

Laboratorium TRP

Charakterystyki częstotliwościowe pętli abonenckich oraz symulacja modulacji wielotonowych (ADSL)

1. Wstęp

Jeżeli w systemie z modulacją jednej nośnej szybkość symboli danych jest porównywalna z szerokością pasma kanału, wtedy daje znać o sobie interferencja międzysymbolowa (ISI). Zjawisko to musi zostać wtedy uwzględnione w konstrukcji odbiornika – najczęściej przez adaptacyjną korekcję odpowiedzi impulsowej kanału w odbiorniku (można to rozumieć jako cyfrowy filtr w odbiorniku). Alternatywą dla modulacji jednej nośnej są modulacje wielotonowe (DMT) [1]. Strumień danych o dużej szybkości jest dzielony na dużą liczbę strumieni danych o znacznie niższych szybkościach. Każdy z tych strumieni moduluje osobną podnośną. Szybkość modulacji każdej z podnośnych jest na tyle niska, że wpływ ISI jest bardzo niewielki [1].

Systemy DMT, jak również systemy Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) znalazły zastosowanie w wielu popularnych systemach telekomunikacyjnych. Są to m. in. IEEE 802.11a, IEEE 802.11g, IEEE 802.16 (WiMax), IEEE 802.20, telewizja DVB, jak również w popularnych modemach kablowych ADSL oraz VDSL [3]. Ćwiczenie ma za zadanie zapoznać studentów z pracą systemu ADSL w typowej pętli abonenckiej.

2. Pętla abonencka

Pętle abonenckie wykonane ze skrętki charakteryzują się w przybliżeniu stałą pojemnością jednostkową, przewodnością jednostkową oraz rezystancją i indukcyjnością jednostkową, których zachowanie dla różnych częstotliwości dobrze modelowane jest przez wzory zawarte w zaleceniach ITU [4]. Najczęściej używane kable mają średnice żyły 0.5 mm oraz 0.4 mm i oznaczane są odpowiednio AWG 24 oraz AWG 26. Impedancja źródła sygnału oraz zakończenia linii wynosi zwykle 100 ohm [4]. Typowa sieć może składać się jednak z kilku rodzajów kabla połączonych szeregowo. Dodatkowo sieci w wielu krajach (w tym w Polsce) posiadają **rozwarne** „odnogi” zwane odczepami. Typowo odczepy mogą mieć do 500 metrów długości, wzdłuż jednej linii może być ich nawet kilka [6]. Dodatkowym rodzajem odczepów są częste rozgałęzienia wykonywane (nielegalnie) przez abonentów w celu podłączenia więcej niż jednego aparatu telefonicznego.

Program symulacyjny umożliwia łączenie szeregowo kabli jak również symulację odczepów. Analiza linii dokonywana jest przy pomocy przedstawienia odcinka linii (z odczepem bądź bez) jako czwórnik o określonej macierzy admitancyjnej. Macierz admitancyjna całej linii jest iloczynem macierzy admitancyjnych odcinków od nadajnika do odbiornika. Macierz admitancyjna jest jednoznaczny opisem linii transmisyjnej.

Tłumienność wtrąceniowa pętli jest zdefiniowana jako stosunek mocy wydzielonej na zakończeniu sieci gdy nie ma pętli między generatorem a zakończeniem (zaciski generatora

są dołączone do zacisków opornika obciążającego) do mocy wydzielonej na zakończeniu sieci gdy między zaciskami generatora i zaciskami odbiornika jest pętla abonencka. Najczęściej podaje się ją w dB.

Prędkość fazowa fali w pętli jest zdefiniowana jako

$$v_f = \frac{2\pi f}{\beta},$$

gdzie f to częstotliwość a β jest stałą fazową (urojoną częścią stałej propagacji γ). Prędkość fazowa jest funkcją częstotliwości. Znając prędkość fazową można określić długość fali w pętli przy pomocy wzoru

$$\lambda = \frac{v_f}{f}.$$

Jest to długość fali, która odpowiada danej częstotliwości f .

Wpływ odczepów na tłumienność linii. Posługując się wzorami na impedancję wejściową linii można pokazać, że impedancja odczepu wyraża się wzorem:

$$Z_{we} = -jZ_c \operatorname{ctg}(\beta l),$$

gdzie Z_c oznacza impedancję charakterystyczną linii a l jest długością. Impedancja ta przy argumentie ctg równym $\frac{\pi}{2}, 3\frac{\pi}{2}, 5\frac{\pi}{2}$ itd. dąży do zera. Powoduje to znaczne osłabienie fali pożądaney, która przenosi informację do odbiornika. Na charakterystyce tłumienności wtrąceniowej linii od częstotliwości widoczne jest to jako charakterystyczny skok tłumienności.

3. Modulacja OFDM (DMT)

W modemach ADSL wykorzystuje się modulację DMT (ang. discrete multitone), która jest dolnopasmową wersją modulacji OFDM (ang. orthogonal frequency division multiplexing). Modulacja OFDM polega na tym, że zamiast modulować jedną nośną sygnałem o dużej prędkości modulacji R , moduluje się N nośnych sygnałami o szybkości modulacji R/N . Modulowanie z niższą szybkością prowadzi do tego, że sygnał jest bardziej odporny na interferencje międzysymbolową (ISI – ang. *inter-symbol interference*). Dodatkową cechą modulacji OFDM, która wyróżnia ją od zwykłego FDM jest fakt, że odstęp częstotliwościowy pomiędzy nośnymi OFDM jest równy $1/T_b$, gdzie T_b jest czasem trwania jednego symbolu OFDM. Widma nośnych OFDM po zmodulowaniu mają charakter funkcji $\sin(x)/x$ i nachodzą na siebie, jednak w taki sposób, że w miejscu maksimum widma jednej nośnej, gęstość widmowa pozostałych nośnych jest zerowa i sygnały z różnych nośnych nie zakłócają się nawzajem. Przypomina to nieco transmisję w paśmie podstawowym z impulsami kształtowanymi filtrem typu podniesiony cosinus. Nośne OFDM mogą być modulowane niezależnie, przy pomocy modulacji amplitudy i kąta czyli np. PSK, QAM. Modulacja OFDM ma niejako wbudowane w siebie następujące zalety:

- Łatwość przetwarzania sygnału – wszystko odbywa się cyfrowo (przetwarzanie typu software)
- Wykorzystanie modulacji wielowartościowych nie jest problemem – polega jedynie na zwiększeniu alfabetu symboli na każdej podnośnej
- Zwartość pasma – kształt pasma sygnału OFDM jest niemal prostokątny, stąd łatwo go multipleksować częstotliwościowo z innymi sygnałami bez użycia filtrów
- Łatwy podział pasma na downlink i uplink

- Łatwość monitoringu dzięki przeznaczeniu wybranych podnośnych na tzw. piloty lub do przesyłania sekwencji treningowych
- Optymalny dobór mocy poszczególnych podnośnych i wartościowości modulacji każdej z nich do charakterystyki kanału transmisyjnego, dzięki tzw. algorytmowi wlewania wody

Sygnał OFDM w najbardziej ogólnej postaci ma postać

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^N c_{ki} s_k(t - iT_s),$$

gdzie

$$s_k(t) = \text{rect}(t) e^{j2\pi f_k t}$$

natomiast

$$\text{rect}(t) = \begin{cases} 1 & 0 < t < T_s \\ 0 & t \leq 0, t \geq T_s \end{cases}$$

T_s jest czasem trwania symbolu, N liczbą podnośnych, c_{ki} jest zespolonym symbolem informacyjnym wysyłanym w i -tym symbolu na k -tej podnośnej (w istocie to właśnie c_{ki} niesie informację – w nadajniku następuje mapowanie danych na ciąg symboli przyporządkowanych różnym podnośnym). Uwzględniając warunek ortogonalności podnośnych, tzn.

$$f_k = \frac{k-1}{T_s},$$

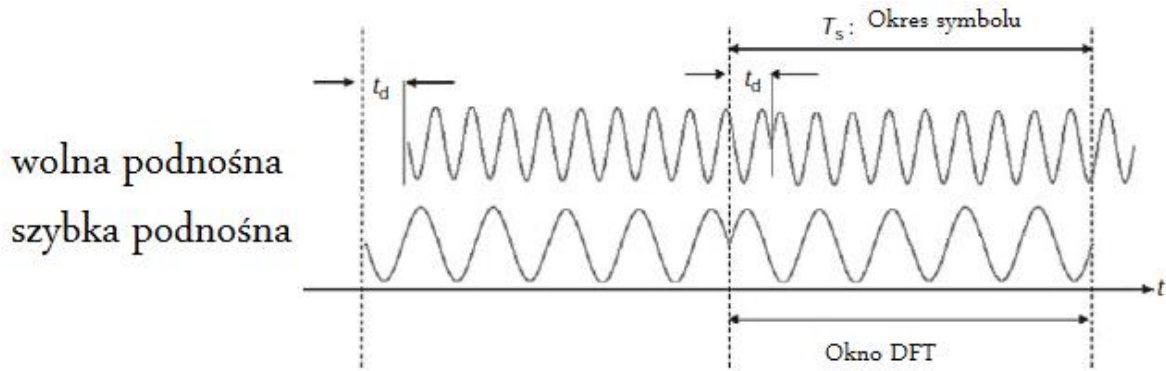
możemy zapisać, że m -ta próbka i -tego symbolu modulacji OFDM ma postać

$$s_m = \sum_{k=1}^N c_k e^{\frac{j2\pi(k-1)(m-1)}{N}}, \quad (1)$$

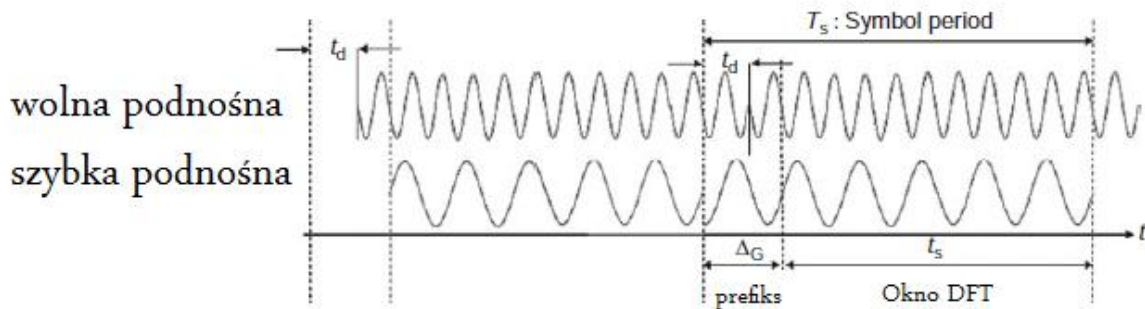
We wzorze (1) widać, że próbki symbolu OFDM określone są przez odwrotną dyskretną transformatę Fouriera (IDFT) symboli na poszczególnych podnośnych. Analogicznie w odbiorniku symbole informacyjne c_k odzyskiwane są poprzez wykonanie DFT na spróbkowanym sygnale odebranym. Prowadzi to do implementacji nadajnika i odbiornika OFDM z wykorzystaniem procesorów obliczających szybką transformatę Fouriera (IFFT oraz FFT). Ma to istotne znaczenie praktyczne, gdyż moduły o takiej funkcji są powszechnie dostępne a ich złożoność obliczeniowa, mierzona jako liczba zespolonych mnożeń rośnie niemal liniowo z liczbą nośnych

$$\frac{N}{2} \log_2 N.$$

W OFDM ważną rolę odgrywa tzw. **prefiks cykliczny**, czyli przedział ochronny pomiędzy symbolami w dziedzinie czasu. Nie jest to jednak przedział ochronny w tradycyjnym rozumieniu, kiedy to przez określony czas T_{CP} nie jest wysyłany sygnał. W OFDM przedział ochronny polega na skopiowaniu końcówki symbolu o czasie trwania T_{CP} na początku symbolu. Operacja taka zapobiega utracie ortogonalności nośnych OFDM w czasie trwania okna IFFT/FFT w odbiorniku na skutek dyspersji. Zjawisko dyspersji polega na tym, że różne częstotliwości sygnału rozchodzą się w medium transmisyjnym z różnymi prędkościami grupowymi. W efekcie różne podnośne symbolu OFDM dochodzą do odbiornika w różnym czasie. Na skutek tego nośne tracą ortogonalność – nie sposób zsynchronizować okna DFT ze wszystkimi jednocześnie. Dochodzi do sytuacji takiej, jak pokazano na rys. 1, czyli w czasie trwania okna DFT znajdują się dwa sąsiednie symbole na wolniejszej podnośnej. Dzięki dołączeniu prefiksu cyklicznego na początku symbolu, ta część sygnału na wolnej podnośnej, która wysunęła się z okna na skutek dyspersji, pojawiła się na początku jako część prefiksu (rys. 2). Jeżeli prefiks cykliczny jest odpowiednio długi (dłuższy niż różnica późności grupowych skrajnych podnośnych) dyspersja zostaje wyeliminowana całkowicie.



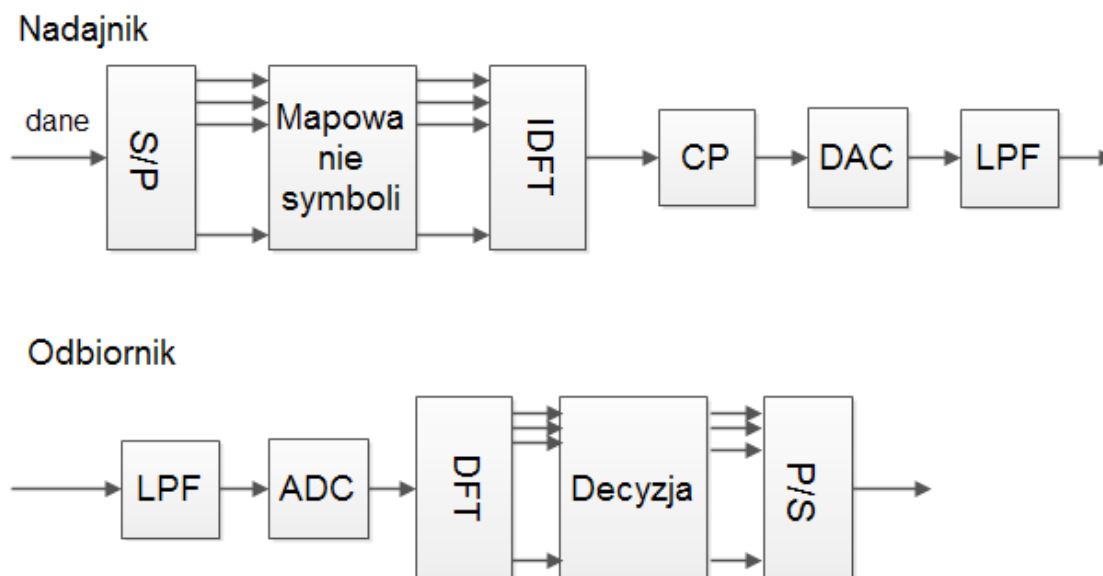
Rys. 1. Ilustracja interferencji symbolowej w OFDM przy braku prefiksu cyklicznego [2]



Rys. 2 Ilustracja zapobiegania interferencji międzysymbolowej przez wykorzystanie prefiksu cyklicznego [7].

Typową implementację nadajnika i odbiornika OFDM pokazano na rys. 3. W nadajniku blok danych zamieniany jest z postaci szeregowej na równoległą, następnie poszczególnym symbolom przyporządkowywane są właściwe im współczynniki zespolone c_{ik} . Następnie obliczane jest IDFT i doklejany jest prefiks cykliczny (CP). Sygnał cyfrowy zamieniany jest następnie na postać analogową i po przejściu przez dolnopasmowy filtr nadawczy wysyłany w kanał. W odbiorniku następuje operacja odwrotna – po filtracji dolnopasmowej sygnał jest próbkowany w przetworniku analogowo cyfrowym. Wybierany jest offset okna DFT (względem początku symbolu), obliczane zostaje DFT, czyli otrzymane zostają współczynniki c_{ik} . Układ decyzyjny określając jaki symbol został nadany zamienia symbole ponownie na dane, które po zamianie na postać szeregową stanowią ciąg informacyjny. Schemat generacji OFDM wygląda nieco inaczej w przypadku OFDM pasmowego, takiego jak wykorzystywany jest głównie w transmisji radiowej. W przypadku DMT sygnał generowany jest tak jak na rys. 3, z tą uwagą, że dla N nośnych mapuje się jedynie N symboli i uzupełnia N symbolami, które są zespolonymi sprzężeniami mapowanych symboli informacyjnych, na odpowiadających im częstotliwościach z zakresu widma ujemnego¹. Tak więc wymiar DFT w systemie o N nośnych wynosi tak naprawdę $2N$. Dzięki temu generowany sygnał jest rzeczywisty i może być wysyłany w kanale.

¹ Widmo sygnału rzeczywistego jest symetryczne względem 0 (ujemne sprzężone względem dodatniego)



Rys. 3. Podstawowy schemat nadajnika i odbiornika OFDM

4. Literatura

- [1]. K. Wesołowski, *Systemy radiokomunikacji ruchomej*, WNT
- [2]. J. M. Cioffi, *A Multicarrier Primer*, Stanford University tutorial (dostępne w internecie)
- [3]. Wikipedia, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
- [4]. Osowski, Szabatin, *Podstawy teorii obwodów*, Tom. 3. WNT
- [5]. ADSL ANSI T1.413
- [6]. J. H. van Wyk, L.P. Linde, *ADSL capacity in a network environment*, IEEE Africon 2002 conf. papers.
- [7]. W. Shieh, I. Djordjevic, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Optical Communications*, Elsevier 2010