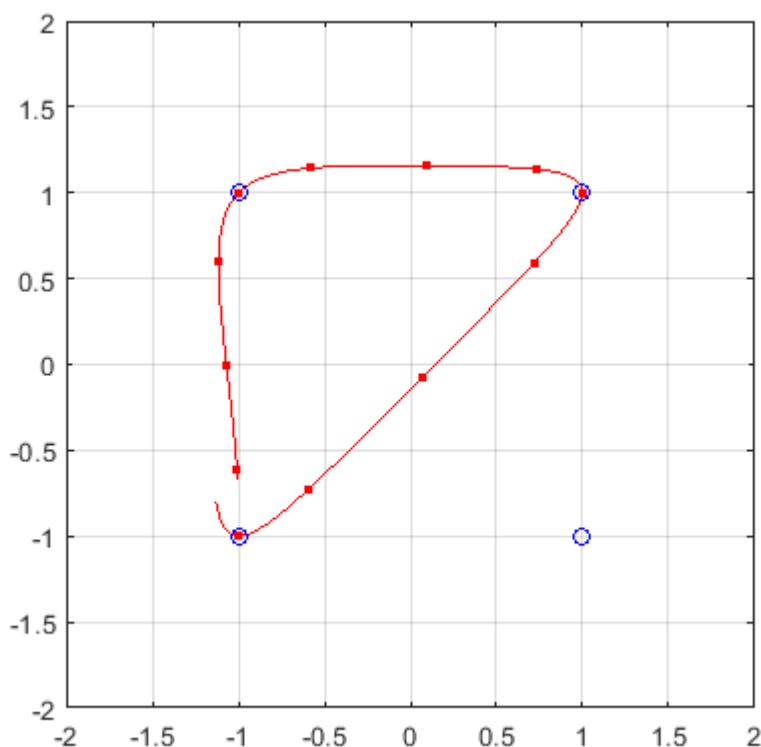


Rys.2.7 Teoretyczny (a) i praktyczny (b) sposób ograniczania pasma sygnału przesyłanego w cyfrowym systemie radiowym

2.6. Synchronizacja symbolowa

W wyniku działania filtra kształtowania impulsu w nadajniku oraz filtra dopasowanego w odbiorniku przejścia pomiędzy kolejnymi symbolami nie następują natychmiast – zajmują czas o długości T_{sym} . Ponadto odbierany sygnał przedstawiony na płaszczyźnie zespolonej „przechodzi” przez nominalne punkty konstelacji nie zatrzymując się w nich (rys.2.8). Oznacza to, że zbiór zebranych przez odbiornik próbek sygnału zawiera zarówno próbki reprezentujące symbole, jak i próbki reprezentujące przejścia pomiędzy kolejnymi symbolami. Te pierwsze należy zidentyfikować i przekazać do bloku odwzorowania symboli na bity (rys.2.1), a te drugie odrzucić jako nieniosące żadnej użytecznej informacji. Proces wyboru próbek odpowiadających

symbolom nazywa się synchronizacją symbolową (ang. symbol timing recovery), a proces odrzucania pozostałych próbek – decymacją sygnału.

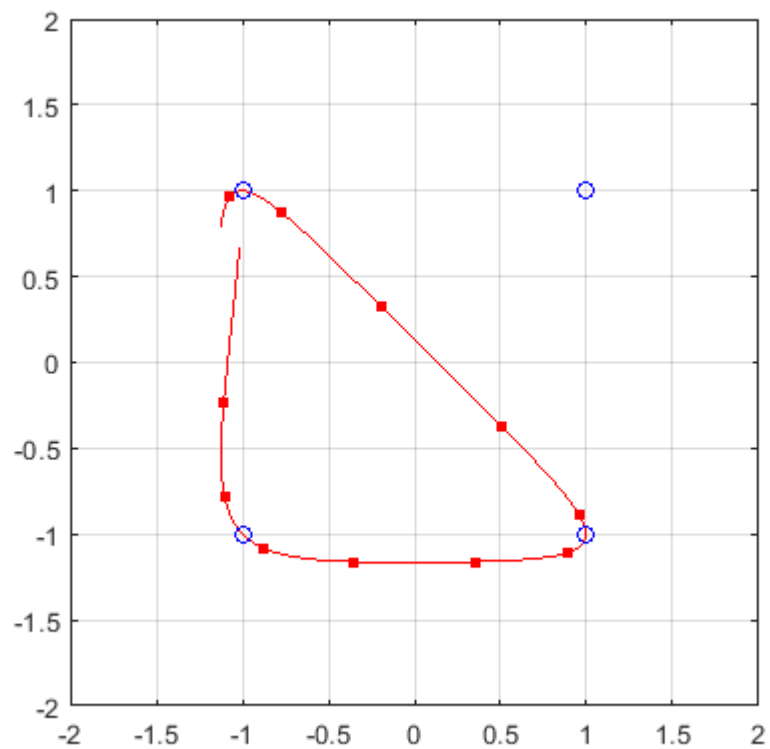


Rys.2.8 Przebieg sygnału z modulacją QPSK na płaszczyźnie zespolonej przy współczynniku nadpróbkowania 4 próbki/symbol.

Rys.2.8 przedstawia korzystną, ale mało prawdopodobną sytuację, w której odebrany sygnał został spróbkowany dokładnie w chwilach przejścia przez punkty konstelacji. Na rys.2.9 przedstawiono sytuację typową, w której algorytm synchronizacji symbolowej może wybrać co najwyżej próbki *najbliższe* punktom konstelacji, w wyniku czego sygnał po decymacji będzie obciążony pewnym błędem. Jeżeli błąd ten uznamy za nieakceptowalnie duży, można go zmniejszyć na dwa sposoby:

1. Wykonując cyfrową interpolację sygnału przed podaniem go do układu synchronizacji symbolowej tak, aby na jeden symbol przypadała duża liczba próbek, np. 64. Jedna z tych próbek będzie znajdować się wystarczająco blisko nominalnego punktu konstelacji.
2. Przesuwając fazę zegara układu próbkującego tak, aby uzyskać sytuację przedstawioną na rys.2.8.

Pierwsza z wymienionych metod wymaga posiadania urządzenia o mocy obliczeniowej niezbędnej do implementacji interpolatora i przetworzenia sygnału o zwiększonej częstotliwości próbkowania, druga natomiast wiąże się z ingerencją w część sprzętową odbiornika.



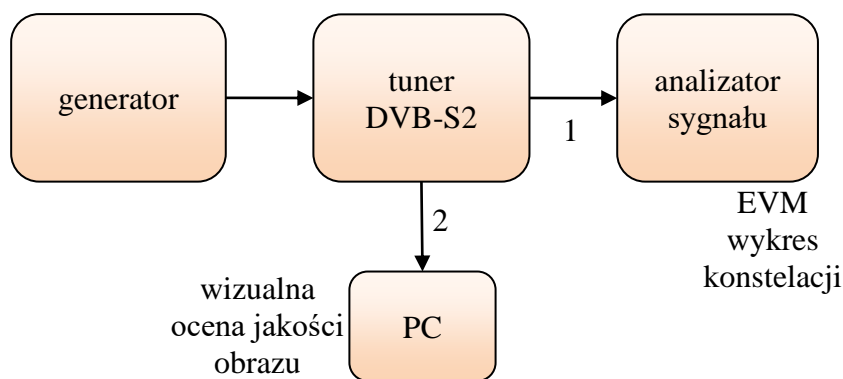
Rys.2.9 Przebieg sygnału z modulacją QPSK na płaszczyźnie zespolonej przy współczynniku nadpróbkowania 4 próbki/symbol – brak próbek odpowiadających punktom konstelacji

3. Stanowiska pomiarowe

Rys.3.1 przedstawia schemat blokowy stanowiska pomiarowego wykorzystywanego na laboratorium. Stanowisko składa się z generatora sygnału telewizyjnego satelitarnej w standardzie DVB-S2, tunera DVB-S2, analizatora sygnału oraz komputera PC.

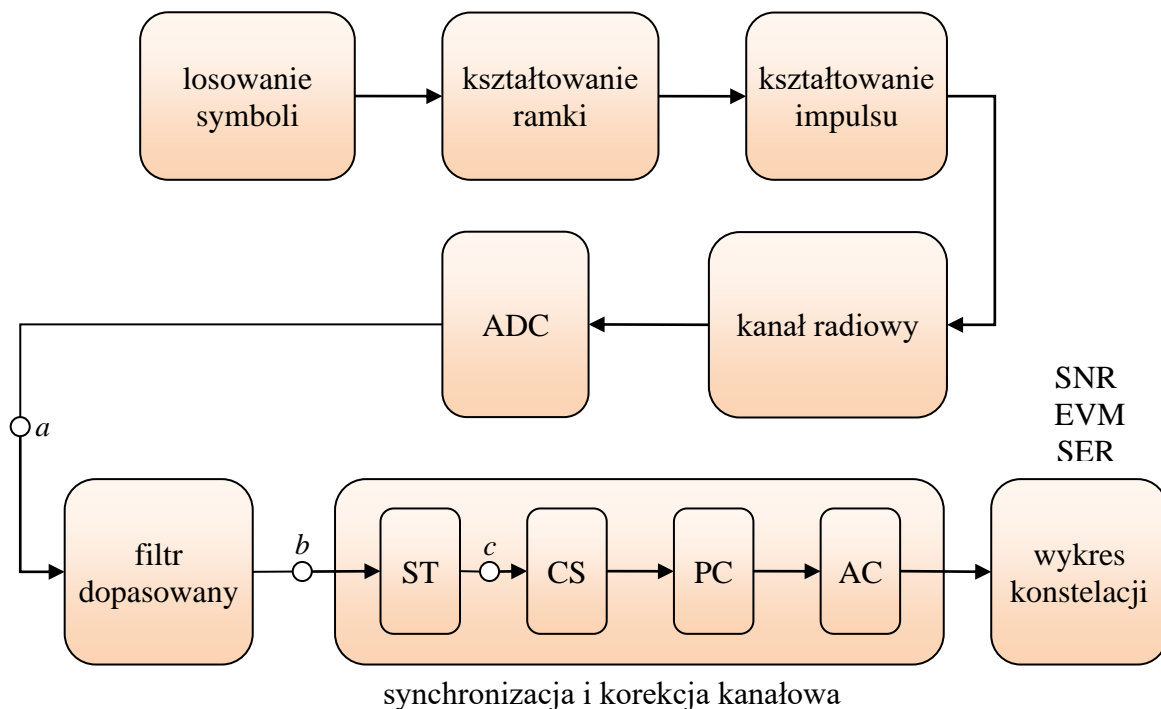
Standard DVB-S2 przewiduje wiele trybów transmisji różniących się odpornością na zakłócenia wprowadzane w kanale radiowym. Tryby te różnią się schematem modulacji (od QPSK do 32-QAM) oraz sprawnością kodowania kanałowego (od 0.25 do 0.9). Generator umożliwia użytkownikowi wybór trybu oraz dodanie do sygnału sztucznie wygenerowanego szumu w celu uzyskania pożądanego stosunku sygnał-szum.

Tuner DVB-S2 posiada dwa wyjścia. Sygnał na wyjściu nr 1 jest niezmiennym sygnałem wejściowym podawanym do analizatora, który udostępnia szereg informacji dotyczących odbieranego sygnału satelitarnego, m. in. wykres konstelacji i błąd EVM, zdefiniowany w następnym rozdziale. Na wyjście nr 2 wystawiany jest sygnał cyfrowy po demodulacji i zdekodowaniu. Sygnał ten jest dostarczany do komputera PC, na którego monitorze wyświetlany jest film przenoszony przez analizowany sygnał satelitarny. Umożliwia to wizualną ocenę jakości obrazu w zależności od różnych ustawień generatora, w szczególności od zadanej przez użytkownika mocy szumu.



Rys.3.1 Schemat blokowy stanowiska pomiarowego

4. Symulator cyfrowego systemu radiowego



Rys.4.1 Schemat symulatora cyfrowego systemu radiowego: ST – synchronizacja symbolowa, CS – synchronizacja częstotliwości nośnej, PC – korekcja fazy, AC – korekcja amplitudy

Na laboratorium wykorzystywany jest symulator cyfrowego systemu radiowego o schemacie blokowym przedstawionym na rys.4.1 (por. rys.2.1). Symulator operuje na poziomie przetwarzania symboli, a nie bitów, w związku z czym:

- Źródło bitów, koder kanałowy i blok odwzorowania bitów na symbole zostały zastąpiony blokiem losowania symboli.
- Symbole uzyskane z bloku synchronizacji i korekcji kanałowej nie są dalej przetwarzane, tylko wykreślane w postaci konstelacji.

Blok synchronizacji i korekcji kanałowej obejmuje wykonywane kolejno operacje synchronizacji symbolowej wraz z decymacją (ST), synchronizacji częstotliwości nośnej (CS), korekcji fazy (PC) i korekcji amplitudy (AC). Działanie przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC) po stronie odbiorczej zasymulowano wykorzystując fakt, że nadajnik operuje na sygnale o większej częstotliwości próbkowania niż odbiornik. Blok ADC realizuje de facto operację wyboru co n -tej próbki sygnału wejściowego, gdzie n jest ustalonym parametrem symulacji, a więc pełni funkcję decymatora (którego nie należy mylić z decymatorem zaimplementowanym w bloku ST).

Symulator oferuje, oprócz wykresu konstelacji, również podgląd sygnałów w punktach a , b i c w postaci przebiegu sygnału na płaszczyźnie zespolonej, przebiegu składowej synfazowej w funkcji czasu oraz widma. Ponadto na podstawie wykresu konstelacji obliczane są następujące parametry:

- Symbolowa stopa błędów (SER – ang. Symbol Error Rate) – odsetek błędnie odebranych symboli;
- Stosunek sygnał-szum (SNR, ang. Signal-to-Noise Ratio);
- Parametr EVM (ang. Error Vector Magnitude). Jest to miara stosunku promienia „chmurki” do rozmiaru konstelacji, obliczana na podstawie wzoru (4.1)

$$EVM[\%] = \sqrt{\frac{\sum_i^N |s_i - k_i|^2}{N}} \cdot \frac{1}{\sqrt{P}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

gdzie s_i oznacza i -ty odebrany symbol, k_i oznacza nominalny punkt konstelacji dla tego symbolu, P oznacza średnią moc konstelacji, a N jest liczbą symboli uwzględnionych przy obliczaniu wartości parametru EVM.

5. Przebieg ćwiczenia

5.1. Część pomiarowa

1. Poprosić prowadzącego o ustawienie właściwego trybu transmisji, tj. modulacji QPSK i kodowania o sprawności 9/10 (**Uwaga!** Nie należy samodzielnie rekonfigurować nadajnika).
2. Wypełnić drugi wiersz tab. 1 zamieszczonej w szablonie sprawozdania (wartość parametru EVM). Dokonać wizualnej oceny jakości odbieranego obrazu dla kolejnych zakresów wartości parametru C/N (stosunek mocy sygnału do mocy szumu). Czy pogarszanie się jakości obrazu wraz ze spadkiem stosunku C/N ma charakter stopniowej degradacji, czy zmiany skokowej?
3. Poprosić prowadzącego o zmianę sprawności kodu na 1/4 i powtórzyć eksperyment do momentu całkowitej utraty obrazu. Skomentować obserwacje.

5.2. Część symulacyjna

Uruchomić symulator, po czym wykonać poniższe polecenia. **Uwaga!** Wymagany jest Matlab w wersji R2019b lub nowszej.

5.2.1. Brak zniekształceń wnoszonych przez kanał radiowy

4. Wybrać odpowiedni model kanału radiowego – „none”. Wyłączyć synchronizację częstotliwości nośnej, korekcję fazy i korekcję amplitudy. Obejrzyć wykresy wszystkich dostępnych konstelacji dla filtra o współczynniku poszerzenia pasma $R=0.95$ i opóźnieniu $d=3$ symbole.
5. Dla wybranej modulacji obejrzyć wykres konstelacji dla wszystkich dostępnych filtrów. Zanotować wartości EVM i SNR. Jak zmienia się stopień zniekształcenia konstelacji w zależności od wartości współczynnika poszerzenia pasma R przy ustalonym opóźnieniu d ? Jak zmienia się stopień zniekształcenia konstelacji w zależności od opóźnienia d przy ustalonej wartości współczynnika poszerzenia pasma R ? Czy któryś z filtrów można uznać za źle zaprojektowany i jeżeli tak, to dlaczego i co należy poprawić? Jaka powinna być wartość opóźnienia d , aby uzyskać idealną konstelację ($EVM=0\%$, $SNR=\infty$ dB) ?
6. Dla modulacji QPSK i filtra o parametrach $R=0.95$, $d=3$ obejrzyć wykres konstelacji przy wyłączonym filtrze dopasowanym (MF). Czy odfiltrowanie części pasma sygnału za pomocą filtra „podniesiony kosinus” zniekształca w istotny sposób wykres konstelacji? Czy odfiltrowanie części pasma sygnału za pomocą filtra „pierwiastek z podniesionego kosinusa” zniekształca w istotny sposób wykres konstelacji?

Uwaga: proszę przypomnieć sobie, gdzie w rozważanym torze radiowym znajdują się filtry, jakiego typu są to filtry i który z nich wyłączamy.

7. Włączyć filtr dopasowany (MF). Obejrzyć i skomentować przebieg sygnału na płaszczyźnie IQ na wyjściu filtra dopasowanego (plot type: mf-iq) dla wszystkich dostępnych schematów modulacji oraz filtrów:
 - $R=0.95$, $d=3$
 - $R=0.50$, $d=5$
 - $R=0.20$, $d=5$

Przebiegi sygnałów dla modulacji QPSK oraz filtrów $R=0.20$, $d=5$ i $R=0.95$, $d=3$ umieścić w sprawozdaniu. W komentarzu należy zwrócić szczególną uwagę na kształt linii reprezentujących przejścia między kolejnymi symbolami. Omówić również przypadek, w którym nadawane są kolejno dwa takie same symbole. Czy kształt linii reprezentujących przejścia między kolejnymi symbolami ma istotny wpływ na wykres konstelacji (plot type: const)?

Uwaga: w przypadku, gdy wykres jest nieczytelny z powodu zbyt dużej liczby wyświetlanych próbek, należy skrócić długość obserwowanej ramki za pomocą suwaka w zakładce „Plot”.

8. Dla modulacji QPSK i filtra o parametrach $R=0.20$, $d=5$ obejrzyć przebieg sygnału na wyjściu filtra dopasowanego (plot type: mf-iq). Zidentyfikować próbki odpowiadające symbolom i próbki tworzące przejścia między kolejnymi symbolami. Policzyc, ile próbek przypada na czas trwania symbolu (1 próbka reprezentująca symbol + pewna liczba próbek reprezentujących przejście do następnego symbolu).
9. Powtórzyć poprzedni punkt dla innych schematów modulacji. Skomentować obserwacje.
10. Ustawić filtr o parametrach $R=0.95$, $d=3$ i zmienić tryb synchronizacji symbolowej na ręczny („manual”). Zasymulować błąd synchronizacji symbolowej – wprowadzić opóźnienie momentu próbkowania symbolu przez blok ST w stosunku do właściwego momentu próbkowania (pole „delay”). Należy pamiętać, że zmiana wartości parametru „delay” **nie wpływa** na współczynnik decymacji, który zależy jedynie od liczby próbek przypadających na jeden symbol, wyznaczonej w punktach 8-9. Obserwacji dokonać dla błęd wynoszącego 1, 2 i 3 próbki. Obejrzyć wykresy wszystkich dostępnych konstelacji. Zamieścić w sprawozdaniu dowolnie wybrany z tych wykresów i szczegółowo wyjaśnić (nie wystarczy opisać!) jego kształt.

Uwaga: wykres konstelacji (plot type: const) należy obserwować dla maksymalnej długości ramki (suwak w zakładce „Plot” ustawiony na 100%, wyłączone dzielenie przez 50).

11. Powtórzyć eksperyment z poprzedniego punktu dla innych filtrów. Czy współczynnik poszerzenia pasma ma wpływ na odporność systemu na błędy synchronizacji symbolowej? Ocenic na podstawie odległości symboli od granic obszarów decyzyjnych dla błędu wynoszącego 1 próbkę.

5.2.2. Kanał AWGN

12. Przywrócić automatyczną synchronizację symbolową. Wybrać odpowiedni model kanału radiowego – „AWGN”. Dla wszystkich dostępnych schematów modulacji zwiększać poziom szumu do momentu pojawienia się błędów transmisji, obserwując równocześnie wykres konstelacji. Przyjąć, że bezbłędna transmisja ma miejsce wtedy, gdy podczas 10-sekundowej obserwacji symbolowa stopa błędów SER jest równa zero. Zanotować graniczne wartości EVM i SNR.

Uwaga: pomiar SER należy wykonywać dla maksymalnej długości ramki (suwak w zakładce „Plot” ustawiony na 100%, wyłączone dzielenie przez 50).

13. Ustawić poziom szumu na -5 dB. Wyświetlić widmo sygnału na wyjściu filtra dopasowanego (plot type: mf-spectrum) w takim powiększeniu, aby dokładnie było widać listek główny. Opisać, czy i ewentualnie jak schemat modulacji oraz rodzaj filtra wpływają na:

- kształt (różnice w stosunku do idealnego prostokąta)
- szerokość głównego listka widma.

Dla wartości parametru $R=0.5$ lub 0.2 zamieścić wykres widma w sprawozdaniu, zmierzyć szerokość głównego listka widma i obliczyć czas trwania symbolu (w μs) oraz częstotliwość symbolową (w Msym/s). Podać w sprawozdaniu parametry filtra, dla którego wykonano obliczenia. Pomiar szerokości listka głównego należy wykonać posługując się narzędziem „data tip” – ikona komiksowego „dymka” dostępna na pasku narzędzi znajdującym się nad wykresem po prawej stronie.

14. Odtworzyć warunki zaobserwowane podczas wykonywania części pomiarowej, tzn. ustawić odpowiedni schemat modulacji i zmieniać poziom szumu tak, aby uzyskać kolejne **wartości EVM** zapisane w tab.1. Uzupełnić trzeci i czwarty wiersz tabeli 1. Skomentować zależność pomiędzy stopą błędów na wyjściu bloku synchronizacji i korekcji kanałowej (SER) a jakością obrazu. W szczególności należy podać szacunkową wartość symbolowej stopy błędów, powyżej której odbiór obrazu jest niemożliwy.

5.2.3. Kanał wąskopasmowy

15. Wybrać odpowiedni model kanału radiowego – „narrowband”. Ustawić poziom szumu na -20 dB. Ustawić filtr o parametrach $R=0.50$, $d=5$. Wyłączyć korekcję amplitudy, korekcję

częstotliwości nośnej oraz korekcję fazy. Opisać zniekształcenia konstelacji i zidentyfikować ich źródło. Dla wszystkich dostępnych schematów modulacji włączać po kolei **korekcję amplitudy** oraz **korekcję fazy**. Wyjaśnić zaobserwowane zjawiska.

5.2.4. Kanał wąskopasmowy o zmiennym tłumieniu z uwzględnieniem efektu Dopplera

16. Wybrać odpowiedni model kanału radiowego – „Doppler”. Ustawić poziom szumu na -20 dB. Ustawić filtr o parametrach $R=0.50$, $d=5$. Wyłączyć synchronizację częstotliwości nośnej, korekcję amplitudy oraz korekcję fazy. Obejrzyć wykresy konstelacji dla wszystkich dostępnych schematów modulacji. Wyjaśnić, dlaczego dla różnych schematów modulacji obserwujemy różną liczbę okręgów. Wskazówek może tu dostarczyć zachowanie konstelacji dla różnych czasów obserwacji sygnału (suwak w zakładce „Plot”).
17. Dla wszystkich dostępnych schematów modulacji włączać po kolei:
- korekcję amplitudy
 - korekcję częstotliwości nośnej
 - korekcję fazy.

Skomentować wynik korekcji częstotliwości nośnej.

18. Ustawić poziom szumu na najniższą dopuszczalną wartość. **Wyłączyć** synchronizację częstotliwości nośnej, **włączyć** korekcję amplitudy oraz korekcję fazy. Posługując się wykresami konstelacji oraz przebiegu czasowego składowej synfazowej na wyjściu filtra dopasowanego, obliczyć wartość przesunięcia Dopplera. Wykresy, dane oraz wszystkie obliczenia zawrzeć w sprawozdaniu.

Wskazówki: Suwakiem w zakładce „Plot” można regulować długość wyświetlanej na wykresach ramki symboli, a więc po prostu czas obserwacji. Suwak wyskalowany jest w procentach maksymalnej długości ramki dopuszczalnej w programie. Długość ramki w sekundach można odczytać z dowolnego wykresu czasowego, np. przebiegu czasowego składowej synfazowej na wyjściu filtra dopasowanego. Kąt obrotu konstelacji można odczytać z wykresu konstelacji.

6. Literatura pomocnicza

- [1] K. Wesołowski, „Systemy radiokomunikacji ruchomej”, WKiŁ, 2006
- [2] S. Haykin, „Systemy telekomunikacyjne”, WKiŁ, 2004
- [3] K. Wesołowski, „Podstawy cyfrowych systemów telekomunikacyjnych”, WKiŁ, 2003

7. Zaliczenie

Laboratorium zaliczane jest na podstawie wyniku kolokwium wstępnego (3 pkt.) i sprawozdania zgodnego z załączonym szablonem (7 pkt.). Wynik laboratorium jest wyznaczany jako suma punktów z kolokwium wstępnego i sprawozdania.