



Efektywna metoda monitoringu widma do wykrywania sygnałów wyzwalających IED

MICHAŁ KRYK, JERZY ŁOPATKA

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji,
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2, mkryk@wat.edu.pl, jlopatka@wat.edu.pl

Streszczenie. Podczas realizowania obecnych misji wojskowych obserwuje się gwałtowny wzrost znaczenia improwizowanych ładunków wybuchowych IED. Powodem tak dużego zainteresowania terrorystów tymi rozwiązaniami jest łatwy dostęp do broni oraz tanich i szeroko osiągalnych systemów komunikacji. W celu zminimalizowania działania ładunków IED, w urządzeniach odpowiedzialnych za monitorowanie środowiska elektromagnetycznego wprowadza się nowe metody skanowania i wykrywania sygnałów radiowych. Wpływają one na zwiększenie jakości odbieranych danych oraz skracają czas detekcji, a tym samym czas reakcji całego systemu. Dlatego też celem niniejszego artykułu jest przedstawienie metody skanowania sygnałów radiowych. Do zrealizowania tego zadania zaproponowano procedurę detekcji, którą następnie sprawdzono na stanowisku pomiarowym.

Praca składa się z czterech rozdziałów. W pierwszym opiszano założenia oraz ideę działania proponowanego systemu skanowania sygnałów. Przedstawiono w nim metodę składającą się z dwóch części: detektora tła szumowego i detektora energii.

W następnym rozdziale zaprezentowano stanowisko pomiarowe. Opiszano podstawowe parametry odbiornika, szczególnie zwracając uwagę na zastosowany w nim tor obliczania widma sygnału. Następnie zaprezentowano sposób wykonywania testów.

W rozdziale trzecim przedstawiono wyniki przeprowadzonych testów, znajdują się tam podstawowe charakterystyki prawdopodobieństwa fałszywego alarmu i detekcji dla różnych trybów pracy.

Ostatni rozdział podsumowuje uzyskane wyniki i przedstawia wnioski.

Słowa kluczowe: telekomunikacja, detektory energii, stacja zakłócająca

1. Wstęp

Podczas realizowania obecnych misji wojskowych obserwuje się gwałtowny wzrost znaczenia improwizowanych ładunków wybuchowych IED. Powodem tak

dużego zainteresowania terrorystów tymi rozwiązaniami jest łatwy dostęp do broni oraz tanich i szeroko osiągalnych systemów komunikacji.

W celu zminimalizowania zagrożenia spowodowanego przez IED konieczne jest zakłócenie sygnałów je wyzwalających [1]. Jednym ze sposobów przeciwdziałania zdalnej detonacji radiowej są zakłócenia zaporowe, które są generowane w sposób ciągły. Jednakże powodują one ograniczenie użyteczności własnych sensorów, zakłócają systemy cywilne oraz narażają żołnierzy na nadmierne napromieniowanie radiowe. Wobec tego konieczne jest opracowanie metod, które pozwolą ograniczyć negatywny wpływ generowanych zakłóceń, przy jednoczesnym zachowaniu ich skuteczności. Jedną z nich jest metoda odzewowa, która polega na tym, że w sposób ciągły prowadzone jest monitorowanie widma, natomiast w momencie wykrycia zagrożenia generowane jest zakłócenie blokujące sygnał wyzwalający. Układy monitorujące widmo powinny charakteryzować się:

- minimalnym czasem zwłoki, zależnym od zakłócanego systemu,
- niezbędną czułością, pozwalającą na wykrycie słabych sygnałów,
- selektywnością.

W celu opracowania skutecznej metody monitoringu widm służącej do wykrywania sygnałów wyzwalających IED porównano koherentną i niekoherentną metodę detekcji. Detekcja koherentna to metoda wymagająca zapewnienia zsynchronizowania odbiornika w fazie i częstotliwości z sygnałem nośnym. Precyzyjne uzyskanie synchronizacji może być bardzo trudne, dlatego alternatywną jest detekcja niekoherentna. W metodzie tej zakłada się, że faza sygnału odbieranego jest nieznaną, jednakże stosując przetwarzanie sygnałów zespolonych, można uzyskiwać porównywalne wyniki dotyczące zajętości widma [2].

Innymi metodami, które mogłyby zostać wykorzystane w wykrywaniu sygnałów wyzwalających IED, są:

- metoda modelowania autoregresyjnego,
- metody czasowo-częstotliwościowe.

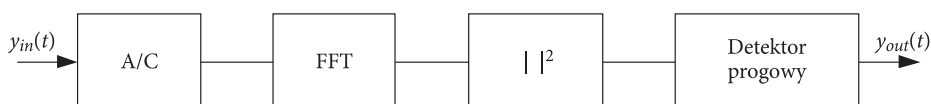
Metody modelowania autoregresyjnego [3] umożliwiają rozpoznawanie typu modulacji i wykorzystywanie parametrów modelu AR jako cech dystynktywnych. Nadają się one do wykrywania krótkich sygnałów, jednak ich czułość jest ograniczona.

Metody czasowo-częstotliwościowe przedstawione w pracy [4] obrazują aspekty przetwarzania sygnałów, w których standardowe algorytmy oparte na transformacji Fouriera nie są w stanie odwzorować wewnętrznej, zmieniającej się w czasie struktury sygnału.

Problem detekcji występuje również dla potrzeb radia kognitywnego, i do wykrywania sygnałów wyzwalających można wykorzystać metody, które są tam stosowane. Należą do nich między innymi:

- detektory wykorzystujące filtrację dopasowaną,
- detektory energii,
- detektory cyklostacjonarności.

Detektory energii są niekoherentną metodą wykrywania sygnałów bazujących na kryterium Neymana-Pearsona [5]. Zasada działania tego typu procedur polega na obliczeniu energii sygnału wejściowego, podjęciu decyzji o obecności celu i pomiaru jego parametrów. Decyzja o wykryciu sygnałów jest podejmowana w układzie progowym. Jeżeli odebrany sygnał jest większy od tej wartości progowej, wówczas podejmuje się decyzję o obecności celu. Przetwarzanie sygnałów w tej metodzie jest realizowane w oparciu o algorytm niewymagający dużego nakładu obliczeniowego. Ogólny schemat budowy detektora energii przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Budowa detektora energii

Metoda ta umożliwia wykrywanie sygnałów w przypadkach, gdzie nie dysponujemy uprzednio wiedzą co do ich częstotliwości środkowej i pasma sygnału. W razie potrzeby uzyskania dokładnej informacji o sygnale konieczne jest wprowadzenie dalszych etapów przetwarzania, które są zawarte m.in. w detektorach cyklostacjonarności [6]. Metody te charakteryzują się większą czułością, jednakże wymagają większej liczby obliczeń, co powoduje wydłużenie czasu reakcji systemu.

W przypadku wykrywania IED najważniejszym parametrem jest czas wykrycia i dlatego też metodą, na której oparto dalsze prace, będzie detektor energii, wykorzystujący szybką transformatę Fouriera FFT.

2. System detekcji

Wymagania stawiane systemom detekcji są bardzo restrykcyjne. Są to:

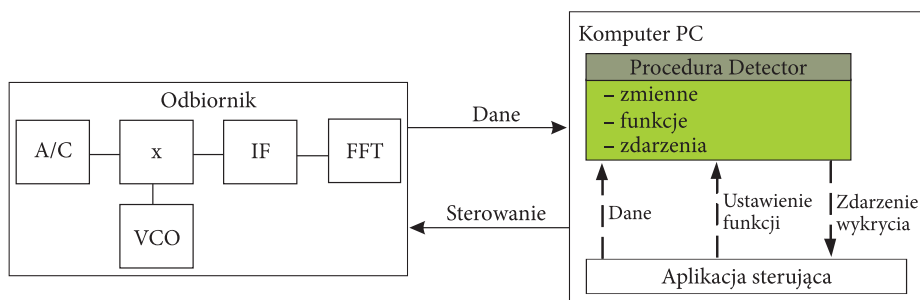
- szerokie pasmo analizy,
- duża szybkość skanowania,
- niewielka liczba fałszywych wykryć,
- jak największy współczynnik poprawnych detekcji.

Mając na uwadze powyższe założenia, zrezygnowano z typowej koncepcji systemu detekcji, w której procedura FFT (*Fast Fourier Transform*) jest wykonywana programowo. Powoduje to znaczne opóźnienie związane z procesem odbioru, transmisją, analizą i przetwarzaniem danych IQ na widmo częstotliwościowe. Dlatego też zaproponowano wykorzystanie odbiornika z wbudowanym procesorem FFT.

1.1. Idea proponowanego systemu detekcji

Zaproponowany system detekcji (rys. 2) składa się z:

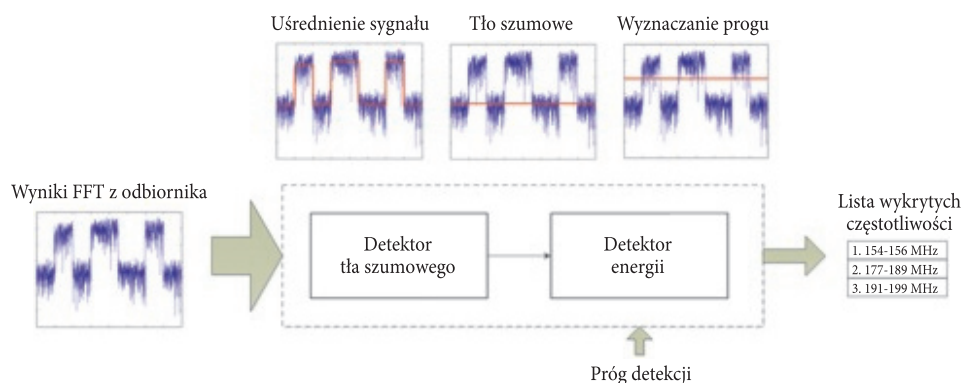
- szerokopasmowego cyfrowego odbiornika sygnałów radiowych,
- komputera z aplikacją sterującą i zaimplementowaną biblioteką detektora.



Rys. 2. Ogólny schemat systemu

Zadaniem odbiornika jest szybkie wykrywanie sygnałów radiowych w środowisku elektromagnetycznym. Dzięki wykorzystaniu specjalizowanych układów przetwarzania w odbiorniku istnieje możliwość regulacji i analizy parametrów w różnych zakresach częstotliwości, aby zrealizować szerokopasmowy monitoring. Dodatkowo dzięki zastosowaniu układów FFT w odbiorniku obliczane jest w czasie rzeczywistym widmo sygnałów. Następnie wyliczone dane są przesyłane w postaci cyfrowej do komputera.

Idea działania zaimplementowanych algorytmów polega na wykorzystaniu detektora energii wraz z adaptacyjnym pomiarem tła szumowego (rys. 3).



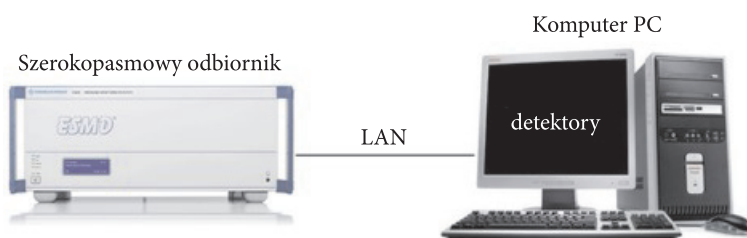
Rys. 3. Idea działania systemu detekcji

Wraz z kolejnymi wynikami transformaty Fouriera obliczana jest wartość tła szumowego występującego pomiędzy poszczególnymi emisjami. Następnie w wyniku dalszej analizy określany jest próg detekcji, który określony jest adaptacyjnie w zależności od aktualnych warunków w środowisku. Efektem działania aplikacji jest lista częstotliwości wykrytych celów radiowych.

1.2. Demonstrator systemu detekcji

Zaproponowana idea systemu detekcji została zrealizowana na układzie przedstawionym poniżej (rys. 4). W skład tego stanowiska wchodzi:

- szerokopasmowy odbiornik R & S ESMD,
- komputer PC.

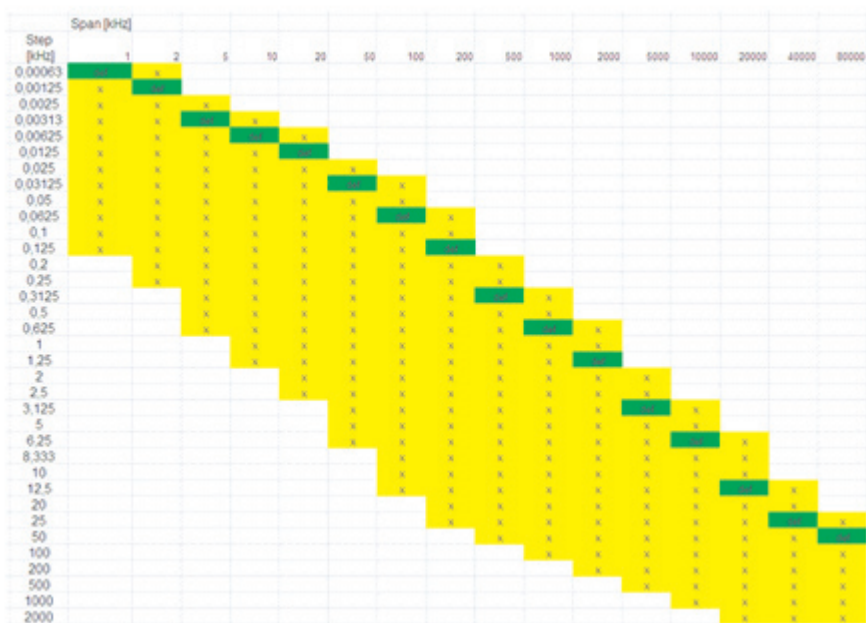


Rys. 4. Demonstrator systemu detekcji

Rolą odbiornika jest odebranie sygnałów w szerokim paśmie częstotliwości od 20 MHz do 3,6 GHz. Odbiornik ma możliwość analizy sygnałów w paśmie podstawowym 80 MHz oraz demodulacji sygnałów poprzez wbudowane demodulatory FM, AM, IQ. Jako urządzenie wielofunkcyjne może pracować na stałej częstotliwości lub skacząc według zadanej sekwencji kanałów. Dzięki zastosowaniu w urządzeniu modułu do obliczania FFT oraz wprowadzaniu protokołu odczytu jest możliwość zapisywania analizowanego widma sygnału w formie pliku lub odbioru strumienia z danymi w czasie rzeczywistym.

Odbiornik pracując w trybie „IF Panorama”, oblicza widmo amplitudowe. Wielkość transformaty FFT może być regulowana w zakresie od 16 do 4096 punktów. Dobór tego parametru dokonuje się pośrednio przez nastawienie wielkości analizowanego pasma (Span) i rozdzielczości FFT (Step). Zakres obliczanej transformaty jest ograniczony, co przedstawia rysunek 5.

Dodatkowo w tym trybie możliwy jest wybór różnych opcji uśrednień, tj. CLRWRITE, AVERAGE, MAXIMUM, MINIMUM, których zakres działania można regulować przez określenie czasu pomiaru. Każda z tych opcji przeznaczona jest do analizy innego rodzaju sygnałów, a ich właściwości przedstawia tabela 1 [7].



Rys. 5. Zakres regulacji parametrów transformaty FFT [7]

TABELA 1

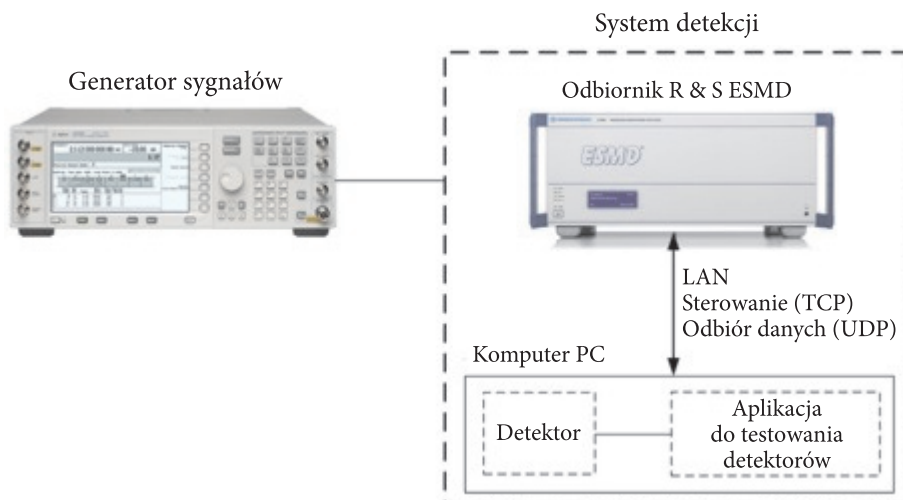
Właściwości opcji uśrednień

| Opcja | CLRWRITE | AVERAGE | MAXIMUM | MINIMUM |
|------------------------------------|--|--|--|---|
| Zalecane obszary wykorzystania: | <ul style="list-style-type: none"> - sygnały FM i AM - dostrzegalne zmiany w czasie | <ul style="list-style-type: none"> - wygładzanie tła szumowego i sygnałów - rozróżnialność słabych sygnałów z szumu | <ul style="list-style-type: none"> - sygnały o krótkim czasie trwania - wykrywanie zakłóceń impulsowych | <ul style="list-style-type: none"> - stacjonarne sygnały - tłumienie sygnałów niestacjonarnych - obniżenie tła szumowego |
| Niezalecane obszary wykorzystania: | <ul style="list-style-type: none"> - sygnały o krótkim czasie trwania - niestabilny poziom szumów - rozróżnialność słabych sygnałów | <ul style="list-style-type: none"> - sygnały o krótkim czasie trwania - brak rozróżnialności modulacji (niedostrzegalne zmiany w czasie) | <ul style="list-style-type: none"> - zwiększenie poziomu szumów, - rozróżnialność słabych sygnałów - brak rozróżnialności modulacji (niedostrzegalne zmiany w czasie) | <ul style="list-style-type: none"> - sygnały niestacjonarne |

3. Stanowisko pomiarowe

W celu wyznaczenia podstawowych charakterystyk systemu detekcyjnego stworzono stanowisko laboratoryjne (rys. 6). W skład tego stanowiska wchodzi:

- generator sygnałów arbitralnych,
- proponowany system detekcji.



Rys. 6. Stanowisko laboratoryjne systemu detekcji

W przeprowadzonych pomiarach skupiono się na wykrywaniu sygnałów PMR (ang. *Private Mobile Radio*) i GSM. Źródłem emisji był generator sygnałów arbitralnych, generujący sygnały odzwierciedlające parametry analizowanych transmisji. W celu uzyskania powtarzalnych wyników badań, umożliwiających optymalizację parametrów detektora, wykorzystano przewodową transmisję sygnałów radiowych.

Parametry generowanych sygnałów testowych:

- sygnał testowy PMR (ciągły):
 - rodzaj modulacji: FM,
 - sygnał modulujący: szum,
 - dewiacja: 7 KHz,
- sygnał testowy GSM (impulsowy):
 - pasmo pracy: 200 KHz,
 - czas trwania slotu sygnału $\sim 0,5$ ms,
 - okres powtarzania $\sim 4,6$ ms.

Monitoring szerokiego pasma częstotliwości umożliwia analizę wielu sygnałów w tym samym czasie pracy, co jest przydatne do obserwacji kilku celów jednocześnie. Jednakże zwiększanie pasma analizowanego widma, szczególnie w przedstawionym

stanowisku pomiarowym, powoduje ograniczenia ze względu na obniżenie dynamiki odbiornika oraz ograniczony zakres doboru rozmiaru transformaty FFT w odbiorniku (rys. 5). Wpływa to na zmniejszanie rozdzielczości, a tym samym zmniejszenie efektywności wykrywanych sygnałów.

Z przeprowadzonej analizy rzeczywistych rozwiązań PMR wynika, że szerokość pasma pracy w standardowych radiotelefonach wynosi 12,5 KHz lub 25 KHz. Dodatkowo zakres pracy dla radiotelefonów PMR oraz dla telefonów komórkowych w systemie GSM900 mieści się w paśmie pracy 40 MHz. Ponadto, w wykorzystanym odbiorniku, przy rozdzielczości 12,5 KHz maksymalne pasmo wynosi 40 MHz.

W oparciu o przeprowadzoną analizę parametry odbiornika zostały tak dobrane, aby uzyskać maksymalizację szybkości skanowania przy zachowaniu jak największej rozdzielczości widmowej:

- pasmo pracy (*Span*) 40 MHz,
- rozdzielczość FFT (*Step*) 12,5 KHz,
- czas wykonywania pomiaru (*Measure Time*) 4 ms,
- wykorzystanie trybu CLRWRITE i MAXIMUM.

Tryby, które zostały określone do przeprowadzenia testów to CLRWRITE i MAXIMUM. CLRWRITE jest trybem szybkim, który umożliwia wykrywanie szybkiej zmiany w dziedzinie czasu, i zaleca się go stosować do sygnałów zmodulowanych AM i FM, tj. w PMR. W trybie MAXIMUM jest możliwość analizy sygnałów o krótkim czasie trwania i wykrywanie sygnałów impulsowych. Dlatego też został on wybrany ze względu na możliwość zwiększenia skuteczności detekcji sygnałów GSM.

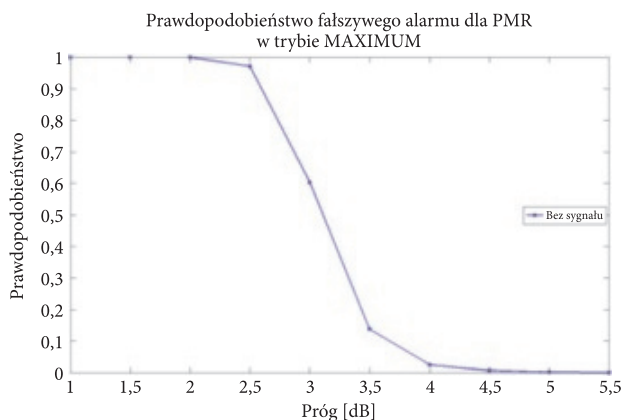
Pierwszym etapem przeprowadzenia pomiarów było wyznaczenie charakterystyki prawdopodobieństwa fałszywych alarmów. Pomiar ten został wykonany bez generacji sygnałów zgodnie z klasyczną metodą detekcji. Następnym etapem było badanie prawdopodobieństwa poprawnej detekcji przy różnych wartościach SNR i dla różnych wartości progów.

4. Wyniki testów

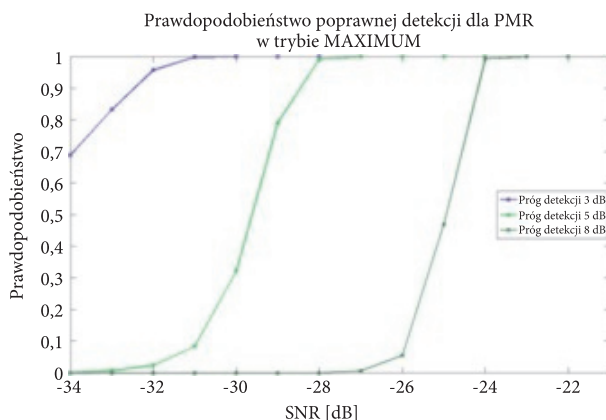
W celu określenia skuteczności efektywności poszczególnych metod detekcji zaproponowano następujące testy:

- pomiar prawdopodobieństwa fałszywego alarmu w funkcji progu detekcji dla sygnału testowego PMR i GSM w trybie MAXIMUM,
- pomiar prawdopodobieństwa poprawnej detekcji w funkcji SNR dla sygnału testowego PMR i GSM w trybie MAXIMUM przy stałym progu detekcji,
- pomiar prawdopodobieństwa fałszywego alarmu w funkcji progu detekcji dla sygnału testowego PMR i GSM w trybie CLRWRITE,
- pomiar prawdopodobieństwa poprawnej detekcji w funkcji SNR dla sygnału testowego PMR i GSM w trybie CLRWRITE przy stałym progu detekcji,

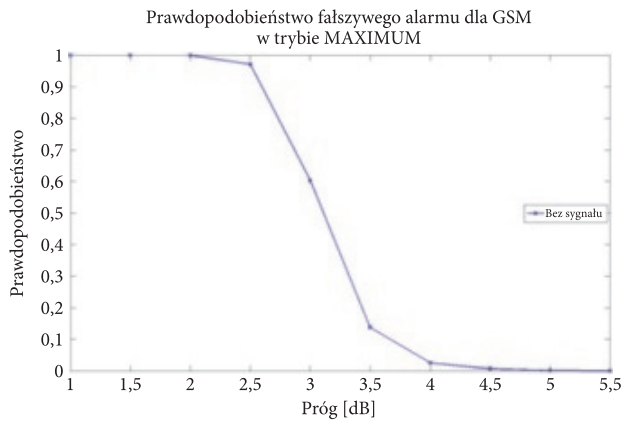
- porównanie prawdopodobieństwa fałszywego alarmu w funkcji progu detekcji dla sygnału testowego GSM w trybach CLRWRITE i MAXIMUM,
- porównanie prawdopodobieństwa poprawnej detekcji w funkcji SNR dla sygnału testowego GSM w trybie CLRWRITE i MAXIMUM przy stałym progu detekcji,
- porównanie prawdopodobieństwa poprawnej detekcji w funkcji SNR dla sygnału testowego PMR i GSM w trybie MAXIMUM przy stałym progu detekcji.



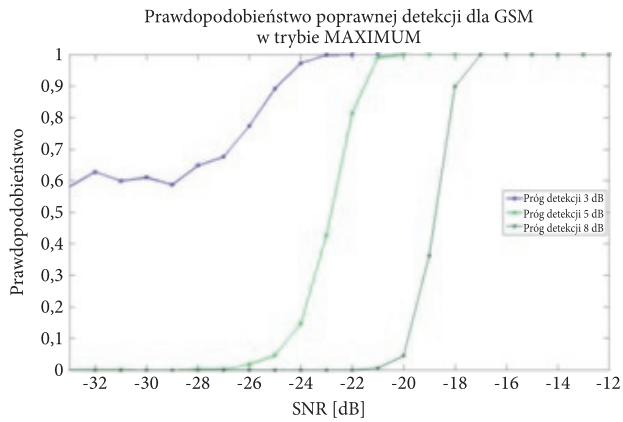
Rys. 7. Prawdopodobieństwo fałszywego alarmu dla sygnału PMR i trybu MAXIMUM



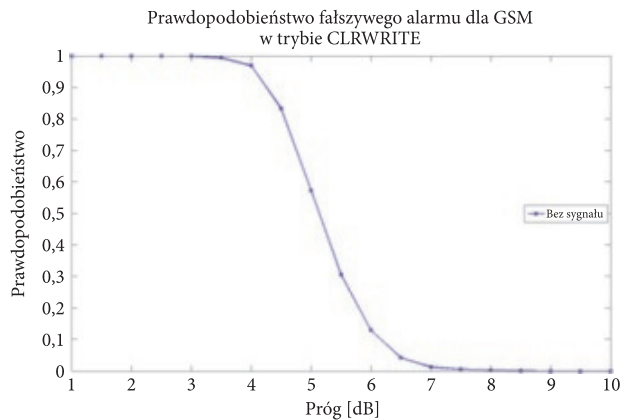
Rys. 8. Prawdopodobieństwo poprawnej detekcji dla sygnału PMR i trybu MAXIMUM



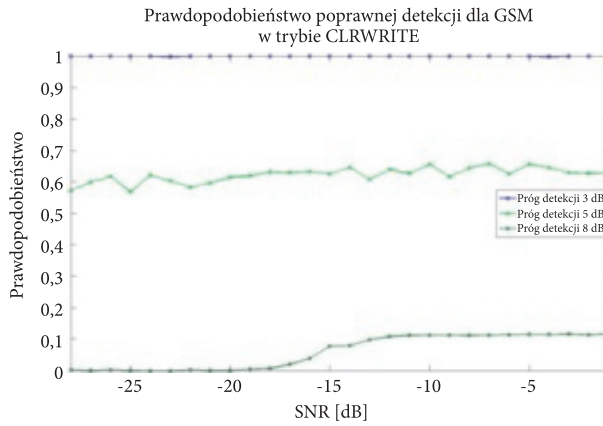
Rys. 9. Prawdopodobieństwo fałszywego alarmu dla sygnału GSM i trybu MAXIMUM



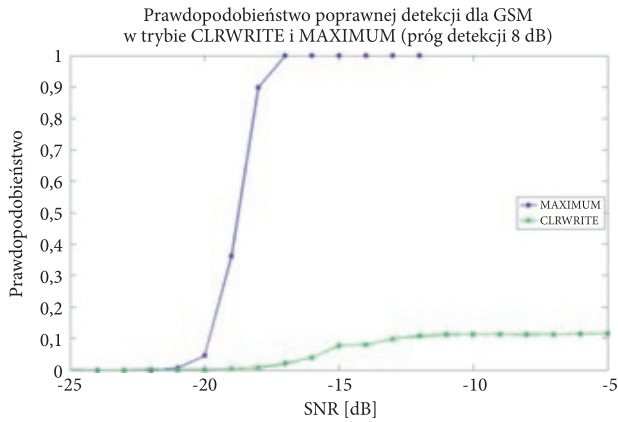
Rys. 10. Prawdopodobieństwo poprawnej detekcji dla sygnału GSM i trybu MAXIMUM



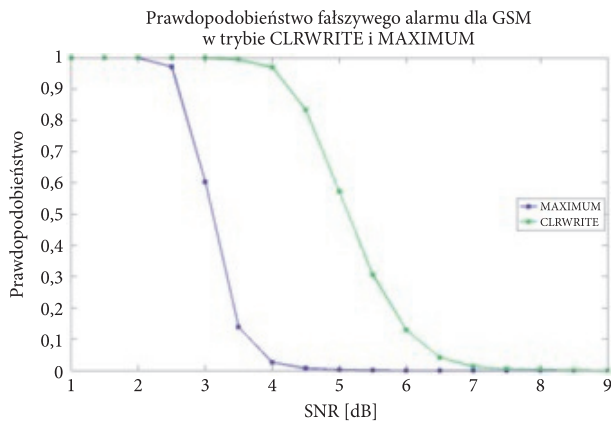
Rys. 11. Prawdopodobieństwo fałszywego alarmu dla sygnału GSM i trybu CLRWRITE



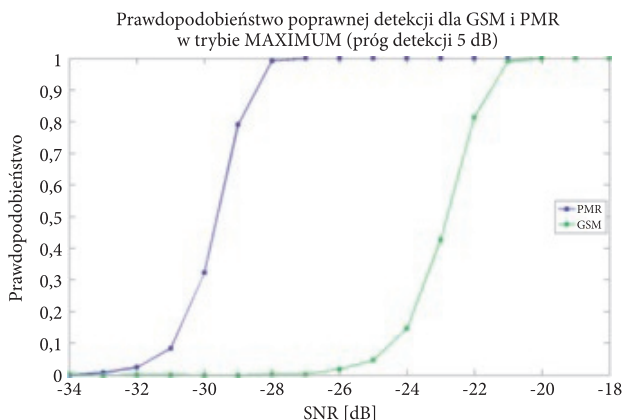
Rys. 12. Prawdopodobieństwo poprawnej detekcji dla sygnału GSM i trybu CLRWRITE



Rys. 13. Prawdopodobieństwo fałszywego alarmu dla sygnału GSM i obu testowanych trybów



Rys. 14. Prawdopodobieństwo poprawnej detekcji dla progu 8 dB



Rys. 15. Prawdopodobieństwo poprawnej detekcji dla różnych sygnałów przy progu 5 dB

5. Podsumowanie

Niniejsza praca jest częścią projektu ICAR, który zajmuje się wykorzystaniem bezałogowej platformy lądowej do wykrywania i zwalczania ładunków IED [8].

W oparciu o wykonane pomiary stwierdzono, że za pomocą opracowanego systemu detekcji można skutecznie wykrywać sygnały wyzwalające ładunki IED.

Z przeprowadzonego porównania dwóch trybów pracy wynika, że większą skuteczność detekcji posiada tryb MAXIMUM. Pozwala on wykrywać sygnały zarówno ciągłe, jak i impulsowe, co jest ważne ze względu na coraz częściej wykorzystywane pakietowe transmisje cyfrowe.

Wyznaczony próg detekcji w warunkach laboratoryjnych był wyliczony na podstawie analizy tła szumowego i energii sygnałów. Następnym etapem prac będzie przeprowadzenie testów na rzeczywistych systemach wyzwalających, w warunkach równoczesnej obecności wielu sygnałów i interferencji.

Praca zrealizowana w ramach projektu A-0935-RT-GC Intelligent Control of Adversary Radio-communications (ICAR), European Defence Agency.

LITERATURA

- [1] K. MALON, J. ŁOPATKA, *Demonstrator programowalnej stacji zakłóceń*, IX Konferencja Naukowo-Techniczna „Systemy Rozpoznania i Walki Elektronicznej”, Kazimierz Dolny, 2012.
- [2] L.E. FRANKS, *Teoria sygnałów*, 2006.
- [3] J. ŁOPATKA, *Efektywne metody identyfikacji i demodulacji wybranych sygnałów radiokomunikacyjnych*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2006.
- [4] E. ŚWIERCZ, *Zastosowanie algorytmów czas-częstotliwość w rozpoznawaniu sygnałów radiolokacyjnych*, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok, 2007.
- [5] S. MAHARJAN, K. PO, J. TAKADA, *Energy Detector Prototype for Cognitive Radio System*, IEICE Technical Report, 2007.

- [6] A. TKACHENKO, A.D. CABRIC, R.W. BRODERSEN, *Cyclostationary Feature Detector Experiments Using Reconfigurable BEE2*, Proc. IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (IEEE DySPAN), 2007.
- [7] KG, Rohde & Schwarz GmbH & Co., R & S®ESMD *Wideband Monitoring Receiver Manual*.
- [8] J. ŁOPATKA, R. CHĘCIŃSKI, A. KASZUBA, R. KRAWCZAK, *Inteligentna kontrola łączności przeciwnika z wykorzystaniem bezałogowej platformy lądowej dromader*, IX Konferencja Naukowo-Techniczna „Systemy Rozpoznania i Walki Elektronicznej”, Kazimierz Dolny, 2012.
- [9] A. KASZUBA, R. CHĘCIŃSKI, J. ŁOPATKA, *Wykorzystanie platformy radia programowalnego USRP do przechwytywania informacji o użytkownikach GSM*, IX Konferencja Naukowo-Techniczna „Systemy Rozpoznania i Walki Elektronicznej”, Kazimierz Dolny, 2012.
- [10] W. WANG, *Cognitive radio system*, In-Tech., 2009.

M. KRYK, J. ŁOPATKA

Efficient method of spectrum monitoring for detection of radio controlled IED

Abstract. During realization of current military missions, a significant increase in the Improvised Explosive Device (IED) use can be noticed. The reason of that is easy access to weapons and explosive materials, and widely accessible communication systems. In order to minimize the IED efficiency, it is necessary to develop and introduce new methods and devices for spectrum monitoring. They should provide better sensitivity, selectivity, and shorter detection time and hence the reaction time of the whole system.

Therefore the goal of this article is to propose a new method of wideband detection of radio signals. The elaborated method was then tested in laboratory conditions using designed test bench.

This work consists of 4 parts. In the first one, assumptions and the idea of the proposed scanning system are described. The method presented here consists of two components: background noise detector and energy detector.

In the next part, the proposed test bench is shown. Additionally, basic parameters of receiver are described, paying particular attention to properties of the signal spectrum calculation subsystem.

The third part contains results of the tests. These are particularly characteristics such as probability of false alarm and probability of detection depending on different modes of spectrum calculation.

The last part summarizes the results and presents the conclusions.

Keywords: telecommunication, detection algorithms, detection and jamming station

