

# Automatyczna detekcja emisji FH na podstawie analizy czasowo-częstotliwościowej widma

W artykule omówiono metodę automatycznej detekcji sygnałów FH na podstawie analizy czasowo-częstotliwościowej widma. Na wstępie przedstawiono schemat blokowy działania metody oraz opisano działanie poszczególnych bloków analizy. Scharakteryzowano metody obliczania progów detekcji, klasyfikacji sygnałów oraz sygnalizacji wykrycia emisji. W kolejnym punkcie zaprezentowano stanowisko do analizy działania metody oraz przedstawiono wyniki detekcji różnych sekwencji skoków FH. W ostatnim punkcie podsumowano otrzymane wyniki.

## 1. Wprowadzenie

Emisje FH (ang. *Frequency Hopping*) znajdują obecnie szerokie zastosowanie w wielu bezprzewodowych systemach łączności i są szeroko wykorzystywane w praktyce, zarówno w rozwiązaniach cywilnych (np.: GSM, *Bluetooth*) i wojskowych. Technika FH pozwala zwiększyć wydajność oraz pojemność sieci bezprzewodowych, zapewnia także zwiększenie odporności na zakłócenia. Ma to szczególne znaczenie w zastosowaniach militarnych, gdzie konieczne jest uniknięcie wykrycia własnych środków łączności i zapewnienie odporności na zakłócenia celowe generowane przez przeciwnika. Zalety wykorzystania emisji FH wynikają bezpośrednio ze sposobu przestrajania nośnej sygnału, która zmienia się skokowo według określonego pseudolosowego schematu, co powoduje rozproszenie widma sygnału w szerokim paśmie częstotliwości. Dzięki temu detekcja oraz przechwycenie informacji przesyłanej za pomocą tego typu sygnałów jest utrudniona [1,2].

Prace nad systemami detekcji wojskowych emisji FH trwają już praktycznie od czasu ich wynalezienia. Mimo tak długiego okresu badań, detekcja oraz analiza wojskowych emisji FH jest wciąż obiektem zainteresowań wielu firm i instytucji zajmujących się problemami łączności wojskowej. Obecny rozwój technologii pozwala nie tylko na wykrycie obecności takiej emisji, ale również na jej śledzenie i zakłócanie w czasie rzeczywistym.

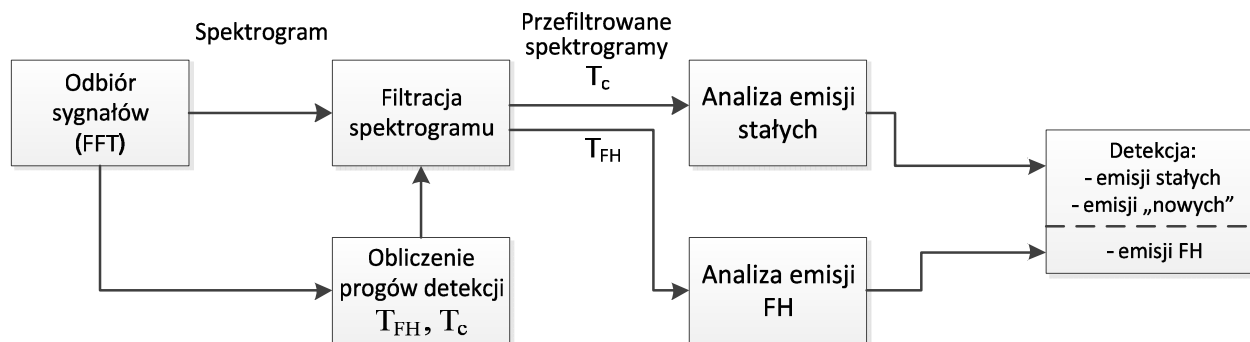
Powszechnie jest stosowanych wiele metod umożliwiających detekcję emisji rozproszonych FH. Możemy do nich zaliczyć analizę czasowo-częstotliwościową [2,7], analizę poziomu SNR [5], analizę periodogramu [6], czy nawet analizę obrazu [3,4].

W niniejszym artykule zaproponowano własną metodę wykrywania sygnałów FH bazującą na statystycznej analizie czasowo-częstotliwościowej widma, która umożliwia dokładne określenie parametrów emisji FH takich jak: liczba nominalów oraz ich częstotliwości i amplitudy. Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów możliwa jest identyfikacja odbieranych sygnałów oraz podjęcie decyzji o ewentualnym zakłócaniu. Metoda stanowi rozwinięcie algorytmu przedstawionego w artykule [7].

## 2. Opis metody detekcji

Algorytm działania metody został przedstawiony schematycznie na rysunku 1. Na wstępie, po odebraniu sygnałów z zadanego pasma częstotliwości, ustalany jest próg detekcji, na podstawie którego przeprowadzana jest filtracja danych. W jej wyniku otrzymujemy dwa spektrogramy (przefiltrowany progiem dla sygnałów stałych  $T_c$  i dla emisji FH  $T_{FH}$ ), które są poddawane analizie czasowo-częstotliwościowej. W przypadku pierwszego spektrogramu, analiza polega na obliczeniu współczynników zajętości, obrazujących stan monitorowanego kanału transmisji. W wyniku tego,

uzyskiwana jest informacja o sygnałach stałych lub pojawieniu się nowych emisji. Analiza drugiego spektrogramu polega na wyznaczeniu histogramu i funkcji prawdopodobieństwa (FP) występowania sygnałów przekraczających ustalony próg detekcji. Na podstawie prowadzonej analizy określany jest parametr, którego wartość sygnalizuje się pojawienie emisji FH, a następnie nominały emisji FH.



Rys. 1. Schemat blokowy opracowanej metody detekcji sygnałów FH

## 2.1 Filtracja spektrogramu

Filtracja przeprowadzana jest na podstawie progu detekcji w celu wyselekcjonowania, spośród wartości tła szumów, emisji do późniejszej analizy.

Każdemu punktowi spektrogramu przypisana jest nowa wartość  $Y(f,t)$  wyznaczona zgodnie z poniższą zależnością:

$$Y(f,t) = \begin{cases} 0, & \text{gdy } X(f,t) \leq T(f,t) \\ X(f,t), & \text{gdy } X(f,t) > T(f,t) \end{cases} \quad (1)$$

gdzie  $X(f,t)$  – poziom sygnału dla analizowanego punktu wejściowego spektrogramu  
 $T(f,t)$  – wyznaczony próg detekcji  
 $f$  – częstotliwość kanału  
 $t$  – czas akwizycji sygnału.

Próg detekcji obliczany jest na podstawie wyników operacji w trzech krokach:

1. Uśredniania w dziedzinie czasu wartości próbek sygnałów dla poszczególnych częstotliwości, czego wynikiem jest wektor wartości średnich:

$$\mu_f(f) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{t=N} X(f,t) \quad (2)$$

gdzie  $\mu_f(f)$  – wektor wartości średnich  
 $N$  – ilość uśrednianych danych dla danego kanału częstotliwościowego.

2. Uśredniania otrzymanego wektora (2) w celu wygładzenia wektora progu detekcji:

$$\mu_{usr}(f) = \frac{1}{M} \sum_{m=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}} \mu_f(f+m) \quad (3)$$

gdzie  $\mu_{usr}(f)$  – uśredniony wektor wartości średnich  
 $M$  – rozmiar okna uśredniania.

3. Podniesienia progu detekcji o zmienną  $k$ , określaną empirycznie, wpływającą na czułość filtracji spektrogramu:

$$T(f,t) = \mu(f) + k. \quad (4)$$

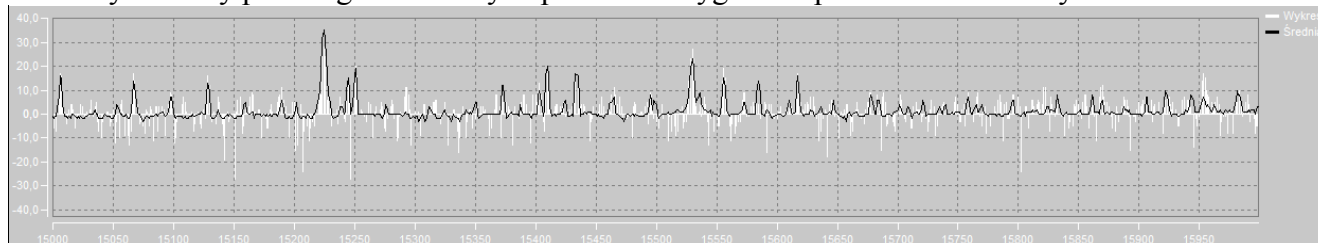
W wyniku uśredniania w dziedzinie czasu (krok 1) otrzymujemy średnie wartości poziomów sygnałów w kanałach częstotliwościowych oraz redukcję szumów. Dokładność wyznaczonych tą metodą poziomów sygnałów rośnie proporcjonalnie do czasu akwizycji. Operacja uśredniania

umożliwia wykrycie słabych sygnałów ukrytych w szumie, ponieważ zapewnia zysk przetwarzania mocy w dziedzinie częstotliwości zgodnie z poniższą zależnością [9]:

$$\text{zysk (dB) SNR} = 10 \cdot \log(\sqrt{N}) \quad (5)$$

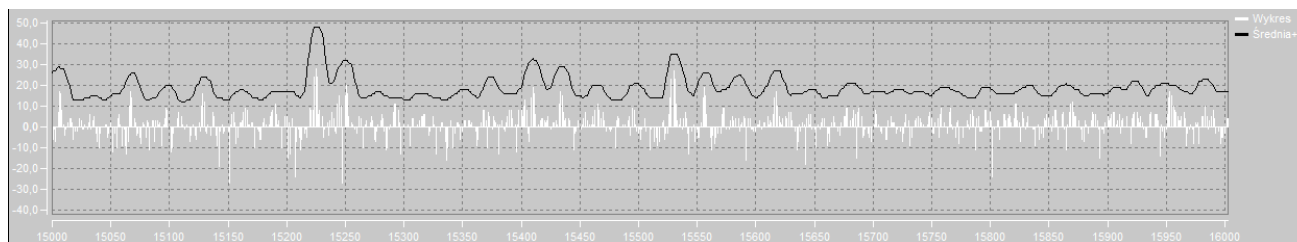
gdzie  $N$  – liczba uśrednionych realizacji.

Przykładowy przebieg uśrednionych poziomów sygnałów przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wynik uśredniania poziomów sygnałów w widmie częstotliwościowym (czarny wykres)

W wyniku przeprowadzonej operacji w kroku 2, wektor wartości średnich (3) zostaje "wygładzony" rysunek 3. W celu zwiększenia skuteczności filtracji spektrogramu uzyskane wartości wektora  $\mu_{usr}(f)$  są zwiększane o wartość zmiennej  $k$ , dobranej empirycznie.



Rys. 3. Wynik uśredniania otrzymanego wektora wartości średnich i dodania zmiennej  $k$  (czarny wykres)

Uzyskany wektor progu detekcji pozwala na eliminację sygnałów stałych oraz szumów. Pojawiające się emisje, których poziom przekracza wartość progu są gromadzone do dalszej analizy.

## 2.2 Wykrywanie emisji

Wykrywanie emisji przeprowadzane jest w dwóch blokach (rysunek 1):

- analizy sygnałów o stałej częstotliwości;
- analizy emisji FH.

W każdym z nich wykorzystywany jest spektrogram  $Y(f,t)$  otrzymany w wyniku filtracji odpowiednim progiem detekcji  $T(f,t)$ .

Podczas analizy sygnałów o stałej częstotliwości wykorzystywany jest współczynnik wypełnienia kanału w czasie, określony poniższą zależnością:

$$\alpha = \frac{\tau}{T} \quad (5)$$

gdzie  $\alpha$  – współczynnik wypełnienia kanału

$\tau$  – czas zajętości kanału

$T$  – okres obserwacji

Wartości współczynnika  $\alpha$ , przy których stwierdza się obecność sygnału dobrane są empirycznie. Emisje, które nie zostały zakwalifikowane jako emisje na stałej częstotliwości, podlegają dalszej analizie w bloku wykrywania emisji FH.

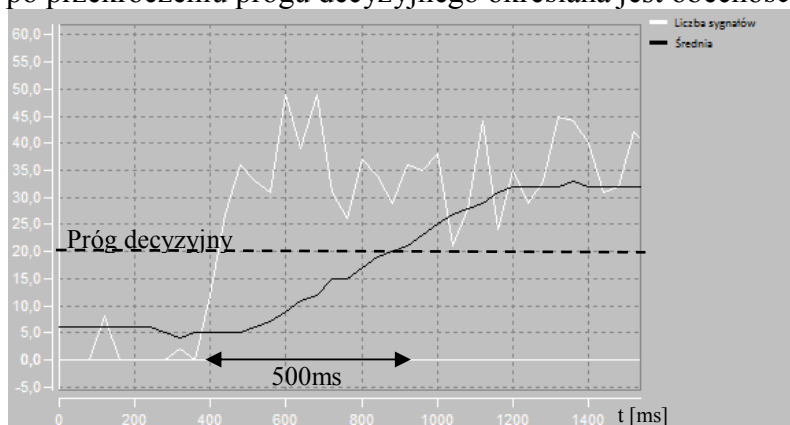
Analiza emisji FH przeprowadzana jest w oparciu o analizę histogramową oraz analizę zmian funkcji prawdopodobieństwa występowania sygnałów przekraczających ustalony próg detekcji. Histogram umożliwia określenie wartości nominalów częstotliwości, na których przeprowadzana jest transmisja. Natomiast analiza zmian FP pozwala wykryć pojawienie się nowej emisji FH.

Analiza ta polega na monitoringu liczby zarejestrowanych sygnałów przekraczających próg detekcji dla emisji FH i wyznaczeniu dla nich FP. Pojawienie się nowych emisji powoduje zmiany wartości FP, co zostało przedstawione na rysunku 4.



Rys. 4. Zmiany wartości FP pod wpływem pojawienia się nowych emisji FH:  
a) bez emisji FH, b) z jedną emisją FH, c) z dwiema emisjami FH

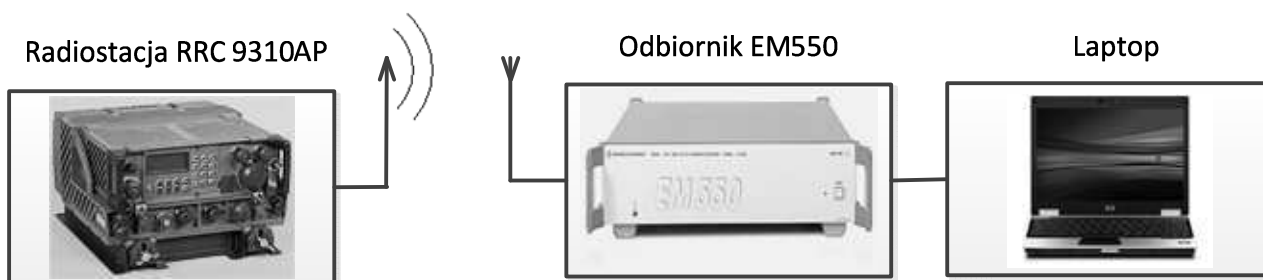
Wartość zmiennej  $k$  dla progu detekcji emisji FH dobierana jest tak, aby w czasie braku emisji FH wartość średnia FP oscylowała wokół 0. Pojawienie się nowej emisji FH powoduje wzrost wartości średniej FP. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy wykres analizy zmian FP, na podstawie którego po przekroczeniu progu decyzyjnego określana jest obecność emisji FH.



Rys. 5. Wykres analizy zmian FP - bieżąca liczba (wykres biały) oraz wartość średnia (wykres czarny) wykrytych sygnałów w zależności od czasu (10 nominalów, 5 MHz pasmo skanowania odbiornika)

### 3. Stanowisko pomiarowe

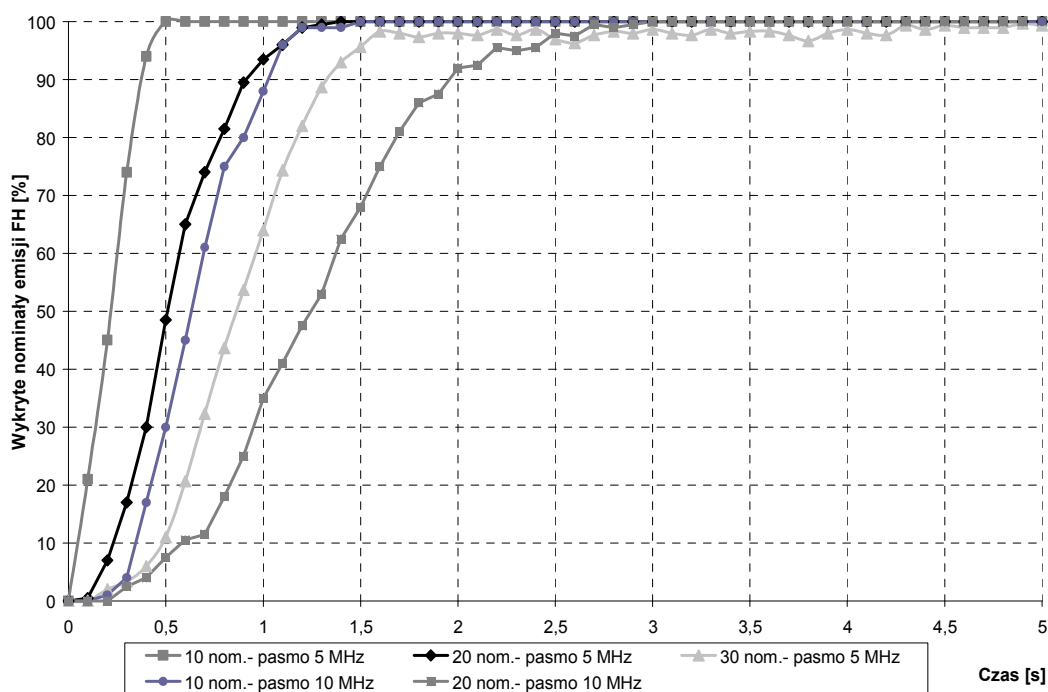
Opracowany algorytm wykrywania emisji FH został zaimplementowany i przetestowany w warunkach rzeczywistych, na sygnałach odbieranych z anten. Do badań wykorzystano odbiornik firmy Rohde&Schwarz EM550 oraz autorską aplikację do sterowania odbiornikiem umożliwiającą zapis i przetwarzanie odbieranych danych. W czasie testów odbiornik pracował w trybie Panorama Scan, w którym wykonywane były obliczenia FFT z rozdzielczością 6,25kHz, w paśmie 10MHz i szybkością 10GHz/s. Dzięki temu możliwa była rejestracja wszystkich emisji FH, których źródłem była radiostacja UKF RRC 9310AP. Praca radiostacji odbywała się, w zakresie częstotliwości 30MHz-40MHz, z pasmem 25kHz i szybkością skoków 300hop/s. Liczba zaprogramowanych nominalów częstotliwościowych wynosiła odpowiednio: 10, 20 i 30. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat stanowiska pomiarowego

#### 4. Wyniki detekcji

W celu sprawdzenia skuteczności metody detekcji emisji FH analizie poddano 3 sekwencje skoków w zakresie częstotliwości 31-34MHz, różniących się ilością zaprogramowanych nominałów. W pierwszej sekwencji występowało 10 nominałów w pasmach 31-31,2MHz i 33-33,2MHz, w drugiej 20 nominałów w pasmach 31-31,4 MHz i 33-33,4MHz, a w trzeciej 30 nominałów w pasmach 31-31,7MHz i 33-33,7MHz. Badania wykonano dla dwóch szerokości pasm skanowania odbiornika: 5MHz (30-35MHz) i 10MHz (30-40MHz). Czas skanowania pasma 5MHz odbiornikiem EM550 wynosił 4ms, natomiast pasma 10MHz 8ms. Pomiary powtórzono 10-krotnie, a uśrednione wyniki detekcji zostały przedstawione na rysunku 7.

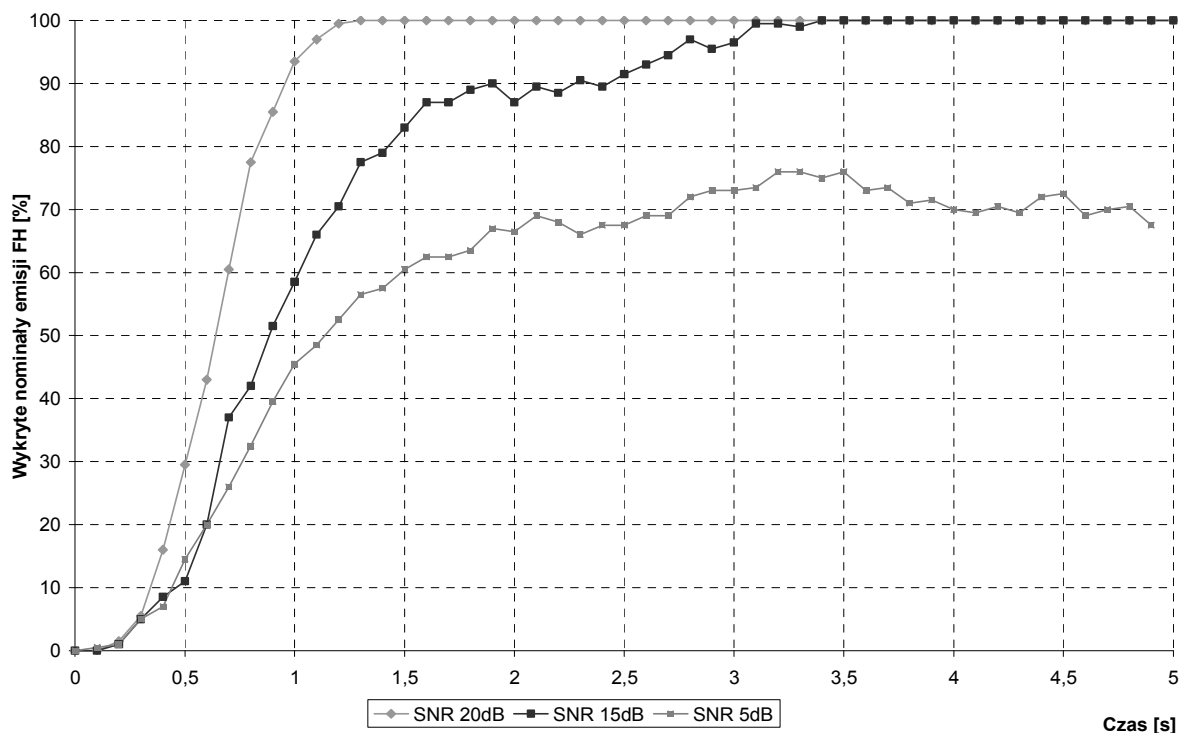


Rys. 7. Wykres liczby wykrytych nominałów w zależności od czasu analizy dla trzech sekwencji nominałów oraz dla dwóch szerokości pasm skanowania (5MHz i 10MHz)

Na podstawie otrzymanego wykresu można zauważyć, że liczba poprawnie wykrytych częstotliwości nośnych zależy od czasu obserwacji oraz ilości nominałów. Im więcej nominałów zawiera badana sekwencja, tym czas obserwacji powinien być dłuższy, aby możliwe było kilkukrotne potwierdzenie wystąpienia transmisji na danym nomiale. Dla pasma skanowania odbiornika 5MHz i pierwszej sekwencji, 90% nominałów zostało wykrytych w czasie poniżej 0,4s, dla drugiej czas ten wzrósł do ok. 0,8s, natomiast dla ostatniej sekwencji wyniósł już 1,3s. Natomiast przy wzroście pasma skanowania (czasu skanowania do 8ms) odbiornika do 10MHz czasy wykrycia nominałów wzrosły ok. dwukrotnie np.: dla 10 nominałów czas ten wyniósł ~0,4s dla 5MHz i ~1s dla 10MHz. Jest to spowodowane dłuższym czasem skanowania odbiornika, przez

co nie są rejestrowane wszystkie transmitowane dane (dla wykorzystanej radiostacji szybkość skoków wynosi 300hop/s).

W czasie badań zostały również przeprowadzone testy skuteczności metody dla różnych wartości stosunku sygnału do szumu SNR (rysunek 8). Wraz ze spadkiem SNR następowało pogorszenie skuteczności wykrywania nominalów. Dla SNR ok. 5dB prawidłowo wykryto jedynie ok. 70% nominalów emisji po czasie 2,7s. Podczas gdy, dla SNR ok. 15dB czas ten wynosił ok. 1,1s, a po 3s zostały wykryte wszystkie nominaly.



Rys. 8. Wykres zależności liczby wykrytych nominalów od czasu analizy dla trzech wartości SNR emisji FH

## 5. Wnioski

W artykule przedstawiono propozycję metody detekcji sygnałów FH opartej na analizie czasowo-częstotliwościowej. Przeprowadzone testy na sygnałach rzeczywistych, potwierdziły skuteczność jej działania. Czas detekcji jest uzależniony od szybkości pracy odbiornika oraz od ilości przetwarzanych danych, których rozmiar wzrasta proporcjonalnie do wielkości okna obserwacji. Metoda umożliwia prawidłowe wykrywanie emisji FH, przy czym szybkość określania częstotliwości nośnych zależy od ich liczby. Dodatkowo, na podstawie analizy zmian FP możliwa jest automatyczna detekcja obecności emisji na stałych częstotliwościach i emisji FH w analizowanych widnie częstotliwościowym. Dzięki temu można ją zastosować w systemach walki elektronicznej oraz jako element wspierający monitoring widma w systemach radia kognitywnego.

Opracowana metoda jest niezależna od platformy sprzętowej, ponieważ może być zaimplementowana na bazie dowolnego odbiornika umożliwiającego szybkie skanowanie widma częstotliwościowego.

## 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. G. Baranowski, R. Urban, K. Wilgucki, *Detekcja emisji FH na podstawie analizy czasowo-częstotliwościowej widma*, KSTiT 2011;
8. 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;
9. R. G. Lyons, *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*", WKŁ, Warszawa 1999.