

Marta Walencykowska
Adam Kijewski

Przegląd możliwości rozpoznawania wybranych typów modulacji sygnałów

Od lat jednym z najskuteczniejszych sposobów komunikacji jest wykorzystanie przestrzeni radiowej. Dlatego tak istotne dla bezpieczeństwa państwa stało się posiadanie skutecznego radiokontrwywiadu i rozpoznania radioelektronicznego, co potwierdzają między innymi wydarzenia, do których doszło w połowie sierpnia 1920 r., gdy na przedpolach Warszawy toczyły się zacięte walki. Michaił Tuchaczewski, kontynuując pochód Armii Czerwonej, przygotowywał się do ostatecznego rozbicia głównych sił polskich. Wszystko wskazywało na to, że przeważające liczebnie wojska bolszewickiego Frontu Zachodniego osiągną sukces. Historia potoczyła się jednak inaczej, w dużej mierze dzięki pracy polskiego radiowywiadu. Jeden z jego oficerów, por. Jan Kowalewski, otrzymując Krzyż *Virtuti Militarii*, usłyszał od Szefa Sztabu Generalnego generała Sikorskiego: *To za wygraną wojnę*.

Wiadomości, w celu ich utajnienia, przekształcano już od czasów starożytnych. Wymuszało to na potencjalnym przeciwniku opracowywanie metod łamania (dekryptażu) zastosowanych zabezpieczeń. Nie znając klucza do algorytmu szyfrowego lub wręcz samego algorytmu, próby dekryptażu były oparte głównie na analizie przejętych szyfrotelegramów. Dostępne kanały łączności (kurierzy, skrytki) nie dostarczały zbyt wielu materiałów do analizy, co więcej – nieumiejętne przejęcie szyfrotelegramu sprawiało, że komunikujące się strony miały świadomość przeprowadzania takiego rodzaju prób.

Zastosowanie fal radiowych w celach komunikacyjnych diametralnie zmieniło efektywność przekazywania informacji. Umożliwiło ono z jednej strony tanią i prostą łączność działającą w sposób niemal natychmiastowy, nawet na znaczne odległości. Z drugiej strony natomiast pozwalało na prowadzenie przez przeciwnika niczym nieograniczonego nasłuchu, wymuszając w ten sposób potrzebę szyfrowania wiadomości. W przytoczonym na wstępie przykładzie Armia Czerwona podczas wojny polsko-bolszewickiej miała liczne, dobrze wyposażone i zorganizowane służby łączności i kryptologiczne, przejęte z dawnej carskiej armii rosyjskiej wraz z ośrodkami badawczymi i przemysłowymi oraz bazą szkoleniową. Łączność radiowa była tak ważnym ogniwem dowodzenia na szczeblu operacyjnym, że nie używano innych środków łączności, mając mylne przeświadczenie o skuteczności i bezpieczeństwie tej metody komunikacji. Tymczasem sygnały przesyłane drogą radiową były przechwytywane, a stosowane przez stronę bolszewicką metody szyfrowania skutecznie łamane przez naczelnika Wydziału II Biura Szyfrów por. Kowalewskiego. Szybkość odczytywania rosyjskich depesz umożliwiało bieżące śledzenie zamiarów i działań Armii Czerwonej, doprowadzając do jej pokonania.

Przykład ten pokazuje, jak dalekosiężne skutki dla państwa może mieć skutecznie działający radiokontrwywiad, w tym prowadzenie prób kryptoanalizy otrzymanych z nasłuchu szyfrotelegramów. Warto podkreślić, że służby wywiadowcze odradzającego się państwa polskiego były tworzone już od pierwszych dni listopada 1918 r. (Wydział II Informacyjny Sztabu Generalnego Wojska Polskiego). Przechwytywanie obcych radio-depsz trwało przynajmniej od marca 1919 r., z początkiem sierpnia 1919 r. natomiast

został zorganizowany przez por. Kowalewskiego Wydział II Biura Szyfrów, zajmujący się dekryptażem. Dzięki takiemu świadomemu i długofalowemu wysiłkowi organizacyjnemu można było operacyjnie wykorzystać działanie radiokontrywiadu podczas działań wojennych w sposób optymalny. Nie jest więc przesadne twierdzenie, że istnieje potrzeba prowadzenia nieustannych prac związanych z analizą informacji przesyłanych drogą radiową, szczególnie w obliczu obecnych wydarzeń na Ukrainie i związanej z nimi oceny bezpieczeństwa Rzeczypospolitej Polskiej.

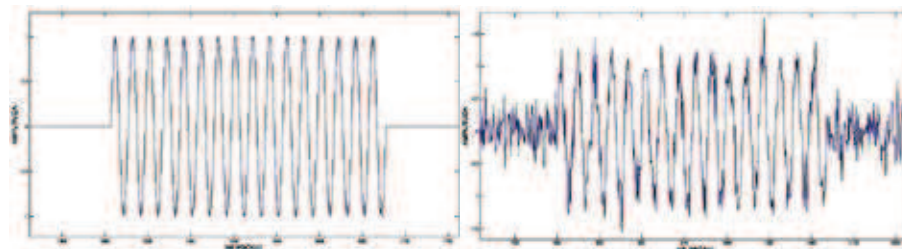
W artykule opisano jeden z algorytmów rozpoznawania wybranych typów modulacji i sygnałów, który może znaleźć zastosowanie w systemach automatycznej identyfikacji sygnałów na rzecz rozpoznania radioelektronicznego lub radiokontrywiadu.

Obecnie obserwuje się dynamiczny rozwój tzw. radia programowalnego (ang. *Software Defined Radio* – SDR), w którym elementy elektroniczne, takie jak mieszacze, filtry itp., są realizowane programowo. Dzięki realizacji programowej tych elementów sprzęt radioamatorski oraz aplikacje pozwalające na przesyłanie informacji z wykorzystaniem różnego typu modulacji cyfrowych stały się ogólnodostępne. Liczba typów modulacji stosowanych w radioamatorstwie jest na tyle duża, że zapewnienie szybkiego i skutecznego ich rozpoznawania jest kluczowe dla specjalistów tworzących systemy automatycznego rozpoznawania sygnałów. Poprawna klasyfikacja typu zastosowanej modulacji pozwala na dalszą analizę sygnału pod kątem możliwości odczytania zawartej w nim informacji.

Podstawowe typy modulacji

System radiokomunikacyjny służy dostarczaniu drogą radiową wiadomości od nadawcy do odbiorcy. W tym celu w nadajniku należy dokonać takiego przekształcenia sygnału informacyjnego, aby możliwe było przekazanie go przez kanał transmisyjny w rozpoznawalnej przez odbiorcę formie. Takim przekształceniem jest modulacja, która polega na zmianie określonych parametrów sygnału pod wpływem innego sygnału. Sygnał, którego parametry są zmieniane, nazywany jest sygnałem nośnym, sygnał zaś, który determinuje zmiany, to sygnał modulujący. Odtworzenie sygnału zmodulowanego jest dokonywane po stronie odbiorczej w procesie zwanym demodulacją.

Modulacja jest stosowana w celu przesyłania informacji w taki sposób, aby nawet po naniesieniu na przesyłany sygnał zakłóceń występujących w kanale transmisyjnym możliwe było odczytanie zawartej w nim informacji. Na rysunku 1 przedstawiono fragment sygnału (sinusoidalnego) oraz jego odpowiednik zniekształcony przez szum.



Rys. 1. Sygnał oryginalny (po lewej) oraz zszumiony (po prawej).

Źródło: Opracowanie własne.

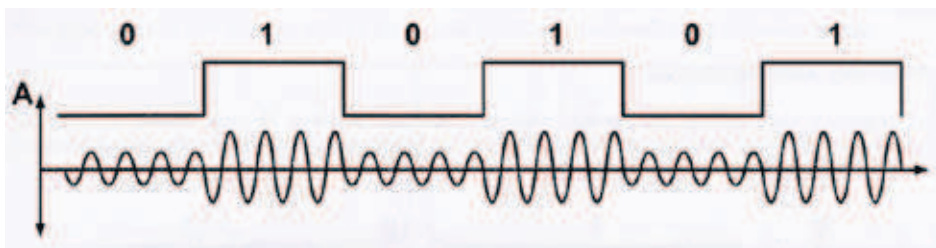
Parametrami sygnału nośnego, sinusoidalnego, które mogą zostać zmienione pod wpływem sygnału modulującego, są:

- amplituda $A(t)$,
- częstotliwość $f(t)$,
- faza $j(t)$.

W związku z powszechnym zastosowaniem w radiokomunikacji modulacji cyfrowych, w dalszej części artykułu zostaną przedstawione następujące ich rodzaje:

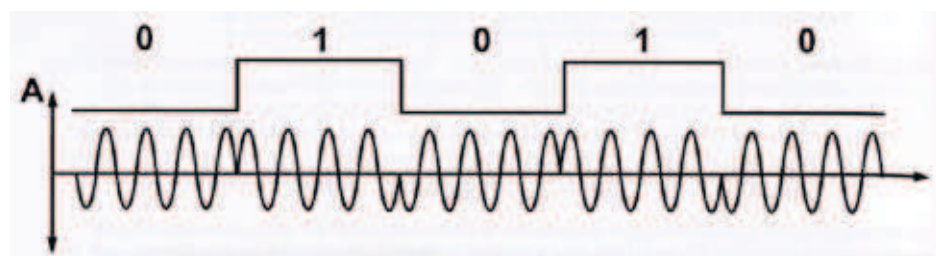
- kluczkowanie amplitudy (ang. *Amplitude shift keying* – ASK),
- kluczkowanie częstotliwości (ang. *Frequency shift keying* – FSK),
- kluczkowanie fazy (ang. *Phase shift keying* – PSK),
- kwadraturową modulację amplitudowo-fazową (ang. *Quadrature amplitude modulation* – QAM).

Na rysunkach 2–4 przedstawiono zmianę parametrów sygnału nośnego pod wpływem binarnego sygnału modulującego.



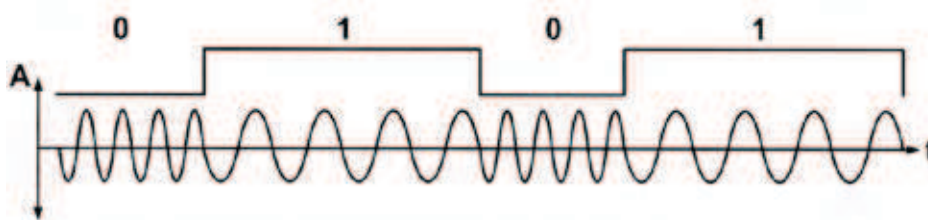
Rys. 2. Zmiana amplitudy sygnału ASK

Źródło: R. Proesch, *Technical Handbook for Radio Monitoring HF*, Norderstedt 2009, s. 33.



Rys. 3. Zmiana fazy sygnału PSK.

Źródło: R. Proesch, *Technical Handbook for Radio Monitoring HF*, Norderstedt 2009, s. 40.



Rys. 4. Zmiana częstotliwości sygnału FSK.

Źródło: R. Proesch, *Technical Handbook for Radio Monitoring HF*, Norderstedt 2009, s. 34.

W przypadku zmiany amplitudy przedstawionej na rysunku 2 dotyczącej modulacji ASK sygnał o mniejszej amplitudzie reprezentuje symbol binarny 0, sygnał o większej amplitudzie natomiast – symbol binarny 1. Dla binarnego PSK (rys. 3) para sygnałów reprezentujących symbole binarne 0 i 1 jest przesunięta względem siebie w fazie o wartość π . Z kolei w modulacji binarnej FSK (rys. 4) symbole binarne 0 i 1 są reprezentowane przez sygnały o dwóch różnych częstotliwościach (f_0 i f_1).

W celu zwiększenia ilości bitów przypadających na symbol¹ stosuje się modulacje wielowartościowe. W przypadku modulacji wielowartościowych, ilość możliwych symboli wynosi $M=2^n$, gdzie n jest liczbą bitów przypadających na jeden symbol. Technika M -wartościowa obejmuje również technikę binarną, która stanowi jej przypadek szczególny ($n=1$, $M=2$).

Z zastosowaniem modulacji cyfrowych wiążą się następujące pojęcia:

- prędkość bitowa (ang. *bit rate*) – miara określająca liczbę bitów transmitowanych w czasie jednej sekundy (*bps*),
- prędkość sygnalizacji (ang. *symbol rate*) – ilość symboli transmitowanych w czasie jednej sekundy, wyrażana w hercach (Hz) lub baudach (Bd)².

Dla modulacji binarnych prędkość bitowa jest równa prędkości sygnalizacji, ponieważ jeden symbol odpowiada jednemu bitowi. W przypadku modulacji M -wartościowych prędkość bitowa jest natomiast równa iloczynowi prędkości sygnalizacji oraz ilości bitów przypadających na symbol. Przykładowo dla modulacji 8-FSK ($n = 3$, $M = 2^3 = 8$) prędkość bitowa będzie trzykrotnie większa od prędkości sygnalizacji, ponieważ na każdy symbol reprezentowany przez sygnał o określonej częstotliwości (F_m gdzie $m = 1, \dots, 8$) przypadają trzy bity informacyjne zgodnie z zestawieniem 1.

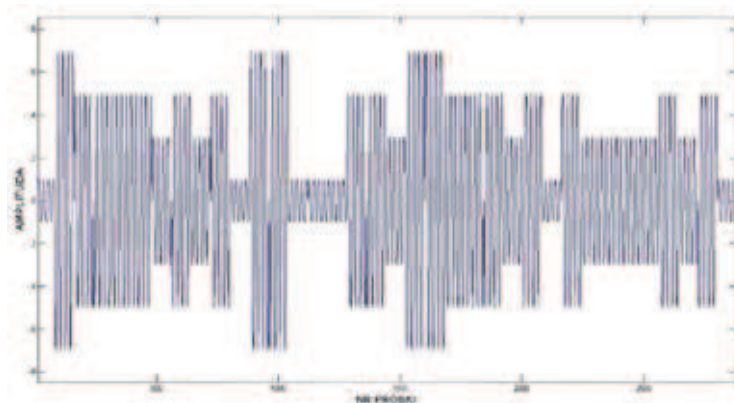
¹ Symbol dla sygnału zmodulowanego to najczęściej wyrażenie przedstawione w postaci binarnej, np. dla modulacji dwuwartościowych (np. BPSK) są to: „0” i „1”, dla modulacji czterowartościowych (np. 4-ASK, 4-PSK itd.) będą to: „00”, „01”, „10”, „11”, itd.

² Miara liczby zmian symboli transmitowanych w ciągu jednej sekundy, za: R. Proesch, *Technical Handbook For Radio Monitoring HF*, Norderstedt 2009, s. 158.

Zestawienie 1. Przyporządkowanie sekwencji bitów poszczególnym częstotliwościom.

Częstotliwość sygnału	Sekwencja bitów
F1	000
F2	001
F3	010
F4	011
F5	100
F6	101
F7	110
F8	111

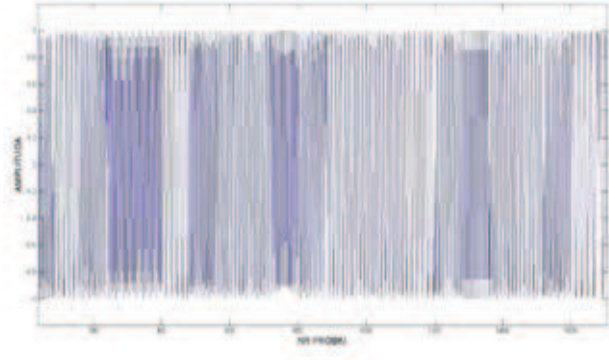
Przykładowe przebiegi sygnałów z wielowartościową modulacją 8-ASK, 8-FSK, 8-PSK oraz 16-QAM przedstawiono na rysunkach 5–8. Dla modulacji ASK widoczne są zmiany amplitudy odpowiadające zmieniającym się symbolom. W przypadku modulacji FSK zmianie ulega częstotliwość sygnału nośnego, dla PSK natomiast zmiana symbolu jest związana z przesunięciem fazy sygnału. Modulacje FSK i PSK charakteryzują się stałą obwiednią³, co sprawia, że są bardziej odporne na nieliniowości amplitudy występujące podczas transmisji radiowej. Modulacja QAM łączy z kolei cechy ASK oraz PSK, czyli każdemu z symboli odpowiada określony poziom amplitudy oraz przesunięcia fazy.



Rys. 5. Przykładowy przebieg sygnału ASK.

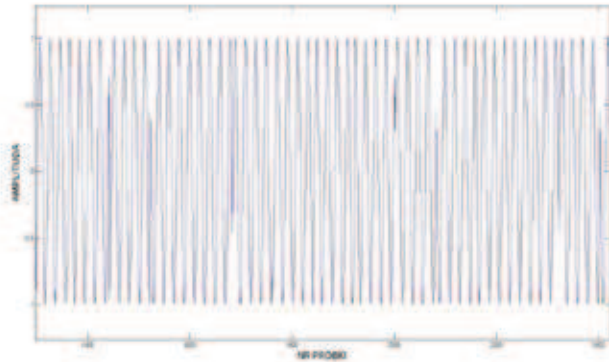
Źródło: Opracowanie własne.

³ Pojęcie obwiedni jest stosowane w przetwarzaniu sygnałów i związane jest z chwilową wartością amplitudy sygnału.



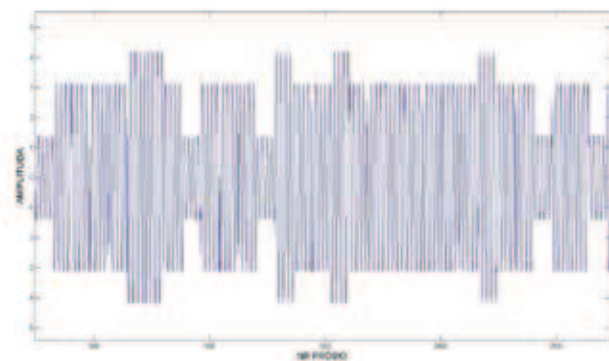
Rys. 6. Przykładowy przebieg sygnału FSK.

Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 7. Przykładowy przebieg sygnału PSK.

Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 8. Przykładowy przebieg sygnału QAM.

Źródło: Opracowanie własne.

Cechy sygnałów zmodulowanych

Kluczowe w realizacji algorytmu rozpoznawania jest wyodrębnienie cech unikalnych dla każdego z obserwowanych typów modulacji. Cechy sygnałów zmodulowanych mogą być wyznaczone na podstawie analizy wartości chwilowych amplitudy, częstotliwości lub fazy sygnału⁴. W celu rozróżnienia poszczególnych typów modulacji wykorzystuje się również analizę cepstralną⁵ oraz transformatę: Fouriera lub cosinusową oraz transformację falkową.

W dalszej części artykułu została omówiona metoda ekstrakcji cech wybranych sygnałów zmodulowanych, w której zastosowano ciągłą transformację falkową⁶. Ciągłą transformacją falkową (ang. *Continous Wavelet Transform* – CWT) to doskonałe narzędzie do analizy czasowo-częstotliwościowej sygnałów. CWT sygnału $x(t)$ można przedstawić następującym wzorem⁷:

$$CWT(\tau, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt$$

gdzie: τ – przesunięcie czasu, a – skala, $x(t)$ – analizowany sygnał, $\psi^* \left(\frac{t-\tau}{a} \right)$ – falka⁸ przesunięta w czasie o τ i „przeskalowana” o wartość a , znak * – sprzężenie.

Zastosowanie CWT może ponadto posłużyć do estymacji (oszacowania) parametrów sygnału, jak np. długość symbolu, prędkość sygnalizacji itp. W celu zapoznania się z podstawami teoretycznymi i możliwościami zastosowania CWT w przetwarzaniu i analizie sygnałów warto sięgnąć po literaturę⁹. Na rysunkach 9–12 przedstawiono moduł CWT (oznaczany dalej jako |CWT|) dla wybranej skali, odpowiadający poszczególnym typom modulacji. Na ich podstawie można stwierdzić, że:

- kluczowaniu amplitudy sygnału (ASK) towarzyszy „schodkowy” przebieg |CWT| (rys. 9), związany ze zmianami amplitudy,
- kluczowaniu częstotliwości (FSK) również towarzyszy „schodkowy” przebieg |CWT| (rys. 11), związany ze zmianami częstotliwości,
- w przypadku modulacji PSK (rys. 12) nie obserwujemy „schodków”, a jedynie skokowe zmiany |CWT| związane z nieciągłościami fazy (występującymi w momencie zmiany symboli),

⁴ Wu Juan-ping i in., *Automatic Modulation Recognition of Digital Communication Signals*, First International Conference on Pervasive Computing, Signal Processing and Applications, Publication Year 2010, s. 590–593.

⁵ R.M. Al-Makhlaway, M.M. Abd Elnaby, H.A. El-Khobby, *Automatic Modulation Recognition in Wireless Systems Using Cepstral Analysis and Neural Networks*, 29th NATIONAL RADIO SCIENCE CONFERENCE (NRSC 2012), April 10–12, 2012, Faculty of Engineering/Cairo University, Egypt, s. 1.

⁶ Transformacja falkowa jest przekształceniem stosowanym głównie w przetwarzaniu sygnałów. Pozwala na jednoczesne przedstawienie czasowych oraz częstotliwościowych własności sygnałów.

⁷ R. Proesch, *Technical Handbook For Radio Monitoring HF*, Norderstedt 2009, s. 33.

⁸ Transformacja falkowa dokonuje „rozbicia” sygnału na sygnały elementarne zwane falkami.

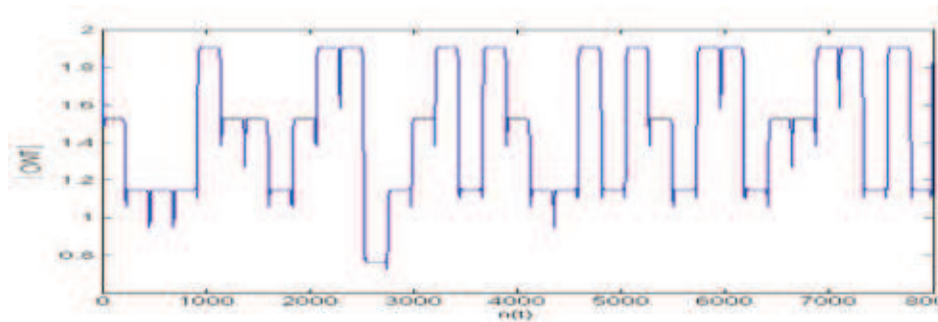
⁹ P.S. Addison, *The Illustrated Wavelet Transform Handbook, Introductory Theory and Applications in Science, Engeneering, Medicine and Finance*, New York 2002; Wu Juan-ping i in., *Automatic Modulation Recognition of Digital...*; K. Hassan i in., *Automatic Modulation Recognition Using Wavelet Transform and Neural Networks in Wireless Systems* [online], <http://asp.eurasipjournals.com/content/pdf/1687-6180-2010-532898.pdf> [dostęp: 1 X 2014]. C. Ho, W. Prokopiw, Y.T. Chan, *Modulation identification of digital signals by the wavelet transform*, „Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings” 2000, t. 147, s. 169–176.

- modulacji amplitudowo-fazowej QAM towarzyszy „schodkowy” przebieg $|CWT|$ (rys. 10) związany ze zmianami amplitudy oraz skokowe zmiany związane z nieciągłościami fazy charakterystycznymi dla kluczowania fazy.

Dodatkowe cechy pozwalające na odróżnienie modulacji ASK od FSK można uzyskać po unormowaniu¹⁰ sygnału zmodulowanego przed dokonaniem transformacji falkowej. Wówczas można zauważyć, że:

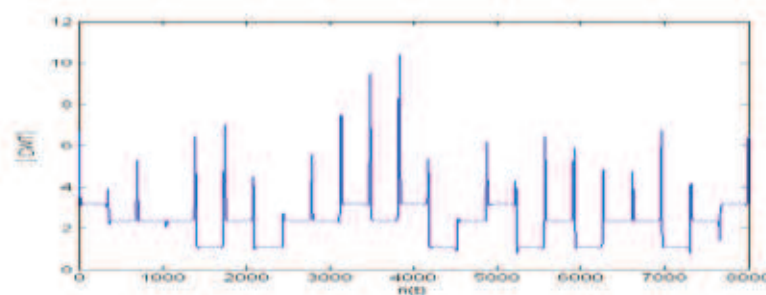
- zanikają widoczne na rysunkach 9 i 10 „schodki”, związane z modulacją amplitudy dla sygnałów ASK i QAM. Transformacja falkowa przyjmuje stały poziom (rys. 13) i ma postać podobną do $|CWT|$ sygnału PSK (pozostają jedynie nieciągłości związane ze zmianami fazy),
- $|CWT|$ unormowanego sygnału FSK (rys. 14) pozostaje schodkowa,
- $|CWT|$ unormowanego sygnału PSK nie zmienia się w stosunku do $|CWT|$ nieunormowanego sygnału PSK.

Wykorzystanie powyższych cech charakterystycznych pozwala na odróżnienie poszczególnych modulacji.



Rys. 9. $|CWT|$ sygnału ASK.

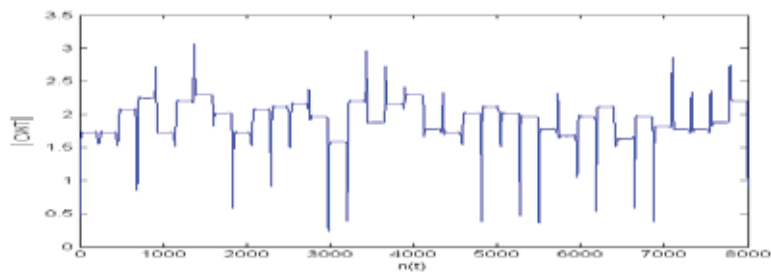
Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 10. $|CWT|$ sygnału QAM.

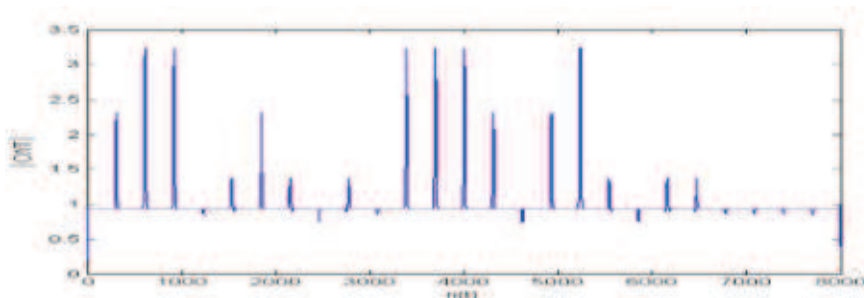
Źródło: Opracowanie własne.

¹⁰ Unormowanie w przypadku sygnałów zmodulowanych oznacza normalizację amplitudy zespolonej. Pojęcie amplitudy (obwiedni) zespolonej jest pojęciem złożonym z dziedziny przetwarzania sygnałów i nie będzie omawiane szerzej.



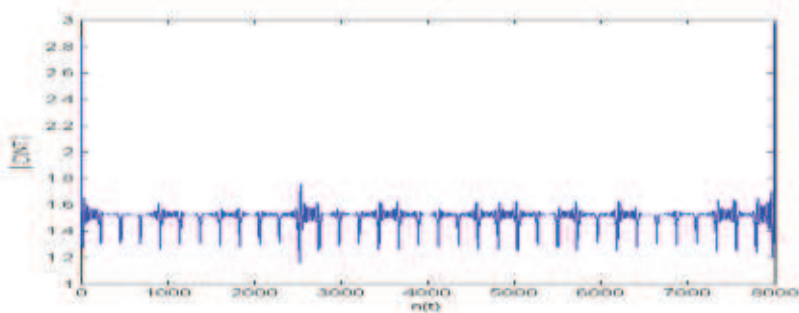
Rys. 11. |CWT| sygnału FSK.

Źródło: Opracowanie własne.



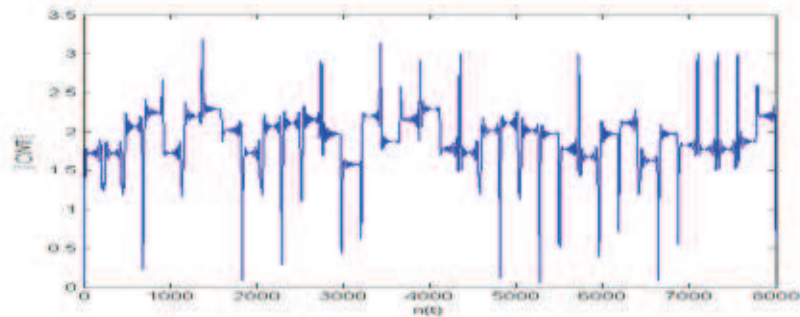
Rys. 12. |CWT| sygnału PSK.

Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 13. |CWT| unormowanego sygnału ASK.

Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 14. $|CWT|$ unormowanego sygnału FSK.

Źródło: Opracowanie własne.

Proces klasyfikacji

Możliwość automatycznej identyfikacji oraz klasyfikacji sygnałów jest najważniejszą cechą skutecznego systemu rozpoznawania sygnałów. Publikacje związane z tematyką dotyczącą identyfikacji typów modulacji sygnałów zawierają najczęściej opis jednej z dwóch metod klasyfikacji. Pierwsza, obecnie rzadziej stosowana, bierze pod uwagę wykorzystanie tzw. drzew decyzyjnych¹¹. Druga, która w chwili obecnej przeżywa dynamiczny rozwój, jest oparta na teorii sztucznych sieci neuronowych (SSN). Ze względu na dużą liczbę publikacji¹² dotyczących zastosowania sztucznych sieci neuronowych w dalszej części artykułu zostaną przedstawione jedynie podstawowe informacje pozwalające na zrozumienie zasady ich działania.

Sztuczne sieci neuronowe znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach nauki, między innymi w elektronice, biocybernetyce, statystyce, automatyce, a nawet w medycynie. Funkcje pełnione przez SSN można podzielić na kilka podstawowych grup, np. rozpoznawanie i klasyfikację wzorców, prognozowanie (między innymi finansowe) czy sterowanie procesami. W niniejszym artykule sztuczna sieć neuronowa pełni funkcję klasyfikatora, którego zadaniem jest podjęcie decyzji o rodzaju zastosowanego typu modulacji na podstawie cech sygnału zmodulowanego dostarczonych na wejście sieci.

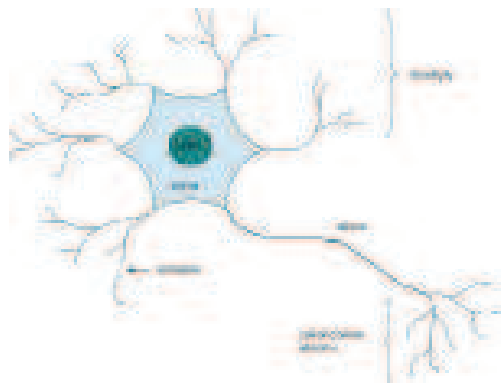
Działanie sztucznych sieci neuronowych jest wzorowane na układzie nerwowym żywych organizmów (zwierząt), w którym podstawowym elementem jest neuron (komórka nerwowa). Neuron jest zbudowany z ciała komórki (tzw. somy) oraz wypustek – dendrytów i aksonu (rys. 15). Dendryty pośredniczą w przekazywaniu sygnałów wejściowych (z innych komórek nerwowych lub receptorów), sygnał wyjściowy zaś jest wyprowadzany z komórki nerwowej przez akson. Przesyłanie sygnałów między zakończeniami aksonu jednego neuronu a dendrytami drugiego odbywa się za pomocą synaps¹³.

¹¹ Drzewo decyzyjne – graficzna metoda wspomagania procesu decyzyjnego.

¹² He Bing i in., *Modulation Recognition of Communication Signal Based on Wavelet RBF Neural Network*, 2010, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), t. 2, s. 490–492; K. Hassan i in., *Automatic Modulation Recognition Using Wavelet...*, s. 1–13.

¹³ Synapsa to miejsce zakończenia aksonu i jednocześnie miejsce komunikacji z drugą komórką nerwową lub wykonawczą. Przekazanie impulsu z komórki na komórkę przebiega najczęściej za pomocą przekazników nerwowych (neuroprzekazników) na drodze chemicznej (rzadziej elektrycznej).

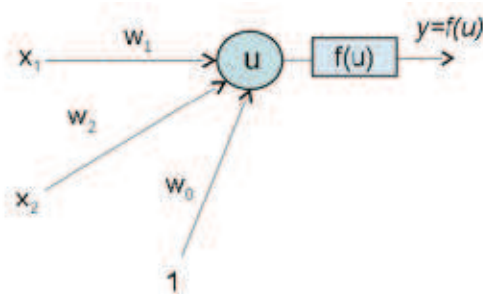
Mechanizm przesyłania sygnałów wewnątrz systemu nerwowego jest na tyle skomplikowany, że w celu jego uproszczenia przyjmuje się, że przekazywanie impulsów nerwowych między komórkami odbywa się pod wpływem bodźców (substancji chemicznych zwanych neuroprzekaźnikami) przychodzących z synaps¹⁴. Ze względu na różnicę wielkości i właściwości poszczególnych synaps taki sam sygnał docierający do różnych wejść komórki nerwowej może powodować słabsze lub mocniejsze jej pobudzenie. Wielkość pobudzenia komórki nerwowej zależy od ilości neuromediatora¹⁵ wydzielonego we wszystkich synapsach łącznie. W przypadku przekroczenia progu uaktywnienia komórki nerwowej, następuje gwałtowny wzrost sygnału wyjściowego transmitowanego przez akson do innych neuronów.



Rys. 15. Budowa neuronu.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie S. Osowski, *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*, Warszawa 2006, s. 10.

Sztuczna sieć neuronowa zawiera dużą liczbę elementów przetwarzających informacje, czyli neuronów. Każdy neuron charakteryzuje się określoną liczbą wejść. Na rys. 16 przedstawiono model sztucznego neuronu.



Rys. 16. Model sztucznego neuronu (u – potencjał neuronu, x – wejście neuronu, w – waga neuronu, y – wyjście, ewentualnie sygnał wyjściowy wyrażony funkcją aktywacji).

Źródło: Opracowanie własne.

¹⁴ S. Osowski, *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*, Warszawa 2006, s. 18.

¹⁵ Substancje chemiczne biorące udział w procesie transmisji bodźców z komórki na komórkę poprzez synapsy są nazywane neuromediatorami lub neuroprzekaźnikami.

Sygnały wejściowe są sumowane z odpowiednimi wagami¹⁶. Suma sygnałów wejściowych pomnożonych przez wagi jest nazywana potencjałem neuronu, który można przedstawić za pomocą wzoru¹⁷:

$$u = \sum_i x_i w_i$$

gdzie: u – potencjał neuronu, $i = 1, \dots, M$, gdzie M – ilość wejść neuronu, x_i – i -te wejście neuronu, w_i – i -ta waga neuronu.

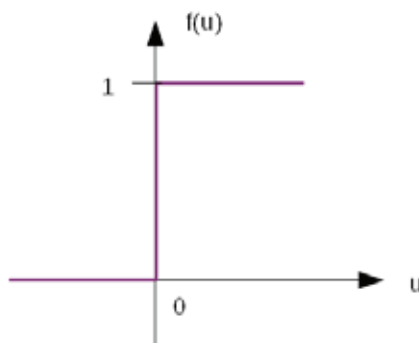
Sygnał wyjściowy neuronu jest opisywany wzorem³:

$$y = f(u)$$

gdzie: $f(u)$ – funkcja aktywacji neuronu.

Początkowo funkcja aktywacji neuronu miała postać funkcji skokowej, która przyjmuje wartość 1 dla $u > 0$ i wartość 0 dla $u \leq 0$ (rys. 17). Wprowadzenie dodatkowego wejścia o wartości 1 (tzw. biasu) i wadze w_0 pozwala na poprawę własności neuronu i powoduje, że próg skokowej funkcji aktywacji przesuwa się wzdłuż osi u w zależności od wartości, jaką przyjmuje w_0 .

Wraz z rozwojem sztucznych sieci neuronowych coraz częściej stosowano funkcję aktywacji typu sigmoidalnego, w której przejście od 0 do 1 odbywa się w sposób ciągły (rys. 18). Ze względu na różniczkowalność funkcji¹⁸ sigmoidalnej oraz możliwość zmiany jej nachylenia, w sieci zbudowanej z tego typu neuronów można zastosować algorytm uczenia wykorzystujące informacje o zmianach wartości y na wyjściach neuronów.



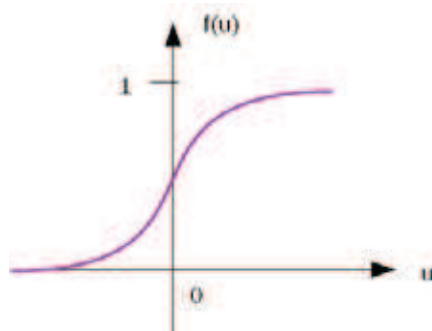
Rys. 17. Funkcja skokowa.

Źródło: Opracowanie własne.

¹⁶ Wagi to określone parametry połączeń między neuronami (współczynniki, przez które mnożone są poszczególne sygnały wejściowe neuronu), modyfikowane w procesie uczenia się sieci. Wagi mogą przyjmować zarówno wartości dodatnie (działanie pobudzające komórkę neuronową), jak i ujemne (działanie hamujące pobudzanie komórki neuronowej).

¹⁷ S. Osowski, *Sieci neuronowe...*, s. 18.

¹⁸ Różniczkowalność funkcji – możliwość obliczenia pochodnej funkcji w określonym przedziale. Oznacza to, że funkcja jest pozbawiona skokowych zmian, a wartości funkcji zmieniają się płynnie w przedziale różniczkowania.



Rys. 18. Funkcja sigmoidalna.

Źródło: Opracowanie własne.

Poza opisanymi powyżej sztucznymi neuronami można wymienić jeszcze neurony: radialny, typu adaline (ang. *Adaptive Linear Neuron*), instar i outstar Grossberga, typu WTA (ang. *Winner Takes All*), Hebba czy stochastyczny¹⁹.

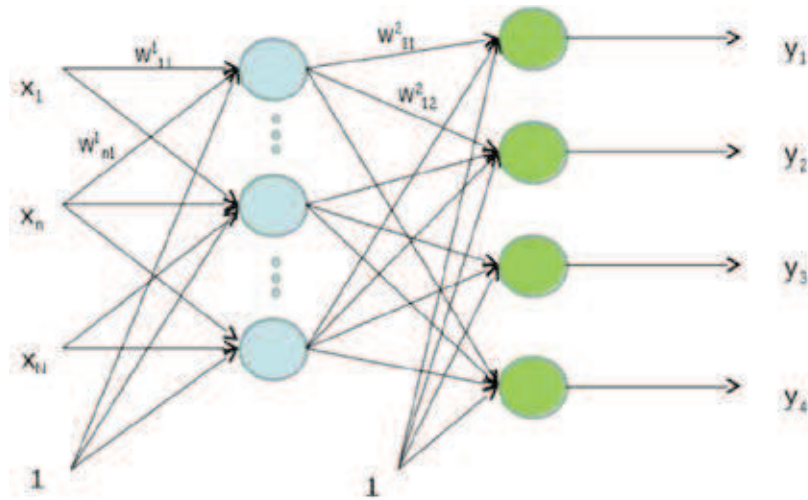
Połączone z sobą neurony tworzą strukturę nazywaną sztuczną siecią neuronową. Podstawowym kryterium podziału sieci jest kierunek przesyłania sygnałów. Na podstawie tego kryterium można wyróżnić sieć jednokierunkową i rekurencyjną. W sieci jednokierunkowej przepływ sygnałów odbywa się tylko w jednym kierunku – od wejść do wyjść. W sieciach rekurencyjnych jest stosowane sprzężenie zwrotne, czyli przekazywanie sygnałów również w kierunku od wyjść do wejść.

Sieci neuronowe dzielą się nie tylko ze względu na kierunek przepływu sygnałów, lecz także ze względu na swoją budowę. Mogą mieć jedną lub wiele warstw, przy czym warstwy neuronów znajdujące się między warstwą wejściową a wyjściową nazywa się ukrytymi. Warto zauważyć, że liczba wyjść sieci jest równa liczbie neuronów ostatniej warstwy. Najistotniejszą cechą sieci neuronowych jest przetwarzanie sygnałów jednocześnie przez wszystkie neurony danej warstwy. Zaletą sieci jest też zdolność uczenia się i generalizacji.

Najczęściej stosowaną siecią, ze względu na jej stosunkowo prostą budowę, jest sieć jednokierunkowa, wielowarstwowa z neuronami typu sigmoidalnego²⁰. Przykładowa struktura sieci dwuwarstwowej wraz z opisem wejść, wyjść oraz wag została przedstawiona na rys. 19.

¹⁹ S. Osowski, *Sieci neuronowe...*, s. 17–39.

²⁰ Tamże, s. 40.



Rys. 19. Przykładowy model sieci jednokierunkowej, dwuwarstwowej.

Źródło: Opracowanie własne.

Celem procesu uczenia sieci neuronowej jest taki dobór wag, który umożliwi dopasowanie działania sieci do specyfiki rozwiązywanego problemu. Uczenie sieci odbywa się w cyklach, podczas których następuje adaptacja wag. Zakładając, że sieć posiada N wejść, I neuronów w warstwie ukrytej i J neuronów w warstwie wyjściowej (czyli wyjść sieci), korekcja wag między wejściami x_n sieci przedstawionej na rys. 19 a pierwszą warstwą neuronów ma postać:

$$w_{in}(k+1) = w_{in}(k) + \Delta w_{in}(k)$$

gdzie: k – numer cyklu uczącego, $n = 1, \dots, N$, $i = 1, \dots, I$ $w_{in}(k+1)$ – waga łącząca i -ty neuron z n -tym wejściem sieci w bieżącym kroku uczenia, $w_{in}(k)$ – waga łącząca i -ty neuron z n -tym wejściem sieci w poprzednim kroku uczenia, $\Delta w_{in}(k)$ – przyrost wag łączących i -ty neuron z n -tym wejściem.

W przypadku warstwy drugiej korekcja wag przyjmuje postać:

$$w_{ji}(k+1) = w_{ji}(k) + \Delta w_{ji}(k)$$

gdzie: k – numer cyklu uczącego, $w_{ji}(k+1)$ – waga łącząca j -ty neuron z i -tym neuronem w bieżącym kroku uczenia, $w_{ji}(k)$ – waga łącząca j -ty neuron z i -tym neuronem w poprzednim kroku uczenia, $\Delta w_{ji}(k)$ – przyrost wag łączących j -ty neuron z i -tym neuronem.

Spośród sposobów uczenia sieci neuronowych można wyróżnić: uczenie pod nadzorem, z krytykiem oraz samoorganizujące się²¹. Najczęściej stosowane jest uczenie sieci pod nadzorem (z nauczycielem). Wówczas wartościom uczącym

²¹ S. Osowski, *Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym*, Warszawa 1996, s. 20–21.

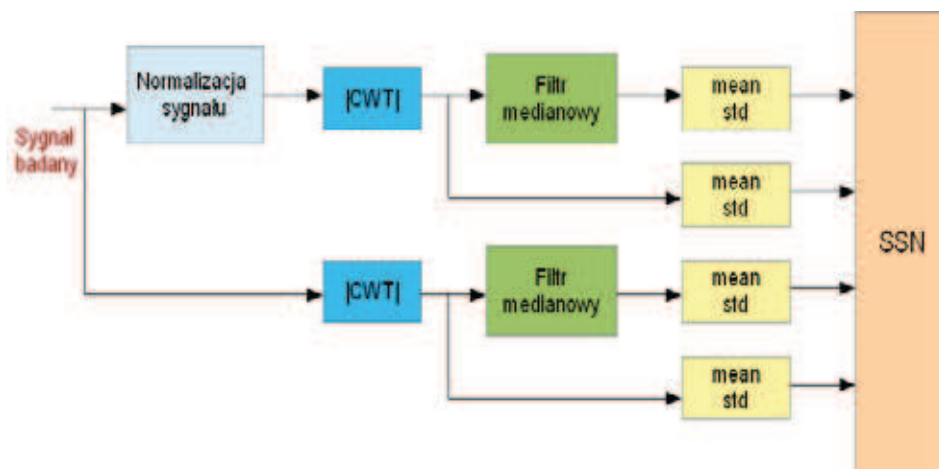
sygnałów wejściowych towarzyszą żądane wartości wyjściowe sieci d_j ($j=1, \dots, J$, gdzie J – ilość neuronów warstwy wyjściowej). Na podstawie porównania oczekiwanych wartości wyjściowych d_j z wartościami wypracowanymi przez sieć y_j następuje korekcja wag. Korekcja wag prowadzi do minimalizacji różnicy między wartościami zadanymi d_j a aktualnymi wartościami na wyjściu sieci y_j .

Algorytm rozpoznawania modulacji z wykorzystaniem CWT i SSN

Przykładowy schemat przebiegu procesu rozpoznawania sygnałów z wykorzystaniem CWT oraz sztucznej sieci neuronowej przedstawiono na rys. 20. Na pierwszym etapie są wyodrębniane cechy sygnału w postaci wartości średniej (ang. *mean value*) oraz odchylenia standardowego (ang. *standard deviation*) ciągłej transformacji falkowej dla czterech torów przetwarzania sygnału:

- 1) |CWT| sygnału unormowanego po przejściu przez filtr medianowy²²,
- 2) |CWT| sygnału unormowanego bez przejścia przez filtr medianowy,
- 3) |CWT| sygnału nieunormowanego po przejściu przez filtr medianowy,
- 4) |CWT| sygnału nieunormowanego bez przejścia przez filtr medianowy.

Na końcu każdej z czterech ścieżek są obliczane: wartość średnia i odchylenie standardowe, które stanowią cechy wejściowe sieci. W celu redukcji liczby wejść sieci oraz wyboru cech najistotniejszych stosuje się metody ich selekcji, np. PCA (ang. *Principal Component Analysis*), LDA (ang. *Linear Discriminate Analysis*) itp. Tak wyodrębnione cechy są podawane na wejście sztucznej sieci neuronowej.



Rys. 20. Schemat ideowy algorytmu rozpoznawania typu modulacji.

Źródło: Opracowanie własne.

²² Filtr medianowy – filtr nieliniowy. Jego działanie polega na wyborze wartości środkowej uporządkowanego rosnąco ciągu wartości (wyznaczenie tzw. mediany). Jest często stosowany w przetwarzaniu obrazów w celu usunięcia szumów typu *salt and paper* (zakłócenie typu *salt and paper* to pojedyncze punkty o wartościach daleko odbiegających od ich otoczenia). W tym przypadku ma na celu wygładzenie CWT sygnału zmodulowanego z pików odpowiadających zmianom fazy.

Badania symulacyjne wykonane w środowisku MatLab pozwalały na wygenerowanie wybranej liczby sygnałów zmodulowanych i obliczenie ich cech według schematu przedstawionego na rys. 20. Następnie cechy (wartości średnie i odchylenia standardowe) były podawane na wejścia jednokierunkowej, dwuwarstwowej sieci o neuronach sigmoidalnych w celu przeprowadzenia procesu uczenia.

Po wytrenowaniu sieci testowano poprawność klasyfikacji, porównując wartości otrzymywane na wyjściu sieci z wartościami oczekiwanymi dla określonych typów modulacji. Poprawność klasyfikacji sygnałów z modulacją typu ASK, FSK, PSK, QAM, jaką uzyskano podczas badań, przedstawiono w zestawieniu 2. Obliczenia wykonano dla wybranych wielkości współczynnika sygnału do szumu²³ (S/N).

Zestawienie 2. Poprawność klasyfikacji sygnałów z modulacją typu ASK, FSK, PSK, QAM.

Współczynnik sygnału do szumu (S/N) (w dB)	Poprawność klasyfikacji (w %)
10	99,70
6	96,15
3	89,00

Źródło: Opracowanie własne.

Przeprowadzone badania świadczą o możliwości zastosowania zarówno CWT w celu wyodrębniania cech sygnałów zmodulowanych, jak i sieci neuronowych, jako klasyfikatora typów modulacji na podstawie cech podanych na jej wejścia. Dodatkowe potwierdzenie skuteczności tego typu algorytmu dają publikacje związane z opisywaną tematyką²⁴, w których poprawność klasyfikacji dla sygnałów o S/N=4dB sięgała ponad 99 proc. Aby zwiększyć skuteczność systemu można dokonać optymalizacji struktury sieci, zmiany typu wykorzystywanych neuronów, zmodyfikować sposób jej uczenia lub zmienić liczbę cech wyodrębnianych z wykorzystaniem CWT. Należy jednak pamiętać, że im większa ilość cech wejściowych sieci, tym dłużej będzie trwał czas potrzeby na jej wytrenowanie. Wyniki otrzymane podczas badań symulacyjnych mogą być również podstawą do dalszej analizy, mającej na celu wykorzystanie tego typu algorytmów na potrzeby radiokontrwywiadu czy rozpoznania radioelektronicznego.

Abstrakt

W artykule przedstawiono wybrane typy modulacji sygnałów, tj. PSK, FSK, QAM, ASK. Omówiono cechy charakterystyczne ciągłej transformacji falkowej (CWT) obliczonej dla wybranych typów modulacji, pozwalające na rozróżnienie poszczególnych

²³ Współczynnik S/N mówi o wielkości zakłóceń szumowych, jakie zostały dodane do sygnału niosącego informację. Podawany jest w dB (logarytmiczna jednostka miary). S/N=0 oznacza, że moc sygnału informacyjnego jest równa mocy sygnału szumu. Im wyższy S/N, tym większa jest moc sygnału, a mniejsza zakłóceń szumowych.

²⁴ He Bing i in., *Modulation Recognition of Communication Signal Based on Wavelet RBF Neural Network*, 2010, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), s. V2-490-V2-492; K. Hassan i in., *Automatic Modulation Recognition Using Wavelet...*, s. 1-13,

typów modulacji sygnału stanowiących podstawę przedstawionego w pracy algorytmu rozpoznawania typów modulacji sygnałów z wykorzystaniem ciągłej transformacji falkowej (CWT) i sztucznej sieci neuronowej (SSN).

Zaprezentowano podstawowe informacje dotyczące możliwości zastosowania sztucznych sieci neuronowych oraz omówiono teoretyczne podstawy ich działania, począwszy od uproszczonej budowy neuronu. Przytoczono również wzory pozwalające na obliczenie wartości wyjściowych sztucznego neuronu po podaniu na jego wejścia określonych wartości. W analizowanym algorytmie na wejścia sieci są podawane wartości średnie i odchylenia standardowe modułu ciągłej transformacji falkowej, obliczone dla poszczególnych sygnałów zmodulowanych. Zadaniem sieci neuronowej jest sklasyfikowanie typu modulacji sygnału na podstawie wyżej wymienionych cech podawanych na jej wejście. Na zakończenie przedstawiono poprawność klasyfikacji typów modulacji, jaką otrzymano podczas badań symulacyjnych wykonanych w środowisku MatLab.

Słowa kluczowe: sieci neuronowe, ciągła transformacja falkowa, rozpoznawanie modulacji, rozpoznanie radioelektroniczne, radiowywiad.

Abstrakt

In the paper we remind the most popular modulations types and investigate the possibility of using wavelet transform (CWT) and artificial neural network (ANN) for modulation type recognition system. Four types of signal modulation are considered: PSK, FSK, QAM, ASK. The modulation identification algorithm is presented and its performance is analyzed. The mean value and standard deviation of |CWT| for each modulation type are used as a signal features. Thereafter extracted features are sent to the two-layer neural network entry for classification purposes.

The article presents short introduction for neural networks and describes their application area. Also the basic theory and equations are given including description of the biological neural system. For classification of the modulation type and order a neural network trained using the back-propagation learning algorithm is considered. In conclusion there are simulation results presented and performance obtained for classification process. All calculations are performed in MatLab environment.

Key words: neural networks, Continuous Wavelet Transform (CWT), modulation recognition, radio surveillance, radio intelligence.