

# KONCEPCJA SYSTEMU AUTOMATYCZNEGO WYKRYWANIA EMISJI FH

**Grzegorz BARANOWSKI, Kamil WILGUCKI, Robert URBAN**

Zakład Radiokomunikacji i Walki Elektronicznej  
Wojskowy Instytut Łączności  
05-130 Zegrze, ul. Warszawska 22 A

## Streszczenie

*Powszechność występowania i różnorodność sygnałów radiokomunikacyjnych oraz ich duża zmienność w czasie wymusza na systemach walki radioelektronicznej wysoki stopień automatyzacji. Manualne monitorowanie i wykrywanie emisji w szerokim zakresie częstotliwości przez jednego czy nawet kilku operatorów jest niepraktyczne i mało efektywne w systemach obciążenia. Do skutecznego zakłócenia tego rodzaju emisji, konieczne jest szybkie i automatyczne określenie parametrów odbieranych sygnałów takich jak: liczba nominalów oraz ich częstotliwości i amplitudy, a także szybkość przestrajania. W tym celu projektowane są wyspecjalizowane aparatownie radioodbiornicze wyposażone w zaawansowane odbiorniki skanujące wraz z odpowiednim oprogramowaniem specjalistycznym umożliwiającym analizę i przechwyt takich sygnałów.*

*W zakresie radiokomunikacji taktycznej współczesne systemy radiokomunikacyjne powszechnie stosują emisje z rozproszonym widmem FH. W artykule przedstawiono propozycję systemu umożliwiającego automatyczny proces wykrywania emisji FH, omówiono opracowaną metodę wykrywania i przedstawiono wyniki efektywności jej działania. Wykonano także pomiary szybkości działania metody dla rzeczywistych emisji rozproszonych. Na zakończenie przedstawiono możliwości rozbudowy systemu i wskazano potencjalne obszary jego zastosowania.*

## WSTĘP

Emisje FH są obecnie wykorzystywane w wielu systemach łączności bezprzewodowej, przy czym szczególnym obszarem ich zastosowania jest łączność militarna. Wynika to z zalet jakie mogą być uzyskane dzięki tej technice. Wykorzystanie techniki FH zmniejsza prawdopodobieństwo wykrycia i przechwycenia transmisji, zwiększa jej odporność na zakłócenie [1,2] oraz pozwala zwiększyć wydajność wykorzystania pasma. Wynika to ze sposobu generacji emisji FH, gdzie nośna sygnału jest przestrajana skokowo według pseudolosowego schematu. W celu odtworzenia oryginalnej wiadomości sekwencja skoków musi być znana i być identyczna zarówno w nadajniku, jak i odbiorniku. Dodatkowo, dla zwiększenia bezpieczeństwa komunikacji, do kontroli przeskoków częstotliwości stosuje się klucze szyfrujące.

Prace na systemami wykrywania emisji FH rozpoczęto wraz z momentem ich zastosowania w systemach radiokomunikacyjnych i są nadal kontynuowane ze względu na rozwój tej technologii. Wyniki tych prac, a zwłaszcza opisy algorytmów działania systemów detekcji, stanowią tajemnicę firmową i nie są ujawniane na forum publicznym, tym bardziej, że często dotyczy to zastosowań militarnych. Znane są jedynie podstawowe zasady działania takich systemów, natomiast brak jest informacji o technicznych szczegółach ich pracy. Jest to kolejny powód, aby zajmować się tym zagadnieniem i opracować własne systemy detekcji, które można rozwijać i modernizować w dowolnym momencie eksploatacji bez konieczności korzystania z kosztownych rozwiązań zagranicznych.

Pomimo ograniczonej wiedzy dotyczącej algorytmów zaimplementowanych w rozwiązaniach komercyjnych można znaleźć wiele publikacji naukowych opisujących metody wykrywania emisji FH. Przy czym można wyróżnić metody bazujące na analizie czasowo-częstotliwościowej [3], poziomu SNR [4], periodogramu [5], czy nawet analizie obrazu [6, 7]. Opisane rozwiązania mogą stanowić podstawę podczas opracowywania własnych algorytmów detekcji emisji FH. Skuteczność ich działania była i jest uzależniona od

możliwości sprzętowych, szczególnie dotyczy to wykorzystania szybkich odbiorników skanujących. Obecny rozwój technologii pozwala na zastosowanie urządzeń umożliwiających nie tylko wykrycie emisji FH, ale również jej śledzenie i zakłócanie w czasie rzeczywistym.

W niniejszym artykule omówiono autorską metodę wykrywania sygnałów FH wykorzystującą statystyczną analizę czasowo-częstotliwościową widma, którą można wykorzystać do budowy systemu automatycznej detekcji. Przedstawiono wyniki jej działania przy określaniu liczby nominalów i odpowiadających im wartości częstotliwości. Z uwagi na możliwość automatycznego wykrywania emisji FH zaprezentowano również wstępne rezultaty z testów wykorzystania opracowanej metody do prowadzenia zakłóceń odzewowych.

## 1. SYSTEM AUTOMATYCZNEJ DETEKЦИИ FH

Koncepcja systemu umożliwiającego automatyczne wykrycie emisji FH opiera się na wykorzystaniu odbiornika dokonującego szybkiego skanowania widma oraz aplikacji z algorytmem działającym w oparciu o metodę analizy czasowo-częstotliwościowej. Odbiornik lub ich zestaw dokonuje odbioru danych w zadanym zakresie częstotliwości, oblicza FFT, a otrzymane dane przesyła do bloku analizy czasowo-częstotliwościowej aplikacji. Szybkość działania systemu uzależniona jest od zastosowanego zestawu odbiorczego i szerokości monitorowanego zakresu częstotliwości. Im szerszy jest zakres częstotliwości tym czas potrzebny na dokonanie analizy danych i wykrycie emisji jest dłuższy. Działanie systemu można przyspieszyć wykorzystując kilka odbiorników pracujących równolegle, skanujących sąsiadujące pasma częstotliwości.

Do badań demonstratora systemu wykorzystano odbiorniki firmy Rohde&Schwarz EM550 lub EM510 oraz autorską aplikację do sterowania odbiornikiem i przetwarzania odbieranych danych. Algorytm działania opracowanej metody został szczegółowo opisany w [8]. Metoda bazuje na filtrowaniu danych monitorowanego zakresu częstotliwości za pomocą obliczonego progu detekcji, wyznaczaniu histogramów, określeniu nominalów częstotliwości oraz analizie funkcji prawdopodobieństwa liczby sygnałów powyżej wyznaczonego progu. W wyniku analizy przefiltrowanych danych uzyskiwana jest informacja o nowych emisjach oraz wyznaczona zostaje funkcja prawdopodobieństwa (FP) liczby sygnałów powyżej progu, wykorzystywana do wykrycia nowej emisji 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

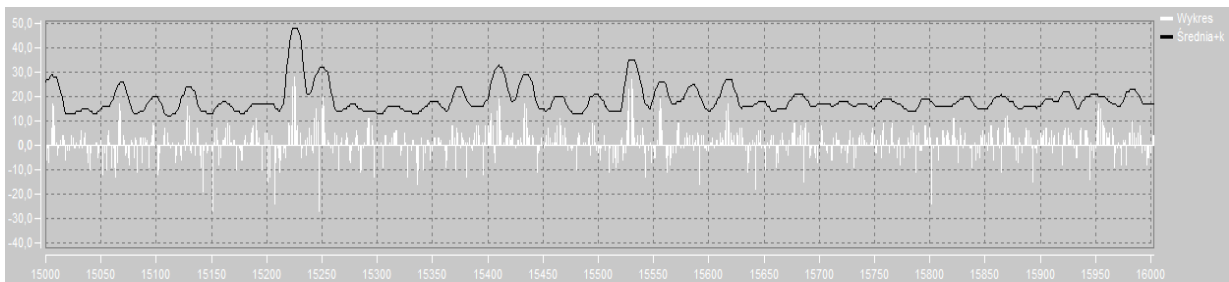
Próg detekcji obliczany jest na podstawie uśredniania w dziedzinie czasu próbek sygnałów na poszczególnych częstotliwościach, uśredniania otrzymanego wektora wartości średnich oraz zmiany wartości progu o zmienną  $k$  [8].

Szczególnie istotna jest operacja uśredniania w dziedzinie czasu w wyniku której otrzymujemy średnie wartości poziomów sygnałów na poszczególnych częstotliwościach 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 zależnością przedstawioną poniżej [9]:

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

gdzie  $N$  – liczba uśrednionych realizacji.

Przykładowy próg detekcji otrzymany w wyniku powyższych operacji został przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Przykładowy obraz monitorowanego fragmentu widma oraz wyznaczony próg detekcji (czarny wykres)

Uzyskany próg detekcji pozwala na eliminację szumów, a pojawiające się emisje, których poziom przekracza wartość progu, są poddawane dalszej analizie.

## 2.2 Wykrywanie emisji

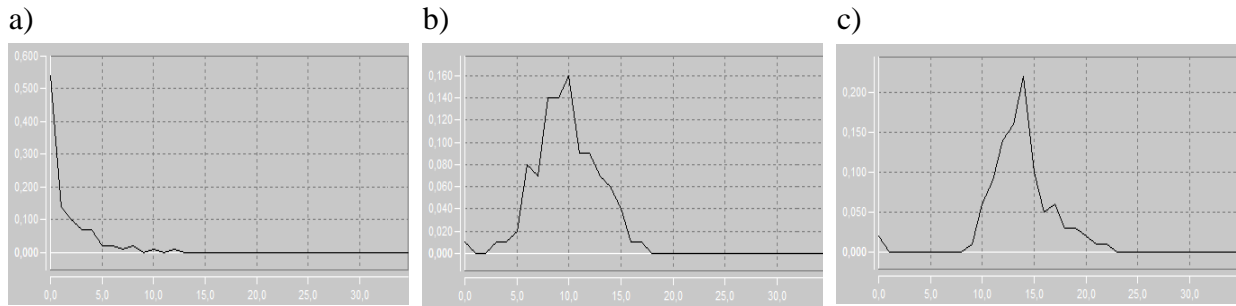
W celu wykrycia sygnałów o stałej częstotliwości wprowadzono współczynnik wypełnienia kanału w czasie, określony poniższą zależnością:

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

gdzie  $\alpha$  – współczynnik wypełnienia kanału  
 $\tau$  – czas zajętości kanału  
 $T$  – okres obserwacji

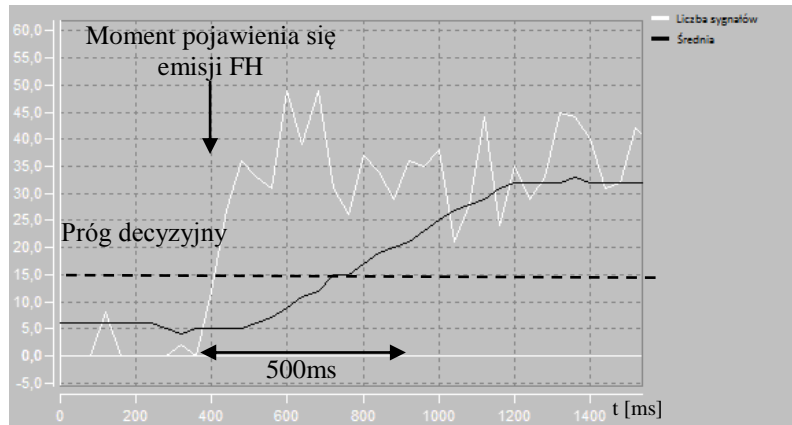
Wartości współczynnika  $\alpha$ , przy których stwierdza się obecność sygnału dobierane są empirycznie.

Wykrywanie emisji FH przeprowadzane jest w oparciu o analizę histogramową oraz analizę zmian funkcji prawdopodobieństwa liczby sygnałów przekraczających obliczony próg detekcji. Na podstawie histogramu możliwe jest dokładne określenie wartości nominalów częstotliwości, na których przeprowadzana jest emisja FH. Z kolei analiza zmian FP umożliwia sygnalizację wykrycia nowej emisji FH. Pojawienie się kolejnych emisji spowoduje zmiany wartości FP, co zostało przedstawione na rysunku 2.



Rys. 2. Zmiany FP pod wpływem pojawienia się nowych emisji FH [8]:  
a) bez emisji FH, b) z jedną emisją FH, c) z dwiema emisjami FH

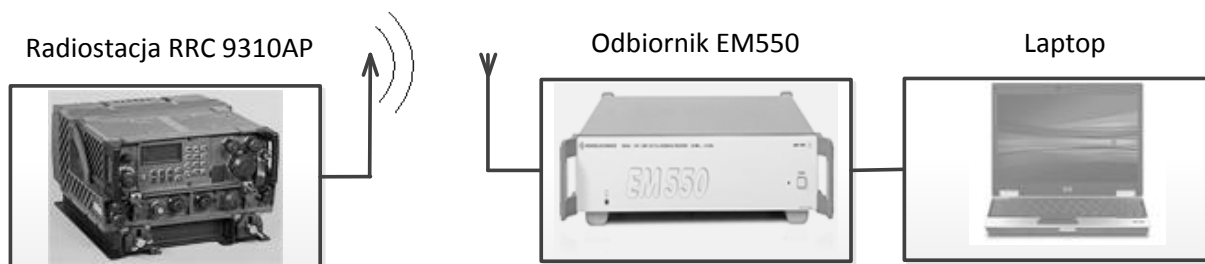
Wartość progu detekcji dobierana jest w taki sposób, aby wartość średnia FP oscylowała wokół zera. Pojawienie się nowej emisji FH lub jej zanik spowodują zmianę wartości średniej FP. Przy pojawieniu się emisji FH nastąpi wzrost wartości średniej, natomiast po jej zaniku spadek. Na rysunku 3 został przedstawiony przykładowy wykres zmian liczby sygnałów powyżej progu spowodowany przez pojawienie się emisji FH.



Rys. 3. Wykres liczby sygnałów powyżej progu - bieżąca liczba (wykres biały) oraz wartość średnia (wykres czarny) wykrytych sygnałów w zależności od czasu [8]

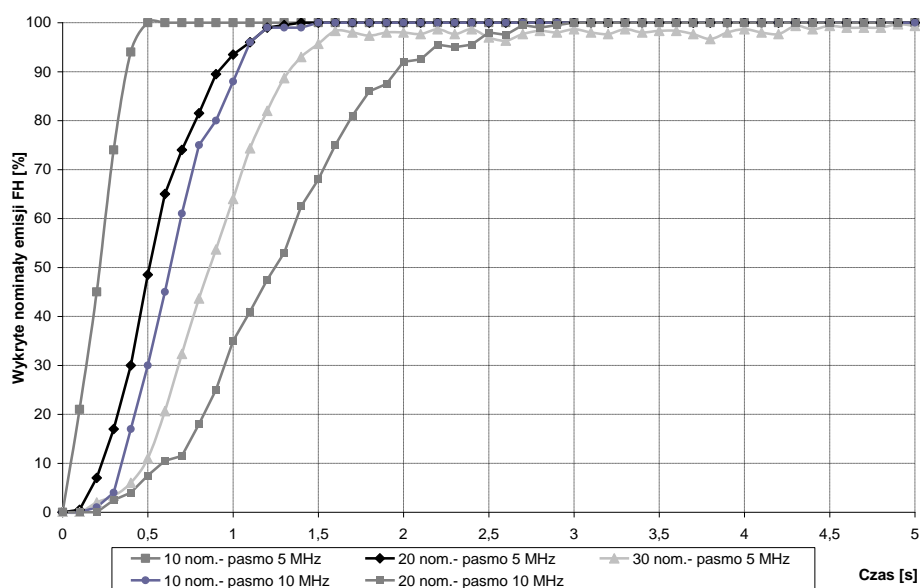
## 2. UZYSKANE REZULTATY

Opracowany algorytm wykrywania emisji FH został zaimplementowany i przetestowany w warunkach rzeczywistych, na sygnałach odbieranych z anten. W czasie testów odbiornik EM550 firmy R&S 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 sygnałów FH, których źródłem była radiostacja UKF RRC 9310AP (Radmor). 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 4.



Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego

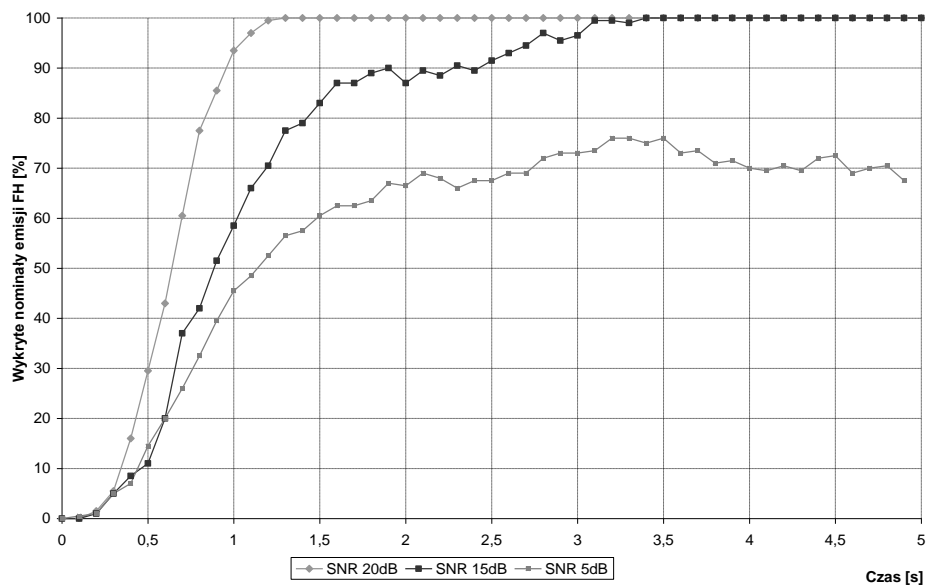
W celu sprawdzenia skuteczności metody detekcji emisji FH analizie poddano trzy sekwencje skoków, różniących się ilością zaprogramowanych nominalów. W pierwszej sekwencji występowało 10 nominalów w pasmach 31-31,2MHz i 33-33,2MHz, w drugiej 20 nominalów w pasmach 31-31,4MHz i 33-33,4MHz, a w trzeciej 30 nominalów 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 zwiększa się proporcjonalnie do szerokości analizowanego zakresu częstotliwości np. dla pasma 5MHz wynosił ok. 4ms, natomiast pasma 10MHz ok. 8ms. Pomiary powtórzono 10-krotnie, a uśrednione wyniki detekcji zostały przedstawione na rysunku 5.



Rys. 5. Wykres liczby wykrytych nominalów w zależności od czasu analizy dla trzech sekwencji nominalów 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 nominalów. Im więcej nominalów zawiera badana sekwencja, tym czas obserwacji powinien być dłuższy, aby możliwe było kilkukrotne potwierdzenie wystąpienia transmisji na danym nominale. Dla pasma skanowania odbiornika 5MHz i pierwszej sekwencji, 90% nominalów zostało wykrytych w czasie poniżej 0,4s, dla drugiej czas ten wzrósł do ok. 0,8s, natomiast dla ostatniej sekwencji wyniósł już 1,3s. Przy wzroście pasma skanowania (czasu skanowania do 8ms) odbiornika do 10MHz czasy wykrycia nominalów wzrosły ok. dwukrotnie np.: dla 10 nominalów 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 6). 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.



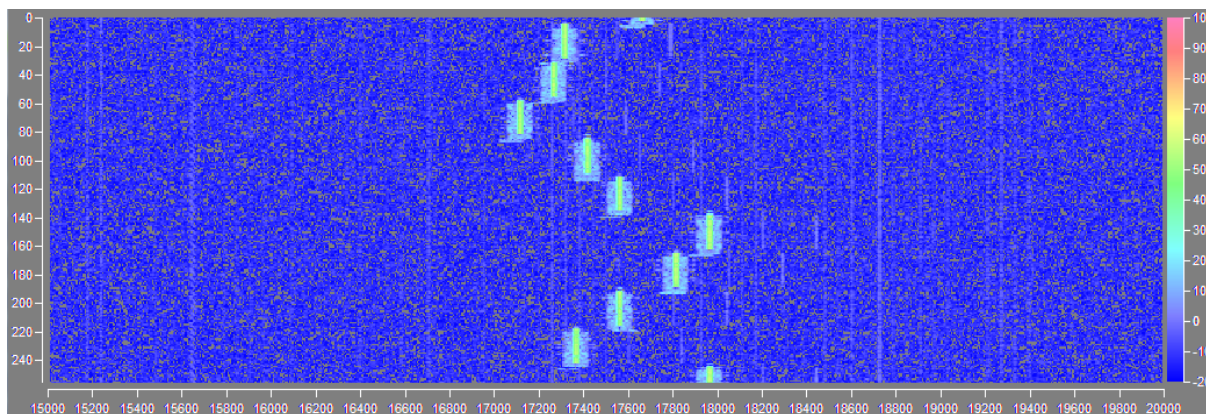
Rys. 6. Wykres zależności liczby wykrytych nominalów od czasu analizy dla trzech wartości SNR emisji FH

Analogiczne badania przeprowadzono w zakresie KF wykorzystując w systemie odbiornik EM510. Z uwagi na to że szybkość FH wykorzystywana przez radiostacje KF jest wielokrotnie mniejsza niż dla radiostacji UKF, szybkość skanowania zapewniana przez odbiornik była wystarczająca aby rejestrować pojedynczy skok częstotliwości kilka/kilkanaście razy. Dzięki temu prawdopodobieństwo wykrycia emisji wzrasta i możliwa jest detekcja sygnału FH przy niższej wartości SNR.

### 3. ZAKŁÓCANIE WYKRYTYCH EMISJI FH

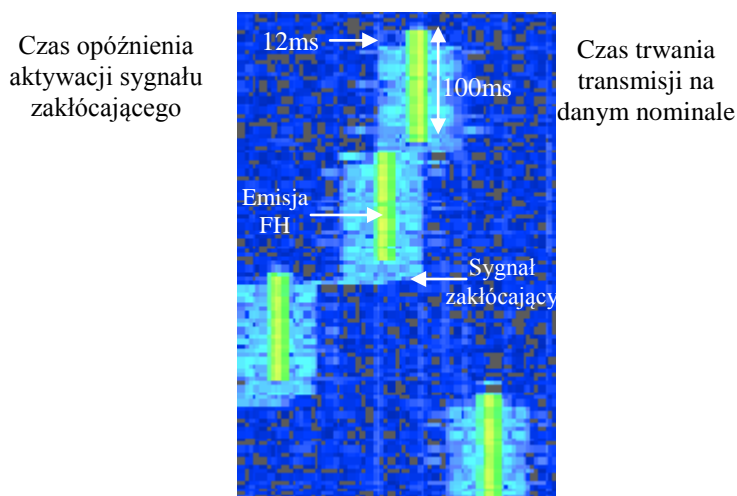
Możliwość wykrycia emisji FH jest szczególnie istotna w walce elektronicznej (WE). Dane z przeprowadzonej detekcji mogą być wykorzystane do przechwycenia transmitowanej informacji, jak również w systemie zakłócania, do pozbawienia łączności radiowej przeciwnika.

Wykorzystując system automatycznego wykrywania emisji FH z odbiornikiem EM510 i zestaw zakłócający, przeprowadzono szereg sprawdzeń mających na celu sprawdzenie możliwości prowadzenia zakłóceń odzewowych emisji FH. Jako źródło emisji FH została wykorzystana radiostacja KF Harris RF-5800H-MP pracująca w trybie FH z szybkością 10hop/s w paśmie 17-18MHz. Natomiast jako źródło emisji zakłócających zastosowano zestaw nadajnika opracowany w WIŁ na bazie kart NI-PXI 5610 i 5442 firmy National Instruments i wzmacniacza Mini-Circuits LZY-22X+. Wykrycie sygnałów, a następnie generacja zakłóceń w trybie odzewowym przebiegała automatycznie. Na rysunku 7 został przedstawiony spektrogram obrazujący wynik zakłócania wykrytych emisji FH. Kolor zielony odpowiada emisjom FH, natomiast sygnał zakłócający odpowiada kolorowi jasnoniebieskiemu wokół emisji FH.



Rys. 7. Wyniki zakłócania emisji FH w zakresie KF, zastosowano poziom sygnału zakłócającego niższy niż emisji FH w celu zobrazowanie możliwości zakłócania sygnałów w trybie odzewowym

Jak można zauważyć przeprowadzone testy potwierdziły możliwość skutecznego zakłócenia wykrytych sygnałów. Czas opóźnienia pomiędzy wykryciem sygnału, a generacją zakłóceń wyniósł ok. 12ms. Natomiast czas trwania transmisji na danym nominale ok. 100 ms, z czego wynika, że sygnał był zakłócany przez blisko 90% tego czasu. Pozwala to skutecznie zablokować łączność przeciwnika. Zgodnie z literaturą [2][3] przyjmuje się, że wystarczy zakłócić 30% czasu trwania transmisji cyfrowej, aby uniemożliwić wymianę informacji. Na rysunku 8 został przedstawiony fragment spektrogramu z rysunku 7 z zaznaczonym czasem trwania transmisji na danym nominale oraz czasem opóźnienia aktywacji sygnału zakłócającego.



Rys. 8. Fragment spektrogramu z rysunku 7

Czas opóźnienia wynika z czasu:

- skanowania odbiornika (~4ms),
- pracy algorytmu wykrywania i podjęcia decyzji(~4ms),
- przesłania danych do nadajnika zakłóceń po sieci Ethernet (~1ms),
- przestrojenia nadajnika (~3ms).

Ze względu na czasy opóźnienia, zakłócanie emisji FH w zakresie UKF może być przeprowadzane w trybie generacji sygnału grzebieniowego lub pasmowego szumu na wykrytych częstotliwościach nominalów FH. Stawia to jednak wysokie wymagania na szerokość pasma IF generatora zakłóceń lub szybkość jego syntezy.

#### 4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono koncepcję systemu automatycznego wykrywania emisji FH działającego w oparciu o metodę analizy czasowo-częstotliwościowej. W proponowanym systemie można wykorzystać dowolny odbiornik umożliwiający szybkie skanowanie widma częstotliwościowego. Przeprowadzone testy na sygnałach rzeczywistych, z wykorzystaniem radiostacji wąskopasmowych będących na wyposażeniu armii, potwierdziły skuteczność działania metody. Czas detekcji jest uzależniony od szybkości pracy odbiornika oraz od ilości przetwarzanych danych, których rozmiar wzrasta proporcjonalnie do szerokości monitorowanego zakresu częstotliwości. Metoda umożliwia prawidłowe wykrywanie emisji FH, przy czym szybkość określania częstotliwości nośnych maleje wraz ze wzrostem ich liczby oraz zmniejszeniem wartości SNR.

Chcąc uodpornić system radiokomunikacji przed działaniami przeciwnika zmierzającymi do jego rozpoznania, przechwycenia lub zakłócenia transmisji, należy stosować możliwie dużą liczbę nominałów i rozproszyć je w maksymalnie szerokim zakresie częstotliwości. Zwiększenie szybkości działania systemu możliwe jest przy wykorzystaniu kilku odbiorników skanujących. Np. dla 6 odbiorników EM550 (okna obserwacji 10MHz) możliwe jest uzyskanie czasu wykrycia emisji rzędu 8ms dla zakresu częstotliwości 30-88MHz. Zastosowanie jednego odbiornika skanującego pozwala jedynie na skuteczne monitorowanie co najwyżej 20MHz pasma z krokiem 25kHz.

Algorytm automatycznego wykrywania emisji FH można zastosować jako element systemu WE do określania nominałów częstotliwości przeznaczonych do przechwytu i ewentualnego zakłócenia. Możliwe jest także wykorzystanie go do modułu monitoringu widma w sieciach radia kognitywnego w celu określania wolnych zasobów częstotliwości i sprawdzania zajętości kanałów.

#### 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. G. Baranowski, R. Urban, K. Wilgucki, *Detekcja emisji FH na podstawie analizy czasowo-częstotliwościowej widma*, KSTiT 2011;
4. 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;
5. W. J. L. Read, *Detection of Frequency Hopping Signals in Digital Wideband Data*, Defence R&D Canada, Ottawa 2002;
6. S. Luo, L. Luo, *Adaptive Detection of an Unknown FH Signal Based on Image Features*, Wireless Communications Networking and Mobile Computing, pp. 762-765, 2009;
7. Chengdu L. Haiyan, J. Hua, *Blind Detection of Frequency Hopping Signal Using Time-Frequency Analysis*, Wireless Communications Networking and Mobile, pp. 1-4, Chengdu 2010;
8. G. Baranowski, K. Wilgucki, R. Urban, *Automatyczna detekcja emisji FH na podstawie analizy czasowo-częstotliwościowej widma*, KSTiT 2012;
9. R. G. Lyons, *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*", WKŁ, Warszawa 1999.