

Symulacja systemu radiokomunikacyjnego - Projekt

Należy przygotować model symulacyjny systemu radiokomunikacyjnego. Tor transmisyjny symulowanego systemu składa się z modułu nadajnika, modułu kanału transmisyjnego oraz modułu odbiornika. Dodatkowo model symulacyjny zawiera elementy pozwalające na obserwację i ocenę jakości transmisji w wybranych punktach toru przetwarzania sygnału. Główną miarą jakości transmisji jest parametr **BER** (*bit error rate*) wyznaczony przy określonym poziomie **SNR** (*signal to noise ratio*), dodatkowym parametrem oceny jakości jest **FER** (*frame error rate*) stosunek liczny błędnych pakietów również wyznaczany dla określonego poziomu **SNR** oraz dla określonej długości ramki danych.

Symulowany jest system transmisji pakietowej, gdzie dane są wysyłane w ramach o stałym lub zmiennym rozmiarze. Rozmiar ramki danych jest zawsze określony w odniesieniu do przesyłanych danych (danych użytkowych) przed ich kodowaniem detekcyjnym i protekcyjnym. Bity nadmiarowe, lub nadmiarowe symbole transmisyjne wynikające z procesu kodowania są uwzględniane i opisywane parametrem **R** (*rate*) określającym całkowitą sprawność kodowania. **R** to stosunek informacji użytkowej (w bitach) do całkowitej informacji w transmitowanym pakiecie (w bitach).

Parametr SNR jest zdefiniowany jako wyrażony w dB stosunek energii sygnału radiowego odbieranego przez odbiornik do energii szumu białego w odbiorniku, wyznaczonej na jeden bit danych użytkowych $SNR = 10 \log_{10} (E_b / N_0)$. Przy tak zdefiniowanym SNR możliwe jest uczciwe porównywanie systemów transmisyjnych o różnych sprawnościach. W projekcie sprawność kodowania **R** należy zawsze wyznaczyć w stosunku do całego nadawanego pakietu, z uwzględnieniem bitów nadmiarowych powstałych w wyniku kodowania oraz bitów nadmiarowych wynikających z dodania zer w celu uzupełnienia wymaganego rozmiaru ramki danych (jeśli występują). W przypadku modulacji wielowartościowych należy posłużyć się wartością średnią energii sygnału uśrednioną po wszystkich sygnałach konstelacji sygnałów E_s .

Model symulacyjny w projekcie jest modelem uproszczonym.

Najważniejsze przyjęte uproszczenia to:

- Pominięte są aspekty detekcji i synchronizacji pakietu, zakładamy że odbiornik ma idealną informację o częstotliwości nośnej, takcie zegara, i optymalnej chwili próbkowania.

Nadajnik

W nadajniku tor przetwarzania danych wygląda następująco:

1. Źródło danych użytkowych (alternatywnie: a albo b):
 - ✓ a. należy wylosować wektor binarny o zadanym rozmiarze.
 - b. należy z wskazanego pliku danych wczytać taką liczbę bajtów by zapełnić żądany rozmiar wektora binarnego danych użytkowych
 - i. na wczytanym wektorze danych należy przeprowadzić operacje wybielania (XOR ze znaną sekwencją pseudolosową o własnościach zbliżonych do szumu białego)
2. Kodowanie detekcyjne – na wektorze danych należy wyliczyć 32 bitową sumę kontrolną CRC za pomocą standardowego wielomianu sumy kontrolnej (CRC-32: 0x04C11DB7). Sumę dołączyć na końcu wektora danych (✓ https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_redundancy_check)
!! długość wektora zwiększa się o 32 bity sumy kontrolnej

3. Kodowanie protekcyjne z wykorzystaniem zadanej metody kodowania.
 - a. po zakodowaniu binarny wektor powiększa się o odwrotność współczynnika sprawności kodowania właściwego dla zadanego kodu.
 - b. **Przeplot** – blok zakodowanych danych należy poddać operacji przeplotu dla systemu z demodulatorem twardo decyzyjnym lub miękko decyzyjnym bitowym jest to przeplot bitowy, tak by ewentualne błędy grupowe w demodulatorze skutkowały pojedynczymi błędami w wektorze binarnym. Algorytm przeplotu jest dobierany do stosowanego schematu modulacji.

4. Zamiana bitów na symbole – na tym etapie w zależności od rodzaju modulacji następuje grupowanie bitów w symbole (np. po 2 przy modulacji 4PSK, 3 przy 8 PSK, 4 przy 16 QAM itd.) o takiej wartościowości jaka jest wartościowość konstelacji sygnałów. Otrzymujemy wektor etykiet.
5. Modulacja cyfrowa – na tym etapie mamy wektor liczb (etykiet) z których każda reprezentuje jeden element konstelacji sygnałów. Etykiety sygnałów są zamieniane na zmodulowany sygnał, który wypełnia założony odstęp modulacji. Sposób zamiany zależy od rodzaju modulacji.
 - a. W przypadku prostej modulacji wąskopasmowej jak np. 4 PSK czy 16 QAM etykieta sygnału jest zastępowana przez pojedynczą wartość zespoloną reprezentującą zmodulowany sygnał w paśmie podstawowym $x = a + jb$ gdzie a i b stanowią odpowiednio składową syn-fazową i kwadraturową sygnału. Czas trwania tego sygnału jest równy odstępowi modulacji. Przy założeniu zastosowania idealnych filtrów dopasowanych w odbiorniku sygnał w całym odstępzie modulacji może być reprezentowany tą pojedynczą próbką sygnału zespolonego.
 - b. W przypadku złożonej modulacji jak np. modulacja OFDM każda z używanych podnośnych jest modulowana odrębnie przez wartość zespoloną z konstelacji

sygnałów o etykietce pobieranej kolejno z wektora (punkt 4). Po obsadzeniu wejść IFFT wykonywana jest transformacja do dziedziny czasu, oraz dodawany jest przedrostek cykliczny (pewna liczba próbek z końca wektora wynikowego jest dodawana na początku. Rezultatem jest wektor zespolonych próbek sygnału w dziedzinie czasu reprezentujący sygnał w paśmie podstawowym.
!!! liczna próbek zespolonych zwiększa się o próbki z przedrostka – spada sprawność energetyczna

6. Konwersja z pasma podstawowego do pasma radiowego – W symulacji ten etap będzie opuszczony. Przy założeniu idealnej synchronizacji częstotliwości nośnej w odbiorniku konwersja nie wnosi żadnych zmian do sygnału. W rzeczywistych układach może powstać błąd synchronizacji częstotliwości skutkujący wirowaniem konstelacji oraz błąd synchronizacji fazy skutkujący obrotem konstelacji. Oba błędy muszą być usunięte w układach synchronizacji odbiornika. Symulacyjnie można zwykle badać zachowanie systemu przy zadanym błędzie układów synchronizacji poprzez wprowadzenie błędu synchronizacji do sygnału w odbiorniku, bez potrzeby przeprowadzania konwersji do częstotliwości radiowej.

Sygnał na wyjściu nadajnika należy tak przeskalować by $E_s = 1$, czyli wartość średnia pierwiastka z sumy kwadratów próbek zespolonych miała wartość 1.

Przez cały

Kanał transmisyjny

W naszym modelu symulacyjnym kanał transmisyjny jest modelowany w paśmie podstawowym jako 'zaburzenie' wprowadzone do nadawanego sygnału. Ogólnie możemy wyróżnić kanał bez pamięciowy, gdzie kolejna próbka zaburzenia nie zależy od żadnej poprzedniej próbki sygnału i/lub zaburzenia. Oraz kanał z pamięcią, modelowany zwykle za pomocą filtru typu FIR (np. kanał z p. 3).

1. Najprostszą odmianą kanału transmisyjnego jest kanał AWGN o zadanym poziomie SNR. Kanał taki jest realizowany poprzez dodawanie do każdej kolejnej zespolonej próbki sygnału w dziedzinie czasu wylosowanej próbki zespolonej z generatora o zespolonym rozkładzie Gausa o wartości średniej 0 i wariancji 1, przeskalowanej liniowo do zadanego poziomu SNR.
2. Kanał Rayleigha – oprócz dodawania szumu białego każda próbka jest mnożona przez zespolony współczynnik tłumienia z amplitudą a rozkładu Rayleigha i fazą o rozkładzie równomiernym.
3. Kanał wielodrogowy o zadanym profilu – kanał taki jest modelowany przez sumowanie kilku próbek sygnału o opóźnieniu i tłumieniu (zespolonym) dobranym w sposób charakterystyczny dla określonego środowiska propagacyjnego, np. kanał: WLAN, Kanał GSM w mieście, kanał w budynku biurowym itp. Parametry tej linii opóźniającej są dobierane na podstawie analizy wyników pomiarów w określonych środowiskach propagacyjnych i w postaci modeli kanału są dostępne w literaturze naukowej.
4. Inne – jest również wiele innych modeli

Kanał oczywiście wprowadza również tłumienie zwykle w funkcji odległości odbiornika od nadajnika, W modelu symulacyjnym to tłumienie jest reprezentowane przez zadany poziom SNR.

Obserwacja widma sygnału nadawanego i odbieranego w paśmie podstawowym.

W przypadku gdy chcemy obserwować widmo sygnału w paśmie podstawowym możemy skorzystać z transformaty FFT. Jednak częstość próbkowania sygnału który używamy jest zbyt niska do obserwacji kształtu widma, to 1 próbka sygnału na odstęp modulacji. W celu oceny kształtu widma konieczne jest zwiększenie liczby próbek na symbol za pomocą oversamplingu sygnału. Za każdą próbką należy umieścić 4 (lub 8, 16, 32, ...) próbki o wartości zero a następnie przefiltrować sygnał filtrem dolnopasmowym dopasowanym do poziomu oversamplingu. Otrzymany sygnał należy przeskalować tak by jego energia $E_s=1$, a następnie dokonać konwersji do dziedziny częstotliwości za pomocą FFT, uśrednić po kolejnych oknach obserwacji (przesuwających się w czasie). Matlab i Octave mają gotowe funkcje do oversamplingu, funkcji okien oraz FFT i IFFT.

Kształt widma należy prezentować w skali logarytmicznej na osi pionowej (w dB) i skali liniowej na osi poziomej (częstotliwość).

W przypadku sygnału o modulacji OFDM postępujemy identycznie.

Na wejściu odbiornika mamy zespolone próbki sygnału 1 na odstęp modulacji, które reprezentują próbkę na wyjściu filtra odbiorczego dopasowanego w optymalnym momencie w czasie.

W naszym modelu symulacyjnym zakładamy idealną synchronizację odbiornika, zarówno synchronizację częstotliwości nośnej, jak i synchronizację symbolową, czyli zakładamy że odbiornik posiada wiedzę o optymalnym momencie próbkowania sygnału w odstępie modulacji.

Przyjmujemy, że odbiornik otrzymuje sygnał sprowadzony do pasma podstawowego i próbkowany w optymalnych momentach odstępu modulacji oraz odpowiednio odfiltrowany do pasma zajmowanego przez sygnał.

Sygnał na wejściu odbiornika jest więc wektorem próbek zespolonych reprezentujących sygnał odebrany w dziedzinie czasu, zaburzony po przejściu przez kanał.

Tor przetwarzania sygnału w odbiorniku:

1. **Demodulacja sygnału** - celem demodulacji jest wyznaczenie etykiety nadawanego symbolu z konstelacji sygnałów na podstawie odebranej próbki lub próbek sygnału. W najprostszym przypadku demodulator podejmuje decyzje o etykiecie na podstawie kryterium największej wiarygodności. Należy wyliczyć odległości w przestrzeni sygnału pomiędzy każdym z sygnałów z konstelacji sygnałów a sygnałem odebrany i wskazać ten o najmniejszej odległości jako odebrany i zwrócić jego cyfrowa etykietę. Taki demodulator jest nazywany demodulatorem twardo decyzyjnym. Demodulator zamiast cyfrowej etykiety może zwrócić wektor współczynników prawdopodobieństwa nadania każdego z elementów konstelacji. Ta dodatkowa informacja może być używana w procesie dekodowania kodu protekcyjnego. Mówimy wtedy o demodulatorze miękko decyzyjnym symbolowym. Inna odmiana takiego demodulatora to demodulator miękko decyzyjny bitowy. Na podstawie odległości pomiędzy sygnałem odebrany a sygnałem z konstelacji sygnałów, oraz znajomości etykiet tych sygnałów można wyliczyć współczynniki prawdopodobieństwa dla poszczególnych bitów w etykiecie sygnału z konstelacji sygnałów.

- a. Demodulator twardo decyzyjny
- b. Demodulator miękko decyzyjny
 - i. Symbolowy
 - ii. Bitowy

Demodulacja sygnału OFDM

W przypadku sygnału OFDM na wejściu odbiornika mamy również zespolone próbki sygnału w dziedzinie czasu reprezentujące kolejne symbole OFDM. W celu ich demodulacji, należy z zakresu próbek, który zawiera próbki z tego samego symbolu OFDM pobrać kolejne próbki i obsadzić nimi wejścia transformaty FFT (dzięki prefiksowi cyklicznemu w nadajniku nie musimy zaczynać od pierwszej próbki, mogą być z środka). Po wykonaniu transformaty FFT na jej wyjściach otrzymamy wartości sygnału na podnośnych. Wartości te to zespolone próbki z których każda reprezentuje sygnał zmodulowany na odpowiedniej podnośnej w nadajniku. Próbki te należy przekształcić w wektor, który dalej może być demodulowany tak jak opisano powyżej w punkcie 1 (Demodulacja sygnału).

-
2. **Dekodowanie kodu protekcyjnego** – każdy rodzaj kodowania protekcyjnego posiada własny algorytm dekodowania. Ogólnie algorytmy te można podzielić na dwie grupy:
- Algorytmy miękko decyzyjne – działają na podstawie informacji o prawdopodobieństwach (wiarygodności) odebrania kolejnych bitów albo odległościach pomiędzy sygnałem odebrany a sygnałami z konstelacji sygnałów.
 - Algorytmy twardo decyzyjne – działające na wektorze binarnym odebrany z demodulatora.

Innym podziałem jest podział na algorytmy

1. Liniowe, nieiteracyjne – algorytm jednokrotnie dokonuje analizy danych wejściowych i zwraca wynik np.: alg. Viterbiego
2. Algorytmy iteracyjne – zwykle oparte na kodowaniu złożonym z dwu różnych kodów lub ścieżek kodowania gdzie w procesie dekodowania cyklicznie dekoduje się jeden z kodów, a uzyskane wyniki w formie współczynników wiarygodności dla bitów słowa kodowego są danymi wejściowymi przy dekodowaniu drugiego kodu (oprócz wiarygodności zwróconych przez demodulator). Informacja krąży pomiędzy jednym dekodorem a drugim dopóki nie osiągnię się założonych poziomów wiarygodności lub założonej liczby iteracji, lub jeśli zastosowano kodowanie detekcyjne, to uzyska się zgodność kodu CRC.

Po zdekodowaniu pakietu należy porównać bity nadane i odebrane (po odwróceniu wybielania, jeśli było zastosowane) i odpowiednio zwiększyć licznik bitów badanych i błędnych które posłużą do wyliczenia poziomu błędów bitowych BER.

Po zdekodowaniu pakietu dokonuje się również weryfikacji kodu CRC, jeśli kod jest zgodny, to pakiet uznajemy za poprawnie odebrany i może być zliczony jako dobry przy wyznaczaniu poziomu FER.

Projekt będzie miał 2 fazy. W fazie 1 zbudowany zostanie model symulacyjny bez kodowania protekcyjnego, a w fazie 2 model ten zostanie uzupełniony o kodowanie protekcyjne w nadajniku i dekodowanie w odbiorniku. Faza 1 pozwoli na szybkie uzyskanie rezultatów, oraz wdrożenie i przetestowanie elementów pomiarowych oraz oceny jakości wyników. Faza 2 pozwoli zapoznać się z realizacją układów kodowania dekodowania oraz z ich skutecznością (w porównaniu do wyników w fazie 1).

Symulacja, faza 1.

W pierwszej fazie symulacji należy zbudować model symulacyjny złożony z nadajnika, kanału AWGN i odbiornika, który nadaje dane bez kodowania protekcyjnego ale z kodowaniem detekcyjnym, z użyciem wskazanej modulacji.

Należy wykonać symulację systemu dla pakietów danych o rozmiarze : 500, 5000 i 50000 bitów danych. Należy wykonać symulacje transmisji tylu pakietów by wyniki BER i FER były wiarygodne. Należy wykonać dwie serie symulacji:

1. symulacje dla wskazanej modulacji prostej (np. 4 PSK)
2. symulacje dla systemu OFDM ze wskazaną modulacją na podnośnych (np. 4 PSK)

Dla serii 1 i 2 zebrać wyniki symulacji i przedstawić na wykresach

Wynikiem symulacji mają być:

- wykresy BER vs. SNR (E_b/N_0) oraz FER v.s. SNR (E_b/N_0) wraz z analizą wiarygodności wyników
- diagramy z punktami sygnału odebranej konstelacji przy różnych poziomach SNR.
- Wykresy widma dla odebranych sygnałów w paśmie podstawowym przy różnych poziomach SNR.

Każda grupa w fazie 1 wykonuje taki sam model, jedynie różniący się zastosowaną modulacją.

Proponuje przydzielić: **grupa 1 modulacja 2PSK, grupa 2 modulacja 4PSK, itd.**

Dostępne modulacje to:

1. 2 - PSK
2. 4 - PSK
3. 8 - PSK
4. 16 - QAM
5. 64 – QAM
6. 256 QAM

W przypadku modulacji OFDM należy użyć modulacji o wartościowości 64, 52 podnośne na zmodulowane dane, wartość 0 ustawić na podnośnej reprezentującej częstotliwość 0 w paśmie podstawowym oraz na skrajnych podnośnych reprezentujących najwyższe dodatnie i ujemne częstotliwości. Należy wystać w jednej ramce tyle symboli OFDM by przesłać wszystkie bity danych. Wylosowane dane , jeśli ich liczba (np. 5000) nie pokrywa w pełni ostatniego symbolu OFDM, należy przed przeplotem uzupełnić końcowymi zerami, które należy w odbiorniku pominąć. Te zera nie powinny być brane pod uwagę jako dane przy wyznaczaniu sprawności energetycznej R.