

Lekcja 9

Zastosowania modulacji sygnału

Cel

- Przedstawienie zastosowań modulacji sygnału oraz metod formowania sygnału modulującego.

Efekty kształcenia

- Uczeń zna rolę technik modulacji w podziale częstotliwości pomiędzy nadawców.
- Uczeń potrafi wyjaśnić różnicę we wrażliwości na zakłócenia sygnałów zmodulowanych technikami AM i FM.
- Uczeń zna związek jakości sygnału i prędkości przesyłu informacji z szerokością pasma sygnału.
- Uczeń zna metodę przetwarzania sygnału analogowego na cyfrowy i potrafi jej użyć w praktyce.



1. Rola modulacji sygnału w podziale częstotliwości

Kiedy znajdziemy się w pokoju, w którym mówi wiele osób naraz, trudno się porozumieć. Przy dużym wysiłku możemy usłyszeć najbliższą stojącą osobę, ale wyobraźmy sobie setki osób w jednym pomieszczeniu i że każdą z nich słyhać jednakowo głośno. Problemem jest to, że wszystkie osoby używają tego samego pasma sygnału (o szerokości około kilku kHz) i jednego medium – powietrza. Podobnie byłoby, gdybyśmy chcieli bezpośrednio przetransformować sygnał głosowy nadawców na pewnym obszarze na falę elektromagnetyczną i przesyłać ją w przestrzeń w nadziei, że odbiorca odnajdzie w tym chaosie przeznaczony dla niego sygnał.

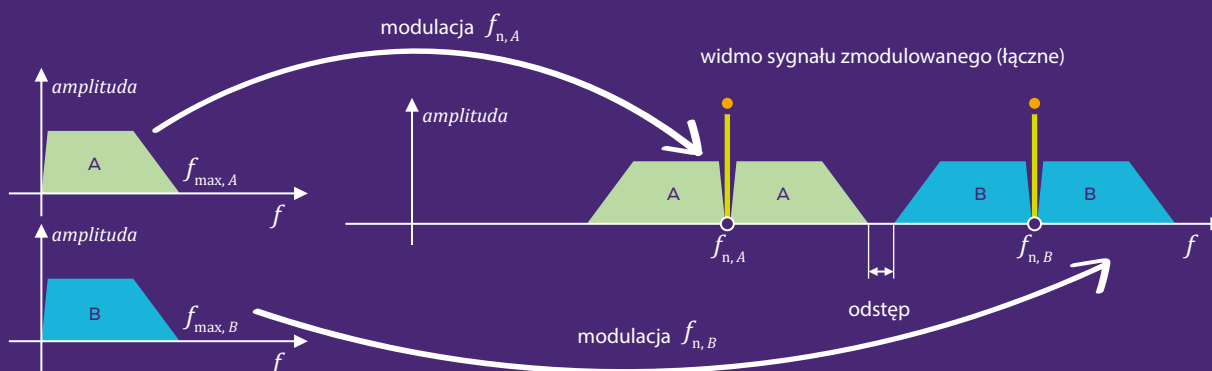
W Lekcji 5 pokazaliśmy, że rozwiązaniem problemu może być tzw. podział częstotliwości, czyli nadawcy mogą się umówić, że nadają swoje sygnały w różnych pasmach, a odbiorcy korzystając z filtracji wyodrębniają ten sygnał, który ich interesuje. Teraz, korzystając z wiedzy zdobytej w Lekcjach 7 i 8, możemy omówić praktyczną metodę realizacji tego pomysłu.

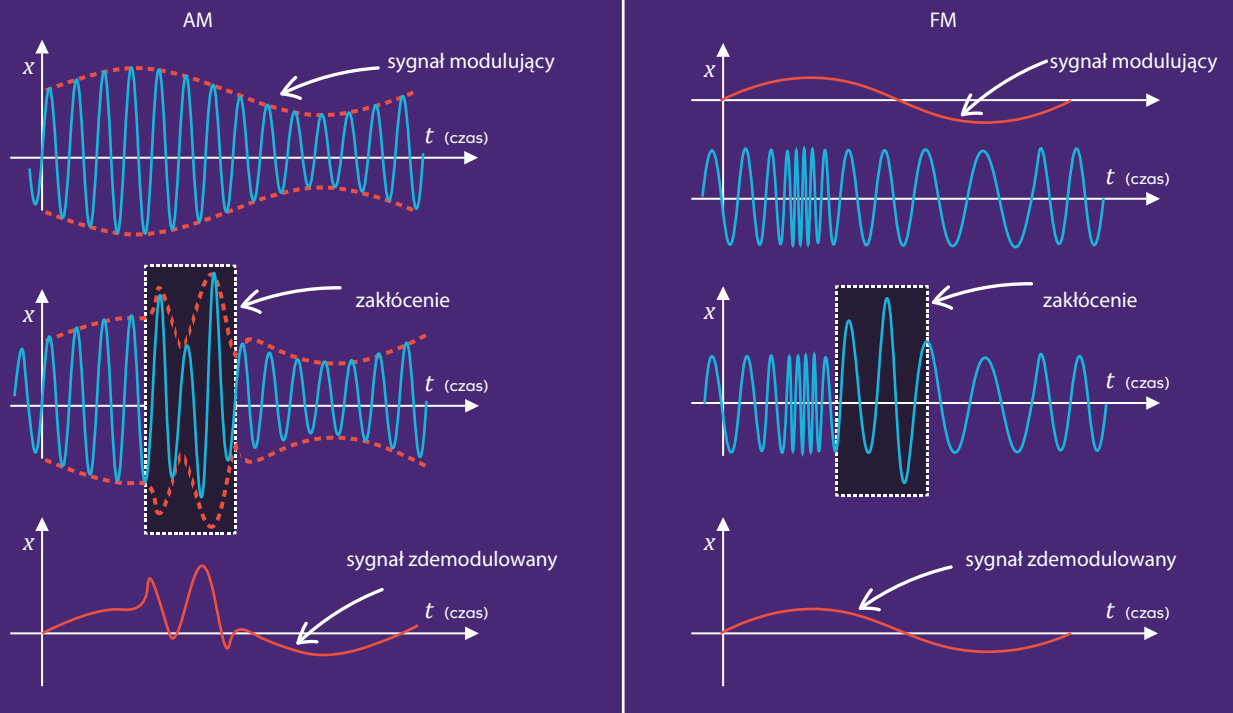
Załóżmy, że dwóch nadawców – A i B – chciałoby nadać w przestrzeń pewne sygnały, których pasma są ograniczone przez pewną częstotliwość maksymalną, oznaczoną odpowiednio jako $f_{\max, A}$ i $f_{\max, B}$. Przykładowo, jeżeli są to komunikaty głosowe, można przyjąć, że ograniczenie ich pasma z góry przez częstotliwość 5 kHz nie powinno znacząco zakłócić ich jakości. Na Rys. 1 po lewej stronie pokazano schematycznie widma tych sygnałów. Gdybyśmy je nanieśli na jeden wykres, znacząco by się nakładały.

Nadawcy umawiają się, że zmodulują swoje sygnały (np. techniką AM), przy czym użyją różnych częstotliwości nośnych – odpowiednio $f_{n,A}$ oraz $f_{n,B}$. Zgodnie z tym, czego nauczyliśmy się w poprzednich lekcjach, po modulacji szerokość pasma każdego z sygnałów się zwiększy przez utworzenie wstęg bocznych. Należy zatem szczególnie zadbać o to, by odstęp pomiędzy częstotliwościami nośnymi był wystarczający do zapewnienia odstępu pomiędzy wstęgami zmodulowanych sygnałów obu nadawców.

Kiedy teraz oba zmodulowane sygnały zostaną nadane równocześnie, ich widma nie nałożą się na siebie. Odbiorca przy użyciu odpowiedniego filtra pasmowego może w tej sytuacji wydzielić konkretny sygnał, a następnie, po przeprowadzeniu tzw. **demodulacji**, przenieść zarejestrowany sygnał do oryginalnego pasma w zakresie słyszalnym.

Istnieje jeszcze inna ważna korzyść z technik modulacji. Przypomnijmy sobie, że w Lekcji 3 mówiliśmy o minimalnym rozmiarze anteny dipolowej do nadawania sygnału o określonej długości fali. Sygnał po zmodulowaniu fali nośnej o dużej częstotliwości przenosi się na wykresie widmowym w obszar znacznie większych częstotliwości. Skraca się dzięki temu jego długość fali, a tym samym zmniejsza się wymagany rozmiar anteny. Przyjrzymy się dokładnie faktycznemu zyskowi z modulacji w „Pracy domowej”.





Rys. 2. Zakłócenia amplitudowe sygnału zmodulowanego: AM (po lewej) i FM (po prawej).

2. Sygnał zmodulowany a zakłócenia

W Lekcji 7 wprowadziliśmy technikę modulacji AM, którą omówiliśmy dość szczegółowo dzięki temu, że łatwo było wytłumaczyć zasadę jej działania na diagramach wektorowych. Technika FM opisana w Lekcji 8 była już znacznie bardziej skomplikowana. Okazało się również, że pasmo sygnału zmodulowanego FM jest faktycznie nieskończone i pełne prążków bocznych nawet przy modulacji sygnałem harmonicznym (przynajmniej przy modulacji szerokopasmowej). Możemy zatem zapytać – dlaczego w ogóle korzysta się z modulacji FM i jakie przynosi ona korzyści w porównaniu z modulacją AM?

Jedną z największych zalet modulacji FM jest jej mała czułość na zakłócenia (szum). Większość zakłóceń, z którymi musimy się liczyć przy przesyłaniu sygnałów na falach elektromagnetycznych (EM) są tzw. zakłócenia amplitudowe, czyli takie, które wpływają głównie na amplitudę sygnału. Takimi zakłóceniami są np. wyładowania atmosferyczne.

Popatrzmy jak na zakłócenia reagują sygnały zmodulowane technikami AM i FM (Rys. 2). Po lewej stronie widzimy falę nośną zmodulowaną wolnozmiennym sygnałem harmonicznym, która pod wpływem zakłócenia amplitudowego w pewnym przedziale czasu ulega wyraźnej modyfikacji. Tak zniekształcona fala dociera do odbiornika, który nie jest w stanie odróżnić zmienności amplitudy związanej z zawartością informacyjną od przypadkowego zaburzenia, które przytrafiło się gdzieś pomiędzy nadawcą i odbiorcą. Sygnał zdemodulowany, czyli odzyskany z fali nośnej i przywrócony do normalnej postaci, zawiera nadal to zniekształcenie i może się przejawiać nieprzyjemnym trzaskiem w głośniku.

A jak to jest w przypadku modulacji FM? Popatrzmy na prawą stronę Rys. 2. Sygnał zmodulowany częstotliwościowo również ulega zakłóceniu amplitudowemu. Różnica jest taka,

że tym razem amplituda sygnału nie niesie istotnej informacji. Mimo wyraźnych zakłóceń, jeżeli tylko nie ulega zmianie **częstotliwość** zmodulowanego sygnału (czyli np. punkty przecięcia z osią czasu pozostają w tych samych miejscach), sygnał użyteczny może być zdemodulowany w odbiorniku w pełnej zgodności z sygnałem oryginalnym.

Oczywiście, jest to przypadek wyidealizowany. W praktyce może dojść do pewnych nieusuwalnych zakłóceń, jednak czułość na nie sygnału zmodulowanego FM jest znacznie mniejsza niż w technice AM. Co więcej, wrażliwość na zakłócenia jest tym mniejsza, im większa jest dewiacja częstotliwości, co przemawia za tym, by stosować modulację szerokopasmową, gdy zależy nam na jakości przesyłanego sygnału (np. jest to audycja muzyczna).



Ciekawostka. Być może skróty AM i FM, które wprowadziliśmy w ostatnich lekcjach obili Cię wcześniej o uszy. W szczególności skrót FM można spotkać w nazwach wielu komercyjnych stacji radiowych. Typowo stosują go stacje nadające na falach radiowych z wykorzystaniem modulacji FM – cechują się one małymi zakłóceniami i doskonałą jakością audycji muzycznych (uwaga: człon FM jest popularny także w radiach internetowych – w tym przypadku nie ma nic wspólnego z modulacją FM; mamy tu do czynienia z nawiązaniem do tradycji radia klasycznego). W audycjach na długich falach radiowych nadawanych z wykorzystaniem modulacji AM częściej można spotkać się z szumami i trzaskami, w związku z czym koncentrują się one na wiadomościach, reportażach i rozmowach z gośćmi, ogólniej – na elementach programu, w których jakość transmisji nie jest szczególnie istotna.

3. Od czego zależy szerokość pasma sygnału?

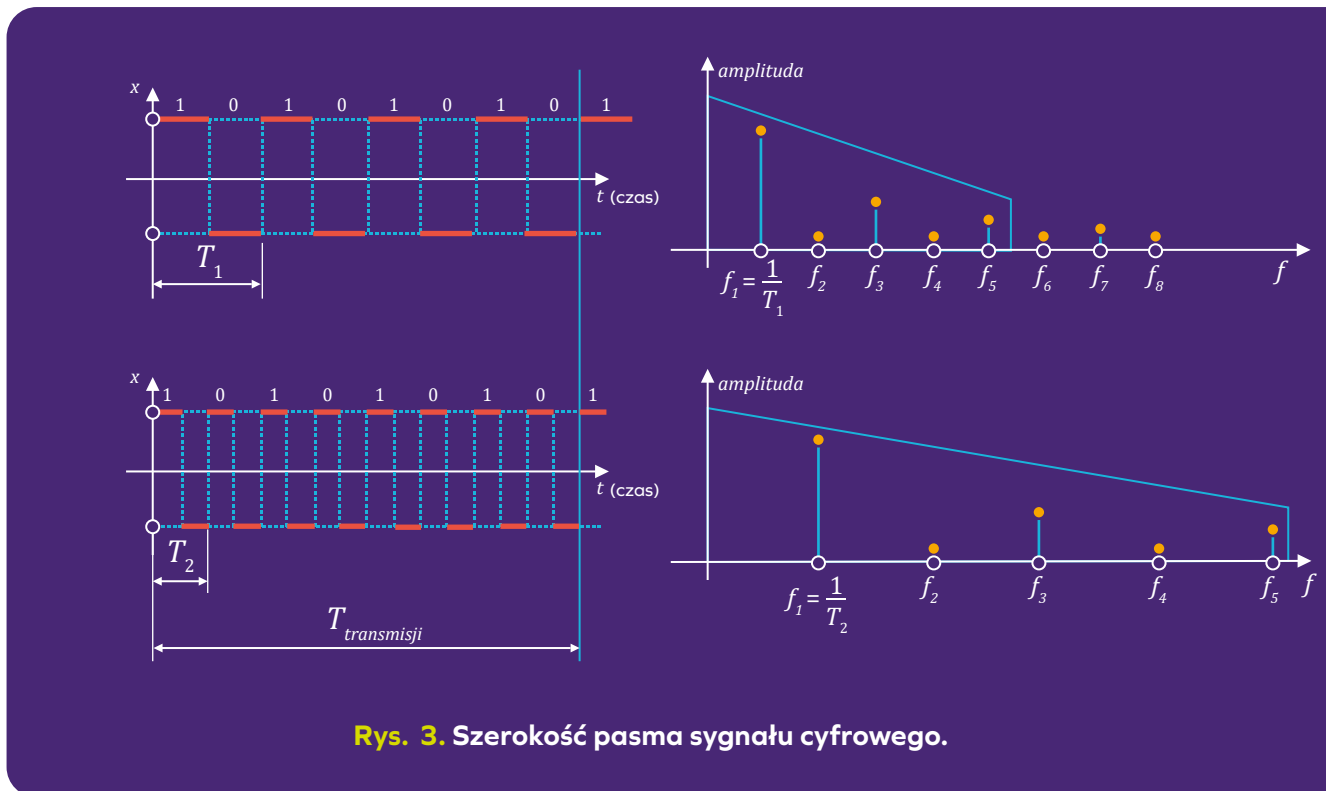
Powiedzmy teraz nieco więcej o szerokości pasma oryginalnego sygnału, który chcemy przesłać do odbiorcy. Może to być sygnał analogowy, np. zarejestrowany przez mikrofon komunikat głosowy lub utwór muzyczny. Zakres słyszalności człowieka obejmuje od ok. 20 Hz do ok. 20 kHz, co nie znaczy, że przesyłanie całego tego pasma jest zawsze celowe. Jeżeli przesyłamy wyłącznie ludzką mowę i zależy nam przede wszystkim na tym, by komunikat był zrozumiały, a niekoniecznie w pełni oddawał barwę głosu lektora, zakres pasma od ok. 300 Hz do ok. 4 kHz powinien być wystarczający. Dalsze zawężenie pasma prowadzi do coraz to większego pogorszenia jakości dźwięku, aż do momentu, gdy komunikat przestanie być zupełnie czytelny.

Przesyłanie utworów muzycznych, szczególnie tych wyrafinowanych z szeroką gamą instrumentów, jest znacznie bardziej wymagające. Muzyka odbierana przede wszystkim jako wrażenie estetyczne wymaga wysokiej jakości, a tym samym znacznie szerszego pasma sięgającego nawet 15 kHz.

Podobnie dla wielu innych sygnałów analogowych, szerokość pasma możemy zawsze ograniczyć stosując filtrację dolnoprzepustową (Lekcja 5), a sygnał będzie tym lepiej reprezentowany (tym większej jakości), im większej częstotliwości granicznej filtra użyjemy.

We współczesnej telekomunikacji szczególnie ważne jest przesyłanie sygnałów cyfrowych, w tym binarnych (o dwóch poziomach – umownie 0 i 1). Jak wyznaczyć pasmo sygnału cyfrowego? Przypatrzmy się najbardziej krytycznemu przypadkowi, gdy poziomy zmieniają się naprzemiennie z pewnym okresem T_1 . Przypadek ten jest najważniejszy,

gdyż prowadzi do pojawienia się w sygnale największej możliwej częstotliwości. Sygnał cyfrowy ma wtedy postać 101010101... itd. możemy go zatem zinterpretować jako sygnał prostokątny (patrz Lekcja 4). Przypomnijmy sobie, że widmo takiego sygnału cechuje się obecnością tylko nieparzystych harmonicznych, przy czym pierwsza z nich ma częstotliwość $f_1 = 1/T_1$.



Rys. 3. Szerokość pasma sygnału cyfrowego.

Do odtworzenia postaci sygnału cyfrowego w praktyce nie potrzebujemy wszystkich harmonicznych. Przyjmijmy, że ograniczymy się do pierwszych pięciu. Pasma sygnału cyfrowego można wtedy przedstawić jak na Rys. 3 (górną część).

O czym nam mówi okres T_1 ? Możemy go rozumieć jako czas przesłania 2 bitów informacji (patrz Lekcja 1), gdyż każdy z poziomów sygnału binarnego możemy rozumieć jako 1 bit. Przy danym czasie transmisji $T_{\text{transmisji}}$, im mniejsza wartość T_1 , tym więcej bitów możemy przesłać.

Co się dzieje, kiedy rosną wymagania na zwiększenie prędkości przesyłu informacji? Na przykład użytkownicy mogą oczekiwać, by czas przesyłania zdjęć skrócił się co najmniej dwukrotnie lub by możliwe było oglądanie filmu w usługach strumieniowej o lepszej jakości (np. 4K). Konieczne jest wtedy zmniejszenie czasu T_1 .

Na dolnej części Rys. 3 możemy zobaczyć sygnał cyfrowy o mniejszym okresie T_2 , który pozwala na przesłanie w tym samym czasie dwukrotnie większej liczby bitów. Jak widzimy, na skutek zwiększenia się częstotliwości harmonicznych, także widmo sygnału ulega znacznemu poszerzeniu.

Zapamiętajmy – wymagania większej jakości sygnału analogowego lub większej szybkości przesyłu informacji w sygnale cyfrowym zawsze prowadzą do poszerzenia pasma sygnału. Konsekwencje tego zjawiska omówimy dokładniej w Lekcji 10.

4. Konwersja analogowo-cyfrowa

Na koniec przyjrzyjmy się przetwarzaniu sygnału analogowego na cyfrowy – tzw. **konwersji analogowo-cyfrowej** (w skrócie A/C).

W Lekcji 1 poznaliśmy zalety sygnału cyfrowego m.in. odporność na niewielkie zakłócenia. We współczesnej telekomunikacji, zdominowanej przez techniki cyfrowe, ważne jest sprowadzenie dowolnego sygnału do postaci cyfrowej – najczęściej binarnej (o dwóch poziomach). Czy jest to w ogóle możliwe?

Konwersja A/C przebiega w dwóch etapach:

- **próbkiwanie** – zamiana ciągłego w czasie sygnału na ciąg próbek pobieranych równomiernie co pewien, ustalony okres czasu (inaczej – z pewną ustaloną częstotliwością nazywaną **częstotliwością próbkowania**);
- **kwantyzacja** – wartości sygnału w danej próbce zostaje przydzielona określona liczba bitów; na tym etapie sygnał przekształca się na sygnał cyfrowy o skończonej liczbie poziomów zależnej bezpośrednio od liczby bitów.

Popatrzmy na Rys. 4, na którym ciągła krzywa odpowiada przebiegowi sygnału analogowego w czasie. W pierwszym kroku wybieramy na krzywej pewną liczbę punktów. Dokonujemy w ten sposób próbkowania. Im punktów będzie więcej, tym lepiej będziemy w stanie oddać kształt krzywej, ale także tym więcej sekwencji bitów zostanie przypisanych do wybranego odcinka sygnału (czyli więcej informacji trzeba będzie przetwarzać, a potem przesyłać).

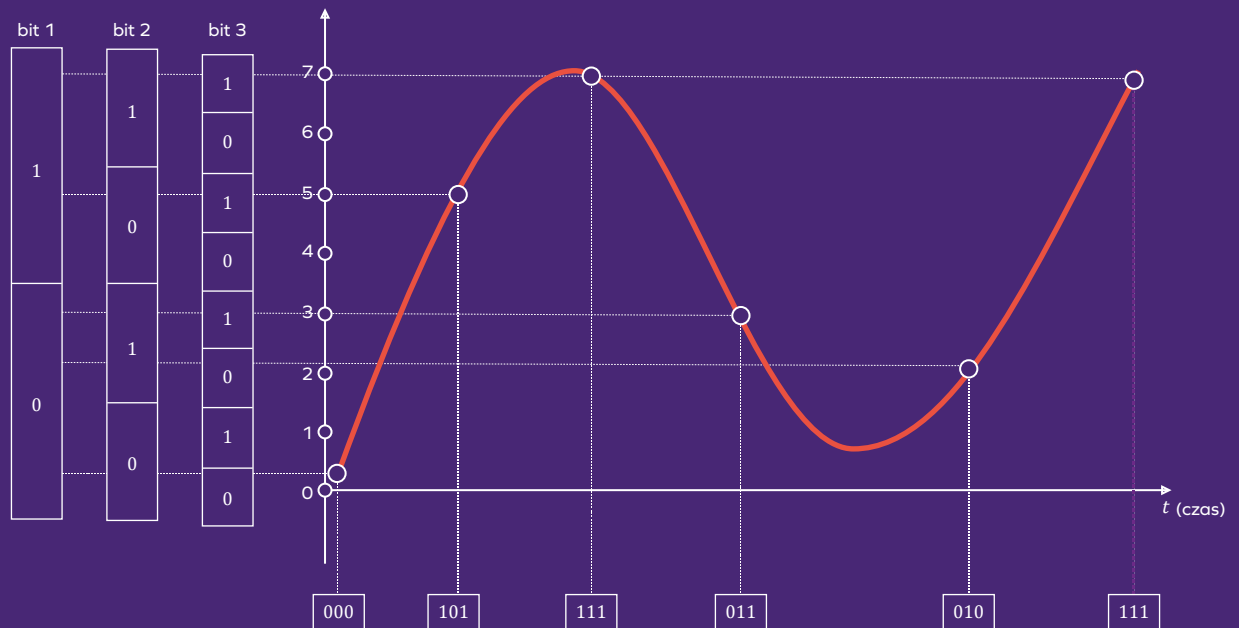
Aby przeprowadzić kwantyzację musimy ustalić ile bitów przyznamy do opisu wartości sygnału w próbce. Znowu – im będzie ich więcej, z tym większą dokładnością opiszemy wartość sygnału. Niestety ma to także negatywne konsekwencje, podobnie jak w przypadku zwiększania liczby próbek.

W przykładzie na Rys. 4 przyjęliśmy, że do kwantyzacji wykorzystamy 3 bity. Znając zakres zmienności sygnału analogowego (w naszym przypadku od 0 do 7), możemy teraz przyporządkować wartości tych bitów dla poszczególnych próbek.

W Lekcji 1 pokazaliśmy sprytną metodę odgadywania liczby z pewnego przedziału przez kolejne połowienie przedziałów zmienności na podstawie uzyskiwanych informacji.

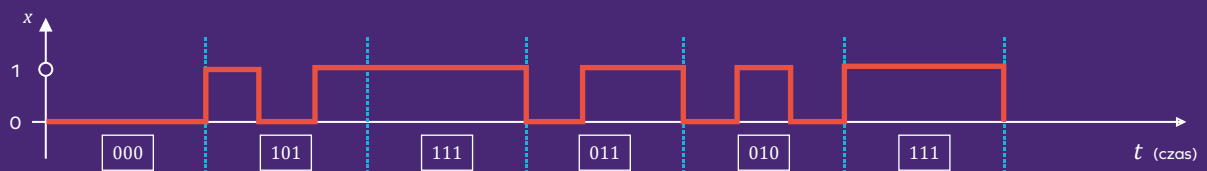
Wykorzystajmy tę metodę, dla ustalenia bitów w pierwszej próbce. Dzielimy cały przedział zmienności na połowę. Czy wartość sygnału znajduje się w górnej połowie (tzn. powyżej 3,5)? Jak widzimy, wartość sygnału w pierwszej próbce to ok. 0,2, zatem odpowiedź jest negatywna i bitowi 1 przydzielamy wartość 0. Skoro wartość próbki znajduje się w dolnej połowie zmienności, dzielimy na połowę tym razem właśnie ten zakres. Czy wartość próbki znajduje się w górnej połowie tego nowego podziału (tzn. powyżej 1,75)? Nie, zatem przydzielamy bitowi 2 wartość 0 i znowu zajmujemy się dolną połową, którą dzielimy na dwie części i analogicznie dla bitu 3 uzyskujemy wartość 0. Trzy bity pierwszej próbki mają zatem wartości 000.

Korzystając ze schematu na Rys. 4 możemy wartości bitów odczytać niemal natychmiastowo, rysując od danej próbki w lewo linię poziomą i odczytując na podstawie punktu przecięcia linii z kolumnami poszczególnych bitów właściwą wartość. W ten sposób ustalamy trzybitowe sekwencje dla wszystkich próbek na Rys. 4.



Rys. 4. Próbkowanie i kwantyzacja sygnału analogowego.

Sygnał cyfrowy będący połączeniem wszystkich trzybitowych sekwencji pokazano na Rys. 5. Zwróćmy uwagę, że w niczym nie przypomina on krzywej z Rys. 4.



Rys. 5. Sygnał cyfrowy otrzymany po konwersji sygnału z Rys. 4.

Czy można dokonać konwersji w przeciwną stronę (cyfrowo-analogową, C/A)? Tak, wystarczy mieć informację o odstępach czasowych pomiędzy próbkami i, dla właściwych chwil czasu, przyporządkować wartość sygnału analogowego na podstawie określonej dla danej chwili sekwencji bitowej (korzystając ze schematu na Rys. 4, ale w przeciwnym kierunku niż poprzednio). Po odtworzeniu ciągu próbek przeprowadzamy przez nie **możliwie** gładką krzywą. Dokładność całego procesu zależy od częstotliwości próbkowania oraz liczby bitów przypadających na jedną próbkę w procesie kwantyzacji.

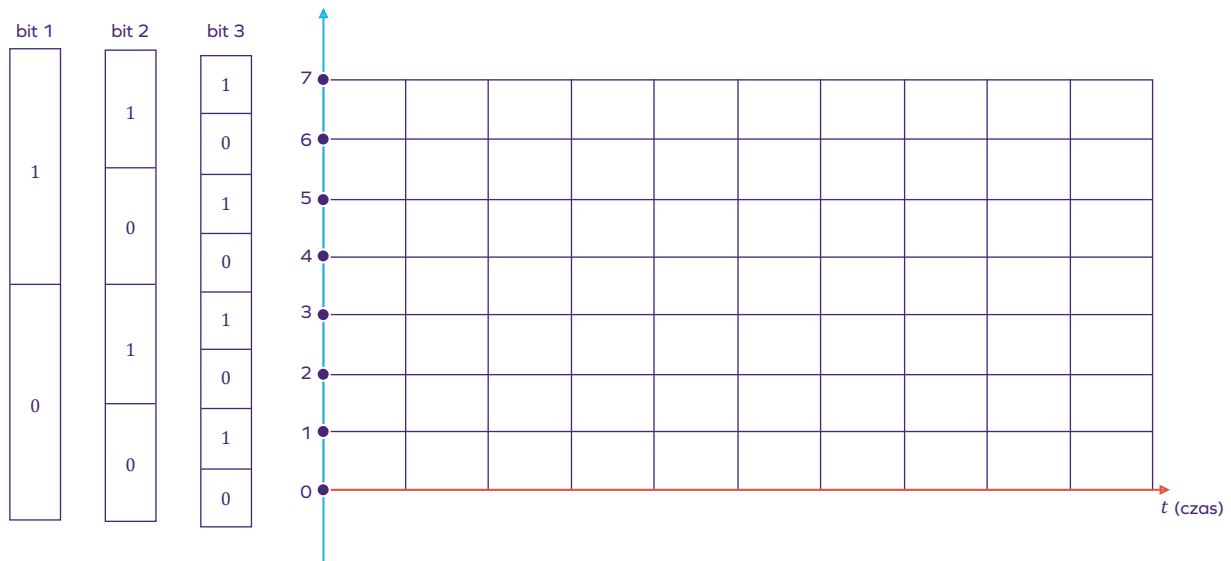


Dla zainteresowanych. Okazuje się, że jeżeli sygnał analogowy ma ograniczone od góry pasmo przez częstotliwość f_g , to wystarczy go próbować z częstotliwością dwukrotnie większą niż f_g , by go potem idealnie odtworzyć z ciągu jego próbek. Mówi o tym tzw. twierdzenie o próbkowaniu. Niestety, kwantyzacja zawsze wprowadza pewną niedokładność, dlatego przy dużych wymaganiach na jakość konwersji A/C stosuje się dużą liczbę bitów przypadających na próbkę (nawet 24 bity w systemach audio wysokiej jakości).



Doświadczenie

Zobaczymy działanie konwersji A/C i C/A w praktyce. Do przeprowadzenia doświadczenia będziemy potrzebować trzech osób. Pierwsza osoba – „nadawca” – po wydrukowaniu diagramu z Rys. 6 rysuje na nim dowolną krzywą, która mogłaby reprezentować sygnał analogowy (trzeba przypilnować by dla danej chwili czasowej sygnał miał tylko jedną wartość). Krzywa nie powinna być też za bardzo „powichrowana” – najlepiej jeśli gładkością przypomina krzywą z Rys. 4.



Rys. 6. Diagram do doświadczenia z konwersją A/C i C/A.

Druga osoba – „konwerter A/C” – otrzymuje od „nadawcy” diagram z krzywą, ale nie pokazuje go trzeciej osobie. Następnie próbuje ocenić, ile próbek jest koniecznych do właściwej reprezentacji sygnału. Czy wystarczy pobrać próbki co trzecią kratkę, czy może co dwie? A może niezbędne będzie spróbkowanie sygnału co jedną kratkę? Po podjęciu decyzji, dla każdej próbki „konwerter A/C” zamienia jej wartość na sekwencję trzech bitów postępując tak, jak pokazywaliśmy w Etapie 4 niniejszej lekcji. Następnie zapisuje na oddzielnej kartce sekwencje bitów dla kolejnych próbek oddzielone przecinkami (np. 110, 010, 000, itd.). Po skończeniu pracy przekazuje kartkę z sekwencjami (ale nie diagram!) osobie trzeciej. Musi też udzielić informacji o tym, co ile kratek zostały pobrane próbki.

Osoba trzecia – „odbiorca” – spróbuje teraz odtworzyć oryginalny sygnał pełniąc przy okazji rolę konwertera C/A. Mając wydrukowaną własną kopię diagramu z Rys. 6 oraz informację o odstępach pomiędzy próbkami stara się odtworzyć wartość sygnału analogowego w każdej próbce na podstawie sekwencji bitów oraz chwili pobrania próbki. Wynikiem powinien być ciąg punktów na wykresie, które następnie trzeba połączyć gładką krzywą. Dopiero po zakończeniu tego zadania „nadawca” i „odbiorca” mogą porównać sygnał oryginalny z sygnałem odtworzonym.



Pytania do dyskusji:

- Czy krzywe są podobne? Jak bardzo się różnią?
- Czy różnice mogą być wynikiem zbyt rzadkiego próbkowania? Czy warto powtórzyć doświadczenie z bardziej zagęszczonymi próbkami? Oczywiście w razie powtórzenia doświadczenia „odbiorcą” powinna być inna osoba, która nie widziała oryginalnego sygnału.
- Czy różnice mogą być wynikiem zbyt małej liczby bitów? Jaka może być maksymalna różnica w chwilach próbkowania pomiędzy sygnałem oryginalnym i odtworzonym przez „odbiorcę”?
- Czy domyślasz się, jak należy zmodyfikować schemat na Rys. 4, by dołożyć „bit 4” dla etapu kwantyzacji? Jak bardzo wzrośnie ilość pracy przy konwersji A/C i C/A?



Słowniczek

A/C – skrótowe oznaczenie konwersji analogowo-cyfrowej.

C/A – skrótowe oznaczenie konwersji cyfrowo-analogowej.

Częstotliwość próbkowania – częstotliwość z jaką pobierane są próbki sygnału analogowego; odwrotność odstępu czasu pomiędzy próbkami.

Demodulacja – odtworzenie oryginalnego sygnału niosącego informację (modulującego) ze zmodulowanej fali nośnej.

Konwersja analogowo-cyfrowa (A/C) – przetworzenie sygnału analogowego na sygnał cyfrowy (ciąg bitów).

Konwersja cyfrowo-analogowa (C/A) – przetworzenie sygnału cyfrowego (ciągu bitów) na sygnał analogowy.

Kwantyzacja – zamiana wartości sygnału w próbce na sekwencję bitów; po kwantyzacji liczba poziomów sygnału staje się skończona.

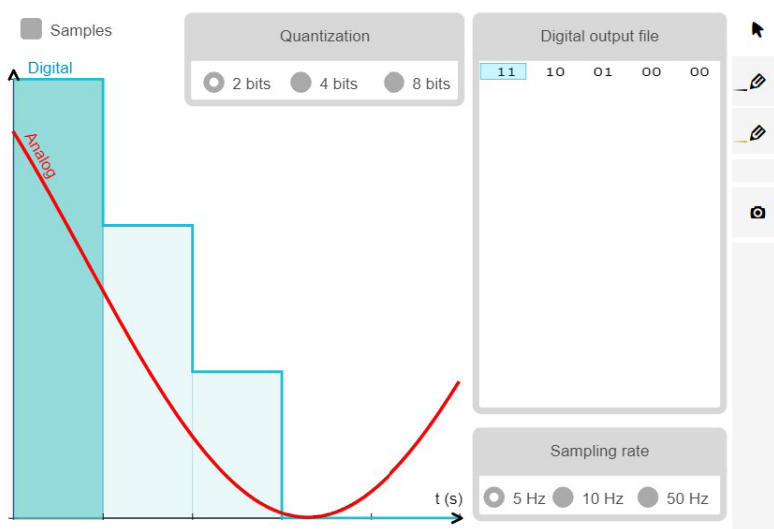
Próbkowanie – pobranie ciągu próbek sygnału analogowego, najczęściej w równomiernych odstępach czasowych.

Twierdzenie o próbkowaniu – sygnał analogowy można w pełni odtworzyć na podstawie ciągu jego próbek, jeżeli częstotliwość próbkowania przekracza dwukrotnie maksymalną częstotliwość z pasma tego sygnału.



Materiały zewnętrzne

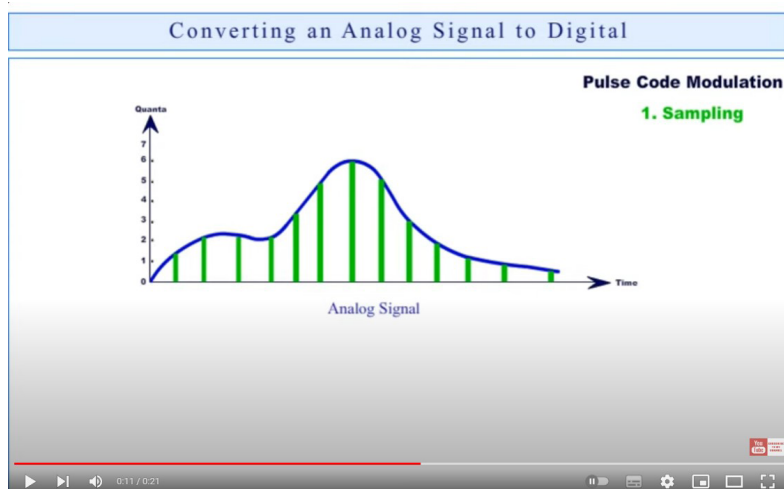
1. Aplikacja online demonstrująca konwersję A/C. Dla danego sygnału analogowego (krzywa czerwona) można swobodnie zmieniać liczbę bitów kwantyzacji (*Quantization*: 2, 4, 8 bitów) oraz częstotliwość próbkowania (*Sampling rate*: 5, 10, 50 Hz). Sekwencja bitów po konwersji pokazywana jest w oknie „*Digital output file*”.



Zeskanuj QR kod



2. Animacja obrazująca konwersję A/C (tytuł filmu: *Animation of Analog to Digital Conversion*)



Zeskanuj QR kod



3. Czym różni się radio AM od FM?

Zeskanuj QR kod



4. Modulacja FM w klasycznej radiofonii oraz porównanie z modulacją AM.

Zeskanuj QR kod

**Praca domowa**

1. Załóżmy, że chcielibyśmy nadać przez antenę dipolową falę EM o dokładnie takiej samej częstotliwości jak dźwięk C_1 (do) na klawiaturze fortepianu czyli $f = 261,6 \text{ Hz}$. Jaka może być najmniejsza długość anteny, która pozwoli na efektywną energetycznie emisję tej fali? A jeżeli tym samym dźwiękowym sygnałem zmodulujemy AM falę o częstotliwości nośnej $f_n = 2 \text{ GHz} = 2 \cdot 10^9 \text{ Hz}$? Przyjmij prędkość fali EM jako $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Wskazówka: patrz Lekcja 3.

Dane:

$$f = 261,6 \text{ Hz}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$f_n = 2 \text{ GHz} = 2 \cdot 10^9 \text{ Hz}$$

Szukane:

$$l = ? \text{ (bez modulacji i z modulacją)}$$

2. Jak widać na Rys. 4 przy trzech bitach przypadających na próbkę sygnału otrzymujemy osiem poziomów sygnału cyfrowego. A jak to będzie przy czterech bitach? Czy potrafisz odgadnąć ogólny wzór na liczbę poziomów po kwantyzacji, gdy bitów jest N .