

Detekcja emisji FH na podstawie analizy czasowo-częstotliwościowej widma

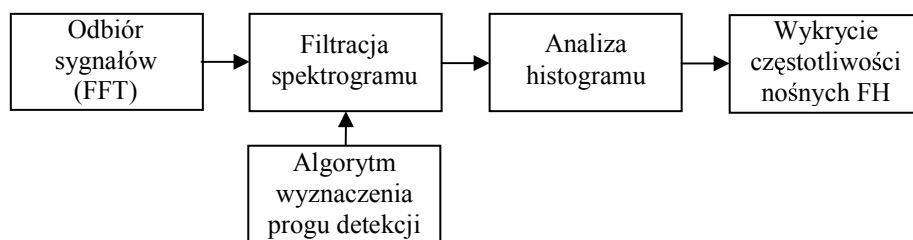
W artykule omówiono metodę detekcji sygnałów FH na podstawie analizy czasowo-częstotliwościowej widma. Na wstępie opisano algorytmy obliczania wartości progu według którego przeprowadzana jest filtracja odebranych sygnałów oraz przedstawiono własny algorytm. W kolejnym punkcie zaprezentowano rezultaty otrzymane dla rzeczywistego widma częstotliwościowego w wyniku zastosowania omówionych algorytmów. Przedstawiono również wyniki detekcji różnych sekwencji skoków FH na podstawie wyznaczonych histogramów. W ostatnim punkcie podsumowano otrzymane wyniki.

1. Wprowadzenie

Emisje FH (ang. *Frequency Hopping*) znajdują obecnie szerokie zastosowanie w bezprzewodowych systemach łączności eksploatowanych przez armie państw na całym świecie. W trakcie transmisji sygnału z wykorzystaniem FH częstotliwość sygnału nośnego zmienia się skokowo według określonego pseudolosowego schematu, co powoduje rozproszenie widma sygnału w szerokim paśmie częstotliwości [1,2]. Dzięki temu detekcja oraz przechwycenie informacji przesyłanej za pomocą tych sygnałów jest utrudnione [1,2]. Dodatkowym problemem podczas detekcji sygnałów FH jest występowanie w badanym widmie sygnału szumów oraz sygnałów zakłócających.

Powszechnie stosowaną metodą wykrywania emisji FH jest analiza czasowo-częstotliwościowa (spektrogramowa) odbieranych sygnałów oraz ich parametrów w zadanym paśmie częstotliwościowym [3,6,7]. Analiza taka składa się z dwóch etapów obejmujących wyznaczenie progu detekcji i na jego podstawie przeprowadzenie filtracji w celu separacji emisji FH od szumów i zakłóceń [5]. Proóg może być wyznaczany globalnie dla całego spektrogramu lub lokalnie dla jego fragmentu. Korzystniejszym sposobem filtracji jest obliczenie progu detekcji na podstawie poziomów odbieranych sygnałów w zadanym fragmencie spektrogramu [4], dzięki czemu zmienia się on dynamicznie i dopasowuje do poszczególnych punktów analizowanego spektrogramu. Podczas tak przeprowadzanej filtracji wykrywane są również sygnały, które nie należą do emisji FH, a ich poziom i częstotliwość występowania mogłyby wskazywać, że są one jej częścią. Dodatkowa analiza statystyczna pozwala jednak wyeliminować tego typu sygnały i wyodrębnić tylko te, które są sygnałami FH.

W niniejszym artykule zaproponowano własną metodę wykrywania sygnałów FH bazującą na analizie czasowo-częstotliwościowej widma i analizie histogramowej. Omówiono i przebadano trzy różne algorytmy wyznaczania progu detekcji, a uzyskane wyniki porównano ze sobą.

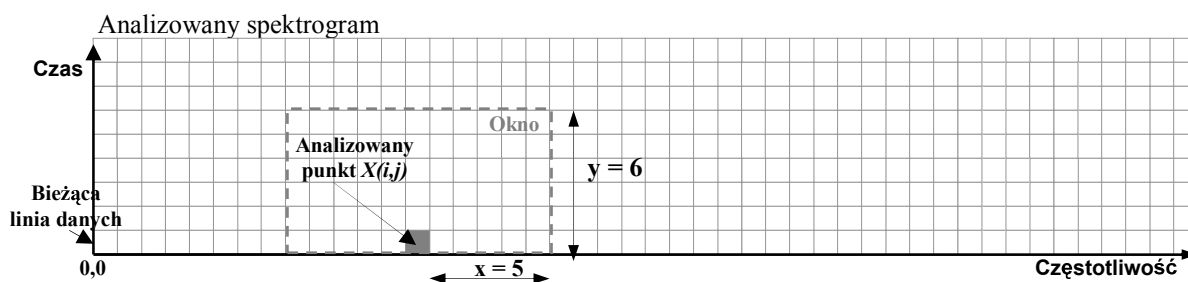


Rys. 1. Schemat blokowy opracowanej metody detekcji sygnałów FH

Schemat działania metody został przedstawiony na rysunku 1. Po odebraniu sygnałów z zadanego widma częstotliwościowego przeprowadzana jest filtracja na podstawie progu detekcji obliczanego według jednego z badanych algorytmów (pkt 3). Ponieważ dokonanie samej filtracji umożliwia jedynie wyodrębnienie sygnałów składowych emisji FH, w kolejnym etapie przeprowadzana jest analiza histogramowa, na podstawie której wyznaczane są nominały częstotliwości nośnych FH.

2. Metoda wyznaczenia progu detekcji

Próg detekcji obliczany jest kolejno dla każdego punktu spektrogramu, na podstawie poziomów odebranych sygnałów znajdujących się wokół tego punktu, umieszczonych wewnątrz przyjętego okna analizy (rys. 2). W oknie tym zawarte są dane o poziomach sygnałów zarejestrowanych w dziedzinie częstotliwości i czasu. Na rysunku 2 przedstawiono schematycznie przykładowe okno analizy oraz punkt, dla którego obliczany jest próg detekcji.



Rys. 2. Przykładowe okno obserwacji o wymiarach 11×6.

Wartość progu detekcji jest zależna nie tylko od poziomów sygnałów, ale również od dobranych wymiarów okna. Niewłaściwy dobór rozmiarów okna może spowodować nadmierny wzrost lub spadek wartości progu, przez co filtracja sygnałów FH będzie nieprawidłowa bądź niemożliwa. Dodatkowo zbyt duże rozmiary okna analizy powodują wzrost złożoności obliczeniowej, a tym samym czasu detekcji emisji FH.

Filtracja danych przeprowadzana jest na podstawie obliczonego progu detekcji $T(i,j)$ dla danego punktu $X(i,j)$ spektrogramu. W przypadku, gdy poziom sygnału przekracza wyznaczony próg podejmowana jest decyzja o jego rejestracji – 1, natomiast w przeciwnym razie o jego pominięciu – 0.

$$Y(i,j) = \begin{cases} 0, & \text{gd}y X(i,j) \leq T(i,j) \\ 1, & \text{gd}y X(i,j) > T(i,j) \end{cases} \quad (1)$$

gdzie $X(i,j)$ – poziom sygnału dla analizowanego punktu

$T(i,j)$ – wyznaczony próg detekcji

i,j – współrzędne analizowanego punktu

Obliczenie progu detekcji może być wykonane przy zastosowaniu różnych algorytmów, które bazują na wyznaczeniu różnych miar statystycznych takich jak: wartość maksymalna, wartość minimalna, wartość średnia oraz odchylenie standardowe.

Algorytm Bernsena

Jednym z algorytmów wyznaczania wartości progu detekcji jest algorytm Bernsena [3] bazujący na wartości maksymalnej i minimalnej sygnału. Wartości te obliczane są na podstawie odebranych poziomów sygnałów znajdujących się wewnątrz określonego okna. Wyznaczenie wartości progu według tej metody odbywa się na podstawie poniższej zależności:

$$T(i,j) = \frac{1}{2} \cdot \left(\max_{\substack{-x < n < x \\ 0 < l < y}} \{X(i+n, j+l)\} + \min_{\substack{-x < n < x \\ 0 < l < y}} \{X(i+n, j+l)\} \right) \quad (2)$$

gdzie $X(i,j)$ – poziom sygnału w danym punkcie spektrogramu

$T(i,j)$ – wyznaczony próg detekcji
 i,j – współrzędne analizowanego punktu
 x,y – wymiary przyjętego okna

Algorytm Niblacka

Kolejnym algorytmem wyznaczania wartości progu detekcji jest algorytm Niblacka [8] bazujący na wartości średniej oraz odchyleniu standardowym. Wielkości te podobnie jak w poprzednim algorytmie wyznaczane są na podstawie wartości sygnałów znajdujących się wewnątrz przyjętego okna. W przypadku tego algorytmu została wprowadzona dodatkowo zmienna k_1 , którą należy dobrać w sposób doświadczalny. Głównie od jej wartości zależy wynik przeprowadzonej filtracji. Obliczenie wartości progu detekcji odbywa się na podstawie poniższej zależności:

$$T(i, j) = \mu(i, j) + k_1 \cdot \sigma(i, j) \quad \text{gdzie } k_1 \in (0, +\infty) \quad (3)$$

$$\mu(i, j) = \frac{1}{y(2x+1)} \sum_{n=-x}^{n=x} \sum_{l=0}^{l=y} X(i+n, j+l) \quad (4)$$

$$\sigma(i, j) = \left[\frac{1}{y(2x+1)} \sum_{n=-x}^{n=x} \sum_{l=0}^{l=y} (X(i+n, j+l) - \mu(i, j))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

gdzie $X(i,j)$ – poziom sygnału w danym punkcie spektrogramu
 $T(i,j)$ – wyznaczony próg detekcji
 $\mu(i,j)$ – wartość średnia obliczona na podstawie danych z przyjętego okna
 $\sigma(i,j)$ – odchylenie standardowe obliczone na podstawie danych z przyjętego okna
 k_1 – zmienna dobrana w sposób doświadczalny

Zmodyfikowany algorytm Niblacka

Jest to autorski algorytm obliczania progu detekcji, opracowany w oparciu o algorytm Niblacka. W tej metodzie podobnie jak w przypadku klasycznego algorytmu Niblacka zostały wykorzystane podstawowe miary statystyczne – wartość średnia i odchylenie standardowe. Dodatkowo w algorytmie tym została zastosowana dodatkowa zmienna k_2 normująca wartość otrzymanego progu w zależności od wartości maksymalnej amplitudy, wartości średniej i odchylenia standardowego wyznaczonych dla przyjętego okna. Obliczenie wartości progu detekcji odbywa się na podstawie poniższej zależności:

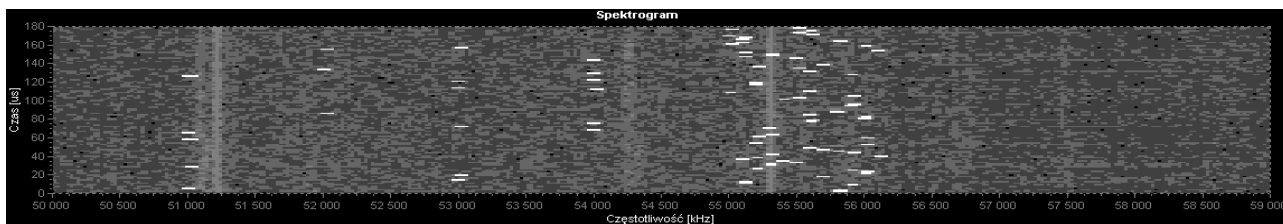
$$T(i, j) = k_2 \cdot [\mu(i, j) + k_1 \cdot \sigma(i, j)] \quad (6)$$

gdzie $T(i,j)$ – wyznaczony próg detekcji
 k_1 – zmienna dobrana w sposób doświadczalny
 k_2 – zmienna zależna od miar statystycznych

3. Wyniki filtracji sygnałów otrzymane na podstawie omówionych algorytmów wyznaczania progu

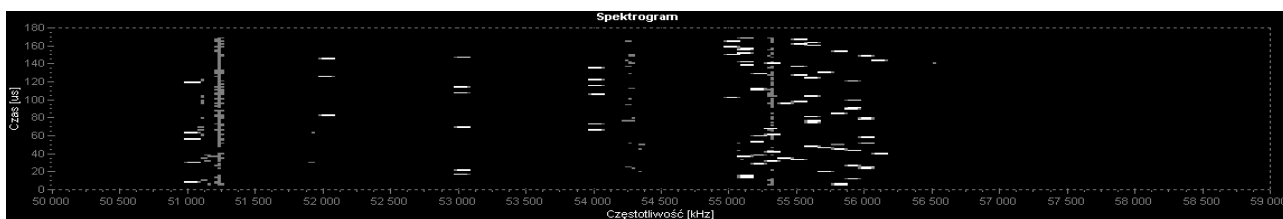
Do badań nad zaproponowaną metodą detekcji wykrywania sygnałów FH wykorzystano odbiornik firmy Rohde&Schwarz EM550 oraz własną aplikację do sterowania odbiornikiem i umożliwiającą zapis odebranych danych. W czasie pomiarów odbiornik pracował w trybie Panorama Scan, w którym wykonywane były obliczenia FFT z rozdzielczością 25kHz, w paśmie 10MHz i szybkością 10GHz/s. Dzięki temu możliwa była rejestracja wszystkich emisji FH, których źródłem była radiostacja UKF RRC 9210AP. Praca radiostacji odbywała się w paśmie 25kHz, w zakresie częstotliwości 50MHz-59MHz z szybkością skoków 300hop/s, z zaprogramowanymi 16 nominalami częstotliwościowymi. Czas rejestracji danych wynosił 10s.

Na rysunku 3 przedstawiono fragment spektrogramu utworzonego na podstawie sygnałów odbieranych w zadanym zakresie częstotliwości. Oprócz wyróżniających się emisji FH widoczny jest szum oraz składowe stałe, które należy odfiltrować w czasie automatycznego wykrywania.

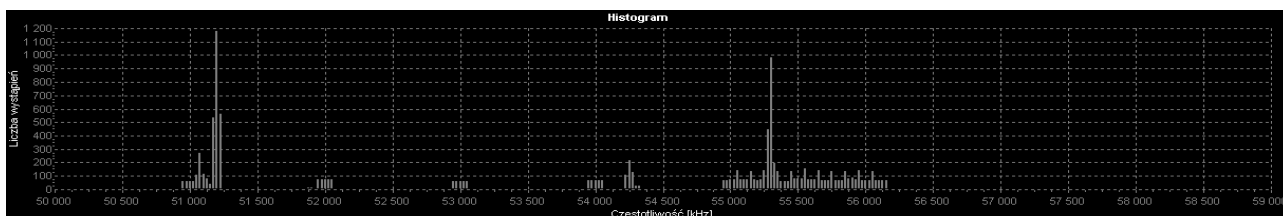


Rys. 3. Oryginalny fragment spektrogramu bez filtracji

Na rysunkach 4, 6 i 8 przedstawiono wyniki filtracji z zastosowaniem omówionych powyżej algorytmów obliczania progu dla okna detekcji o wymiarach 21×10 . Na ich podstawie można zauważyć, że najmniej efektywną filtrację zapewnia algorytm Bernsena, ponieważ oprócz nominalów częstotliwościowych, na których przeprowadzana była emisja FH na spektrogramie widoczny jest szum oraz sygnały stałe. Dla uzyskanego spektrogramu wyznaczono histogram (rys. 5) przedstawiający liczbę wystąpień sygnału na określonej częstotliwości. Dokładne wyznaczenie nominalów emisji FH jest utrudnione zwłaszcza w zakresie częstotliwości, gdzie nominały występują obok siebie.

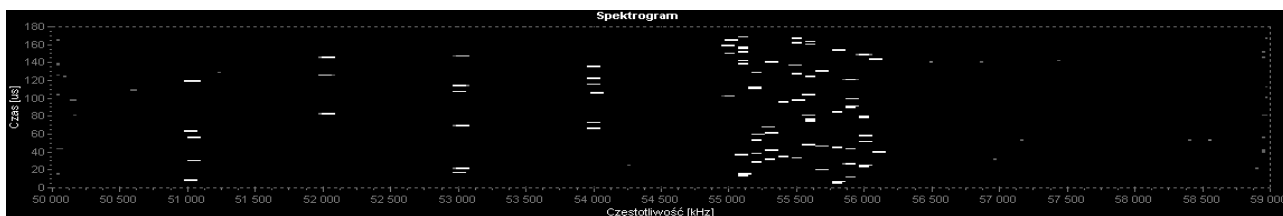


Rys. 4. Fragment spektrogramu po filtracji z zastosowaniem algorytmu Bernsena, okno 21×10

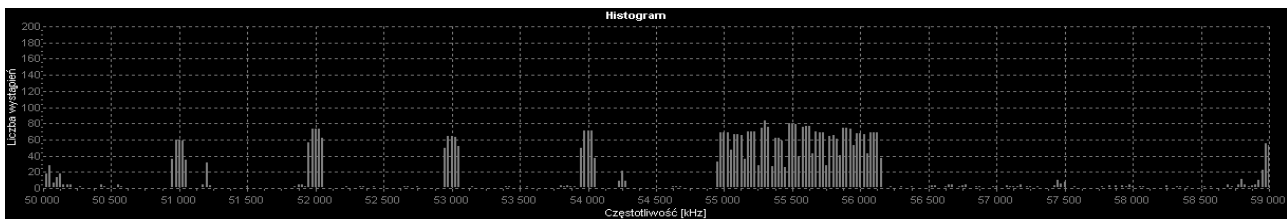


Rys. 5. Histogram danych ze spektrogramu po filtracji z zastosowaniem algorytmu Bernsena

Próg detekcji obliczony metodą Niblacka w porównaniu do algorytmu Bernsena, spowodował wyeliminowanie szumu i sygnałów stałych, co zostało zobrazowane na rysunku 6. Na podstawie uzyskanego histogramu przedstawionego na rysunku 7 można stwierdzić, że algorytm ten umożliwia wyznaczenie pasm, w których znajdują się nominały emisji FH, jednak są one różnej długości i w niektórych przypadkach zachodzą na siebie.

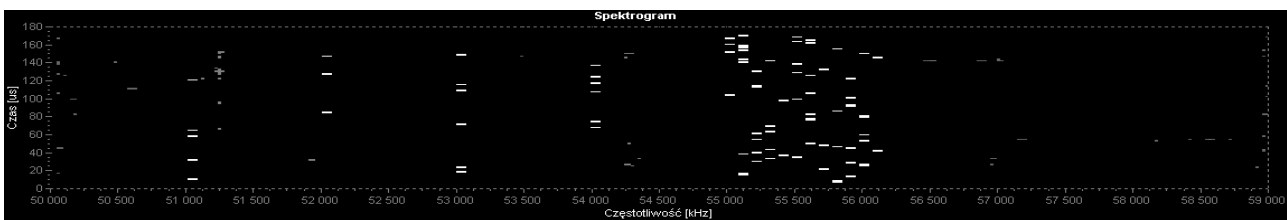


Rys. 6. Fragment spektrogramu po filtracji z zastosowaniem algorytmu Niblacka, okno 21×10

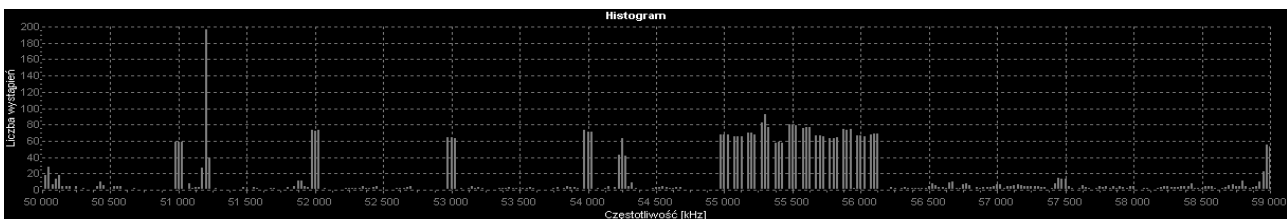


Rys. 7. Histogram danych ze spektrogramu po filtracji z zastosowaniem algorytmu Niblacka

Filtracja przeprowadzona za pomocą opracowanego zmodyfikowanego algorytmu Niblacka, pozwoliła również wyeliminować szum i sygnały stałe, a także zawęzić pasma częstotliwości, gdzie znajdują się nominały częstotliwości FH. Ułatwiło to ich określenie podczas dalszej analizy przeprowadzanej na histogramie (rys. 9) uzyskanym na podstawie danych z przetworzonego spektrogramu.



Rys. 8. Fragment spektrogramu po filtracji z zastosowaniem zmodyfikowanego algorytmu Niblacka, okno 21×10



Rys. 9. Histogram danych ze spektrogramu po filtracji z zastosowaniem zmodyfikowanego algorytmu Niblacka

W tabeli 1 zestawiono wyniki detekcji badanej emisji FH według zaproponowanej metody przy wykorzystaniu omówionych algorytmów. Na ich podstawie można zauważyć, że najszybszym algorytmem wykrywania sygnałów FH okazał się zmodyfikowany algorytm Niblacka. Już po 2s obserwacji pozwolił na wykrycie wszystkich emisji FH nie pozostawiając przy tym żadnych błędnie wyznaczonych nominałów jak to miało miejsce dla dwóch pozostałych algorytmów.

Tabela 1 Wyniki detekcji emisji FH za pomocą omówionych algorytmów dla czasu obserwacji 10s

Algorytm	Prawidłowo wykryte nominały FH w stosunku do ilości zaprogramowanych nominałów	Czas wykrycia wszystkich nominałów emisji FH [s]	Błędnie wykryte nominały FH w stosunku do ilości wszystkich wykrytych nominałów
<i>Bernsen</i>	93,5%	Nie wykryto wszystkich	62,5% (po 10s obserwacji)
<i>Niblack</i>	100%	2s	15% (po 10s obserwacji)
<i>Niblack(zmod)</i>	100%	2s	0% (po 2s obserwacji)

4. Wyniki detekcji nominałów częstotliwości FH dla różnych sekwencji skoków

W celu określenia nominałów częstotliwościowych FH przeprowadzono dodatkową analizę histogramu otrzymanego na podstawie filtracji spektrogramu. Do dalszych badań wykorzystano zmodyfikowany algorytm Niblacka. Otrzymany na jego podstawie histogram poddano analizie biorąc pod uwagę takie parametry jak ilość wystąpień sygnału na danej częstotliwości oraz zajmowane pasmo. W wyniku przeprowadzonej analizy wyeliminowane zostały niepożądane sygnały oraz wyodrębniono poszukiwane sygnały składowe emisji FH.

W celu sprawdzenia skuteczności metody detekcji emisji FH analizie poddano 6 sekwencji skoków w zakresie częstotliwości 50-59MHz, różniących się ilością zaprogramowanych nominałów

oraz krokiem pomiędzy nimi. W pierwszych dwóch sekwencjach występowało 11 nominalów z krokiem 100kHz (52-53MHz), oraz 200 kHz (52-54MHz). Sekwencje trzecia i czwarta składały się z 26 nominalów z krokiem odpowiednio 100kHz (52-54,5MHz) i 200 kHz (52-57MHz). Natomiast ostatnie dwie sekwencje charakteryzowały się występowaniem 41 nominalów z ustalonym wcześniej krokiem - 100kHz (52-56MHz) i 200kHz (50,5-58,5MHz). Za wystarczający próg detekcji emisji przyjęto wykrycie powyżej 95% nominalów.

W tabeli 2 zestawiono wyniki detekcji nominalów częstotliwości uśrednione dla 10 realizacji każdej z omówionych powyżej sekwencji skoków. Na jej podstawie można zauważyć, że ilość poprawnie wykrytych częstotliwości nośnych zależy od czasu obserwacji oraz ilości nominalów. W przypadku pierwszych dwóch sekwencji, w czasie których emisja była przeprowadzana na 11 częstotliwościach nośnych ponad 95% skoków zostało wykrytych po 1s czasu analizy. Dla trzeciej i czwartej sekwencji, gdzie ilość nominalów była ponad dwukrotnie większa czas wykrycia wzrósł do wartości 2s. Najwolniej zostały wykryte nominały dla sekwencji 5 i 6 składającej się z 41 nominalów FH.

Tabela 2 Zestawienie wyników detekcji nominalów FH dla różnych sekwencji skoków

	Sekwencja	Krok	Liczba nominalów	Czas obserwacji [s]									
				0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Wykryte nominały FH [%]	1	100kHz	11	86	99	100	100	100	100	100	100	100	100
	2	200kHz	11	90	99	100	100	100	100	100	100	100	100
	3	100kHz	26	69	83	90	98	100	100	100	100	100	100
	4	200kHz	26	77	87	94	98	100	100	100	100	100	100
	5	100kHz	41	65	74	78	88	91	91	95	96	98	100
	6	200kHz	41	70	74	78	90	92	92	98	98	99	100

5. Wnioski

W artykule omówiono metodę detekcji sygnałów FH na podstawie analizy czasowo-częstotliwościowej widma. Działanie metody oparte zostało na zmodyfikowanym algorytmie Niblacka przeznaczonym do obliczania progu detekcji i bazującym na właściwościach statystycznych odbieranych sygnałów. Filtracja spektrogramu przeprowadzana na podstawie wyznaczonego progu detekcji pozwoliła wyodrębnić poszukiwaną emisję FH poprzez eliminację szumu i sygnałów stałych. Natomiast analiza histogramu umożliwiła dokładne wyznaczenie nominalów emisji FH. Na podstawie uzyskanych wyników z punktu 4 można stwierdzić, że zaproponowana metoda pozwala wykryć nominały emisji FH, przy czym szybkość i poprawność ich wyznaczenia zależy głównie od ich liczby.

Literatura

1. R. A. Poisel, *Introduction to Communication Electronic Warfare System*, Artech House, Nortwood 2008.
2. R. A. Poisel, *Modern Communication Jamming Principles and Techniques*, Artech House, Nortwood 2004.
3. L. Haiyan, J. Hua, *Blind Detection of Frequency Hopping Signal Using Time-Frequency Analysis*, Wireless Communications Networking and Mobile, pp. 1-4, Chengdu 2010.
4. S. Luo, L. Luo, *Adaptive Detection of an Unknown FH Signal Based on Image Features*, Wireless Communications Networking and Mobile Computing, pp. 762-765, Chengdu 2009.
5. A. Abdul-Hamed Khader, *Enhanced Performance of FH Detection System Using Adaptive Threshold Level*, Al-Rafidain Engineering Journal, Vol. 18 No. 5, pp. 107-122, Mosul 2010.
6. W. J. L. Read, *Detection of Frequency Hopping Signals in Digital Wideband Data*, Defence R&D Canada, Ottawa 2002.
7. J. Yuan, P. Tian, *The Identification of Frequency Hopping Signal Using Compressing Sensing*, Communication and Network, Vol. 1 No. 1, pp. 52-56, Zhengzhou 2009.
8. Y. Wang, X. Wei, S. Xiao, *LBP texture analysis Based on the Local Adaptive Niblack Algorithm*, Congress on Image and Signal Processing, pp. 777-780, Sanya 2008.