

Specyficzna identyfikacja źródeł emisji bazująca na analizie modulacji międzyimpulsowej sygnału radiolokacyjnego

Streszczenie. Znajomość rodzaju modulacji międzyimpulsowej sygnału radarowego oraz jej analiza stanowi dystyngywną cechę wykorzystywaną w procesie Specyficznej Identyfikacji źródeł emisji tych sygnałów. Poszczególne rodzaje modulacji międzyimpulsowej zostały zilustrowane w niniejszym artykule. Analiza modulacji międzyimpulsowej umożliwiła ekstrakcję cech, które w oparciu o relacyjną bazę danych i zaimplementowany szybko-decyzyjny algorytm identyfikacji FdIA pozwoliły na rozróżnienie źródeł emisji sygnałów radarowych.

Abstract. The knowledge of type of inter-pulse modulation of radar signal and its analysis is the distinctive feature, which is used in the process of Specific Emitter Identification (SEI). The different types of inter-pulses modulation were illustrated in this article. The analysis of inter-pulses modulation enables extraction of features which being based on a relational database and implemented FdIA (Fast-decision Identification Algorithm) allowed to distinguish the emission sources of radar signals.

(Specific emitter identification based on an inter-pulses modulation of radar signal)

Słowa kluczowe: rozpoznanie elektroniczne, specyficzna identyfikacja źródeł emisji, sygnał radarowy, modulacja międzyimpulsowa.

Keywords: Electronic Intelligence (ELINT), Specific Emitter Identification, radar signal, inter-pulse modulation.

Wstęp

Rozpoznanie elektroniczne ELINT (ang. Electronic Intelligence) stanowi pasywną formę zdobywania informacji o obiektach elektronicznych (radiowych, radiolokacyjnych, telewizyjnych, laserowych i technik podczerwieni) promieniujących energię elektromagnetyczną. Obejmuje ono cały zakres widma elektromagnetycznego od fal radiowych krótkich poprzez mikrofały, podczerwień, światło widzialne aż do ultrafioletu, z wyłączeniem części widma powstającego w wyniku wybuchów jądrowych i działania produktów rozpadu promieniotwórczego [1,2,3]. W systemie rozpoznania elektronicznego wykorzystuje się różne rodzaje informacji w tym: dane z przetwarzania wstępnego (wartości średnie, odchylenia standardowe i rozkłady mierzonych parametrów sygnału radarowego, rodzaj zmian wartości parametrów sygnału), miejsce zainstalowania (łód, okręt, samolot), cechy charakterystyczne platformy oraz cechy opisujące warunki propagacji fal elektromagnetycznych, (wiatr, temperatura, opady, przeszkody terenowe) [4] oraz wszelkie dodatkowe cechy ekstrahowane z uzyskanego sygnału radarowego, będące efektem zaawansowanych analiz, które wykorzystywane są w Specyficznej Identyfikacji Emiterów SEI (ang. *Specific Emitter Identification*) [5,6,7,8,9,10]. Istota rozpoznania elektronicznego w urządzeniach klasy ESM (ang. *Electronic Support Measures*) oraz ELINT polega na tym, że klasyfikacja typów oraz identyfikacja egzemplarzy źródeł emisji elektromagnetycznej następuje wskutek porównania wyników pomiarów podstawowych parametrów sygnałów z wzorcami radarów zawartych w specjalnie do tego celu dedykowanych Bazach Danych (BD), [11,12]. Parametry opisujące radary obejmują szeroko rozumiane charakterystyki techniczne, opisy systemów i sposoby ich wykorzystania, miejsca instalacji, aktywności ich pracy lub widma pojedynczych impulsów, itp. Bazy danych o źródłach zagrożeń stanowią integralną część odbiorników ostrzegawczych o opromieniowaniu radarowym RWR (ang. *Radar Warning Receiver*), wchodzących w skład systemów samoobrony instalowanych na platformach powietrznych. Sygnały współczesnych radarów mają w większości przypadków złożoną strukturę wewnątrz-impulsową (ang. *intra-pulse structure*) oraz między-impulsową (ang. *inter-pulse structure*). Złożona struktura międzyimpulsowa sygnału radarowego obejmuje zmiany wartości okresu powtarzania impulsów, częstotliwości nośnej oraz czasu trwania impulsów [3]. Podstawowe parametry sygnału

radarowego, które odpowiadają technicznym charakterystykom radaru to częstotliwość nośna RF (ang. *Radio Frequency*), czas trwania impulsu PD (ang. *Pulse Duration*), okres powtarzania impulsów PRI (ang. *Pulse Repetition Interval*), kąt przybycia (odbioru) sygnału AoA (ang. *Angle of Arrival*), moc sygnału, polaryzacja sygnału, szerokość wiązki, poziom listków bocznych, rodzaj i szybkość skanowania przestrzeni wiązką antenową SP (ang. *Scan Period*).

Analiza modulacji międzyimpulsowej

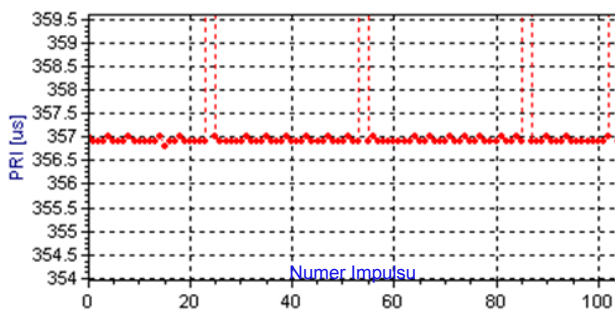
Główne zadanie przedstawione w niniejszym artykule polegało na akwizycji oraz pomiarze sygnałów radarowych pochodzących od kilkudziesięciu typów radarów różnego przeznaczenia. Następnie w procesie wstępnej selekcji i redukcji danych pomiarowych dokonano procesu ekstrakcji cech dystyngywnych w postaci wektorów danych pomiarowych. W dalszej kolejności, w wyniku identyfikacji źródła emisji zostały uruchomione procesy porównania uzyskanych wektorów sygnałowych z wzorcami w bazie danych. Autorzy artykułu pragną zwrócić uwagę na fakt, iż opisywany proces rozpoznania i identyfikacji źródeł emisji jest bardzo złożonym zagadnieniem, gdzie szereg aspektów takich jak: opracowanie bazy danych, metody tworzenia wzorca, proces klasyfikacji i identyfikacji, zastosowane kryteria, metody obliczania współczynnika poprawnej identyfikacji, posiadają swe odniesienia literaturowe, które również były publikowane przez autorów niniejszej pracy [2,13,14,15,16,17].

Modulacja międzyimpulsowa okresu powtarzania impulsów (ang. *inter-pulse repetition interval*) oznacza modulację między kolejnymi impulsami w sygnale radarowym. Określa się ją na podstawie czasów przyścia impulsów, przy czym można wyróżnić następujące jej typy: stały okres powtarzania impulsów (ang. *PRI Fixed*), płynnie zmienny okres powtarzania impulsów (ang. *PRI Sliding*), zatrzymany i przełączany okres powtarzania impulsów (ang. *PRI Dwell and Switch*), przemienny okres powtarzania impulsów (ang. *PRI Stagger*) oraz fluktuujący okres powtarzania impulsów (ang. *PRI Jitter*) [3,4]. Zobrazowania poszczególnych rodzajów modulacji międzyimpulsowej otrzymane z rzeczywistych pomiarów parametrów sygnału wybranych typów radarów o różnym przeznaczeniu, przedstawione zostały na Rys. 1-10. Na osi poziomej każdego z tych rysunków zaznaczone zostały numery kolejno odbieranych impulsów w systemie rozpoznania

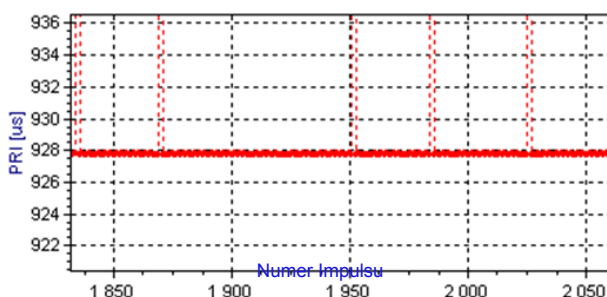
elektronicznego natomiast na osi pionowej wartości PRI sygnału radarowego. W podpisach do ww. rysunków PRI_L oznacza wartość minimalną PRI, PRI_M - wartość średnią PRI, natomiast PRI_H - wartość maksymalną okresu powtarzania impulsów wyrażoną w mikrosekundach.

Stały PRI

PRI *Fixed* występuje wówczas, gdy w sygnale radarowym relacje czasowe opisuje jedna, stała i stabilna wartość. Małą wartość PRI stosuje się wówczas, gdy radar ma zapewnić jednoznaczny, szybki i precyzyjny pomiar prędkości obiektu, a więc przede wszystkim w radarach samolotów bojowych (radarach wielofunkcyjnych) oraz w precyzyjnych radarach naprowadzania. Najmniejszymi wartościami PRI charakteryzują się radary zestawów rakietowych i morskie radary nawigacyjne, a największymi radary meteorologiczne oraz pokładowe i naziemne systemy ostrzegania. Większe wartości PRI mają zastosowanie w pokładowych wielofunkcyjnych radarach samolotów bojowych i okrętów. Zazwyczaj wartości PRI są wielokrotnościami wartości minimalnej, a ich zmiany dokonywane są łącznie ze zmianami czasu trwania impulsu i okresu obrotu anteny. Przykładowe zobrazowania PRI *Fixed* zostały przedstawione na Rys.1 i 2.



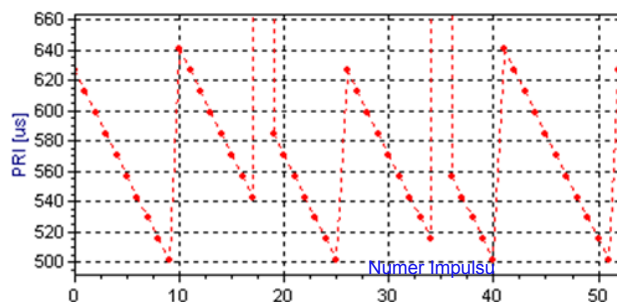
Rys.1. Modulacja PRI *Fixed* – radar zestawu rakietowego ($PRI_M=356.92 \mu s$, $PD = 0.44 \mu s$, $RF = 7047 \text{ MHz}$)



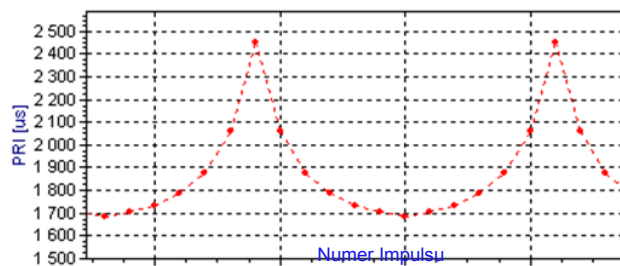
Rys.2. Modulacja PRI *Fixed* – radar wykrywania obiektów nawodnych ($PRI_M=927.71 \mu s$, $PD = 0.25 \mu s$, $RF = 9354 \text{ MHz}$)

Płynnie zmienny PRI

PRI *Sliding* oznacza ciąg impulsów, który zmienia się monotonicznie według określonej funkcji między wartościami minimalną i maksymalną. Płynnie zmienny PRI może być stosowany do eliminacji ślepych zasięgów i optymalizacji przeszukiwania w elewacji, zapewniając stałą wysokość pokrycia w śledzeniu radarów. Zazwyczaj przedział zmian PRI jest niewielki (rzędu od kilku do kilkudziesięciu mikrosekund). Tego typu modulacje można spotkać w sygnałach generowanych przez radary zestawów rakietowych, morskich radarów nawigacyjnych, wysokościomierzy pokładowych i w okrętowych radarach wykrywania. Na Rys. 3-4 zostały przedstawione zobrazowania graficzne, na podstawie danych pomiarowych sygnałów generowanych przez radary o różnym przeznaczeniu i różnych postaciach zmian PRI *Sliding*.



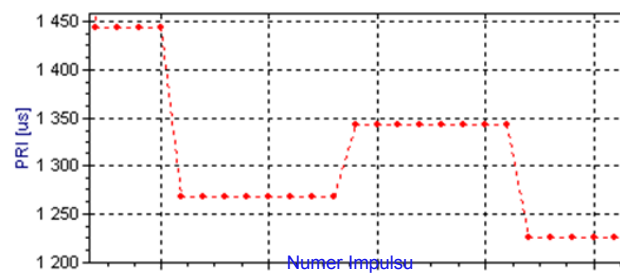
Rys.3. Modulacja PRI typu *Sliding* liniowy - okrętowy radar wykrywania ($PRI_L=500.41 \mu s$, $PRI_H=640.86 \mu s$, $PD = 2.43 \mu s$, $RF = 2794 \text{ MHz}$)



Rys.4. Modulacja PRI *Sliding* nieliniowy – wysokościomierz lądowy ($PRI_L=1679.94 \mu s$, $PRI_H=2449.98 \mu s$, $PD= 8.70 \mu s$, $RF=3249 \text{ MHz}$)

Zatrzymany i przełączany PRI

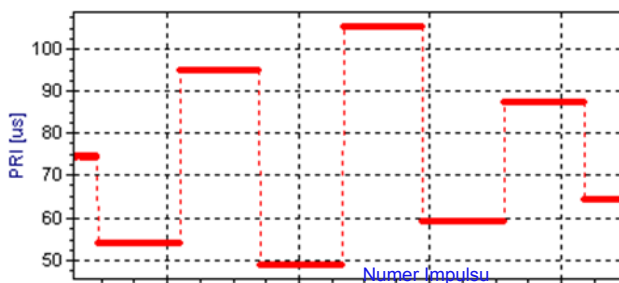
PRI *Dwell and Switch* wskazuje, że radar jest zdolny do transmisji zaprogramowanej sekwencji impulsów. Ten rodzaj modulacji może być użyty w impulsowym radarze dopplerowskim śledzącym. Wyróżnia się dwa rodzaje modulacji PRI typu *Dwell* and *Switch*: z zerowym czasem przełączania oraz z niezerowym czasem przełączania. Modulacja PRI *Dwell and Switch* z zerowym czasem przełączania to modulacja okresowa, której istota polega na przełączaniu, co zadane przedziały czasu, w odpowiedniej kolejności ustalonych wartości PRI. Minimalna liczba wykorzystywanych w tej modulacji stałych wartości PRI wynosi dwa, a maksymalna nie powinna przekraczać kilkunastu. Czas generacji sygnału dla jednej z ustalonych wartości PRI nazwano czasem zatrzymania. Ciąg podstawowy obejmuje wszystkie impulsy zawarte w pełnym zakresie zmian PRI. Czas generacji ciągu podstawowego nazywa się całkowitym czasem zatrzymania. Modulacja PRI *Dwell and Switch* z niezerowym czasem przełączania różni się od poprzedniego tym, że końcowym elementem przynajmniej jednego zatrzymania (zazwyczaj wszystkich zatrzymań) jest wartość okresu PRI różna (zazwyczaj większa) niż wartość okresu PRI powtarzająca się w danym „zatrzymaniu”.



Rys.5. Modulacja PRI *Dwell and Switch* – radar wykrywania obiektów powietrznych ($PRI_1 = 1268.06 \mu s$, $PRI_2 = 1342.82 \mu s$, $PRI_3 = 1225.34 \mu s$, $PRI_4 = 1444.25 \mu s$, $PD = 2.96 \mu s$, $RF = 2955 \text{ MHz}$)

Modulację PRI *Dwell and Switch* stosuje się w wielofunkcyjnych radarach samolotów bojowych oraz

radarach kierowania w celu uzyskania jednoznacznego i dokładnego pomiaru odległości do obiektu oraz jego prędkości. Modulację tę stosuje się również w radarach wykrywania obiektów powietrznych (2D, wysokościamiernych), gdzie występują typowo cztery zatrzymania, a liczba impulsów w jednym „zatrzymaniu” wynosi od kilku do kilkudziesięciu. Odmianą tego typu modulacji jest modulacja polegająca na przełączaniu jednego z dwóch stałych okresów PRI co kolejny obrót anteny. Zobrazowania modulacji PRI *Dwell and Switch* dla przykładowych dwóch typów radarów przedstawiono na Rys. 5-6.

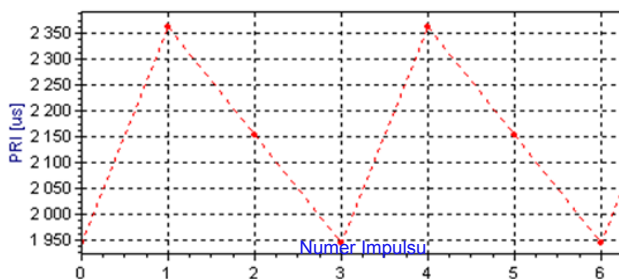


Rys.6. Modułacja PRI *Dwell and Switch* – radar wielofunkcyjny samolotu bojowego ($PRI_{1-9} = 58.94, 87.12, 64.06, 79.44, 74.31, 53.81, 94.81, 48.69, 105.06$ [μs], $PD = 3.39$ μs, $RF = 9621$ MHz)

Przemienne PRI

PRI *Stagger* jest najwcześniej stosowanym sposobem modulacji międzyimpulsowej w strukturze czasowej sygnału radarowego. Zmiany PRI *Stagger* stosuje się w sygnałach radarów o krótkim (radary systemów raketowych, morskie radary nawigacyjne), średnim (radary wykrywania obiektów nawodnych, radary kierowania ruchem lotniczym) oraz dalekim i bardzo dalekim zasięgu wykrywania (lądowe i morskie radary wykrywania obiektów powietrznych, pokładowe radary systemów ostrzegania). Można wyróżnić trzy rodzaje zmian PRI *Stagger*:

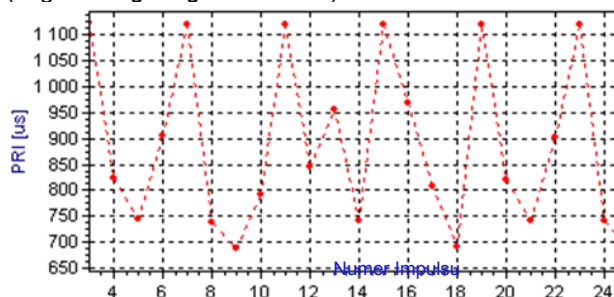
- *Stagger Regular* – n pozycyjny ciąg podstawowy składa z n elementów (n różnych wartości okresu PRI), $n \geq 2$. Ponadto wymaga się, aby różnica pomiędzy kolejnymi, ustalonymi wg rosnącej wartości, okresami PRI była stała;
- *Stagger Irregular* – n pozycyjny ciąg podstawowy składa z n elementów (n różnych wartości okresu PRI), $n \geq 2$;
- *Stagger Complex* – n pozycyjny ciąg podstawowy składa z k elementów (k różnych wartości PRI), $n > k, k \geq 2$. Oznacza to, że co najmniej jeden element (jedna wartość PRI) powtarza się w ciągu podstawowym co najmniej dwa razy.



Rys.7. Modułacja PRI *Stagger Regular* - radar wykrywania obiektów powietrznych ($PRI_{1-3} = 1944.69, 2153.69, 2362.72$ μs, $PD = 2.7$ μs, $RF = 1330$ MHz)

Zazwyczaj liczba elementów zastosowanych w strukturze *Stagger* nie przekracza 32. Najliczniejszą i najbardziej różnorodną reprezentację zmian typu *Stagger* prezentują sygnały generowane przez morskie radary nawigacyjne oraz radary kierowania ruchem lotniczym. Na Rys. 7-8 zostały przedstawione prezentacje różnych postaci zmian

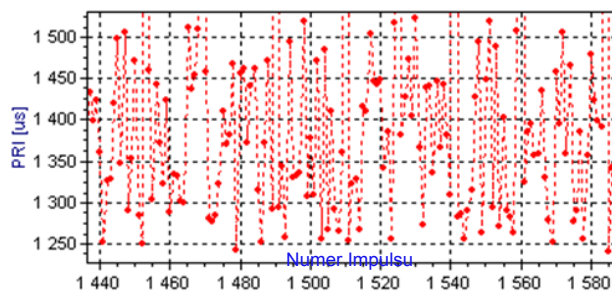
PRI *Stagger*. Przemienne okres powtarzania impulsów oznacza serię impulsów, w której dwa (lub więcej) dokładnie ustalone odstępy międzyimpulsowe zmieniają się w ustalonej kolejności. Taka sekwencja jest opisana liczbą pozycji lub przedziałów użytych do tworzenia sekwencji i liczbą różnych przedziałów. Wewnątrz sekwencji przedział dyskretny (przedziały dyskretne) może być użyty więcej niż jeden raz. Przemienne PRI używa się w celu zwiększenia maksymalnego zasięgu niejednoznaczności radaru oraz do eliminacji prędkości ślepych w systemach radarowych MTI (ang. *Moving Target Indication*).



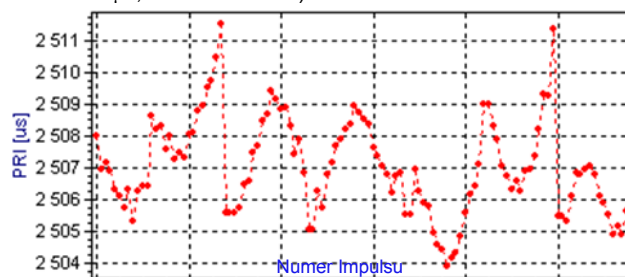
Rys.8. Modułacja PRI *Stagger Complex* - radar wykrywania obiektów powietrznych i nawodnych ($PRI_{1-25} = 687.99, 689.38, \dots, 1117.74$ [μs], $PD = 17.66$ μs, $RF = 5583$ MHz)

Fluktuujący PRI

PRI *Jitter* dzieli się na losowy dyskretny (ang. *Jitter Discrete*) oraz losowy ciągły (ang. *Jitter Continuous*). Modulacje PRI *Jitter Discrete* wskazują, że przedział zmian okresu PRI jest szeroki lub bardzo szeroki (od kilkunastu do kilkuset mikrosekund) i charakteryzuje go kilka do kilkadziesiąt (kilkaset) stabilnych wartości PRI. Modulacje PRI *Jitter Continuous* wskazują, że przedział zmian okresu PRI jest wąski (kilka do kilkanaście mikrosekund) i można go opisać jedną wartością PRI. Zmiany PRI *Jitter* typu ciągłego są charakterystyczne dla najstarszych generacji radarów natomiast *Jitter* dyskretny stosowany jest w nowoczesnych radarach przeznaczonych do wykrywania obiektów oraz naprowadzania własnych, aktywnych środków walki. Zobrazowania graficzne zmian PRI *Jitter* typu dyskretnego i ciągłego zostały przedstawione na Rys. 9-10.



Rys.9. Modułacja PRI *Jitter* dyskretny – radar wielofunkcyjny samolotu bojowego ($PRI_L = 1240.70$ μs, $PRI_H = 1525.18$ μs, $PD = 30.03$ μs, $RF = 16949$ MHz)



Rys.10. Modułacja sinusoidalną PRI *Jitter* ciągły – pokładowy radar wykrywania ($PRI_L = 2504.98$ μs, $PRI_H = 2509.58$ μs, $PD = 3.87$ μs, $RF = 9372$ MHz)

Uzyskane wyniki analizy

Na podstawie dokonanych pomiarów sygnałów radarowych został utworzony wektor sygnałowy \mathbf{WS} , którego pola zawierają określone parametry częstotliwościowe i czasowe sygnału radarowego, zgodnie z zależnością (1), gdzie \mathbf{WS}^{PRI} stanowi wektor parametrów czasowych zgodnie ze wzorem (2), \mathbf{WS}^{RF} stanowi wektor parametrów częstotliwościowych zgodnie ze wzorem (3), natomiast sigRF , sigPRI oraz sigPD oznaczają odpowiednio informacje o dokładnościach pomiaru częstotliwości nośnej, okresu powtarzania impulsów oraz czasu trwania impulsu. Parametry te, są podstawą do określania szerokości przedziałów dopuszczalnych zmian parametrów sygnału radarowego, tj.: RF , PRI oraz PD w zastosowanym szybko-decyzyjny algorytmie identyfikacji FdIA (ang. *Fast-decision Identification Algorithm*) [13]. Algorytm ten został wykorzystany w procesie „kojarzenia” uzyskanych wyników pomiarowych z wzorcami w relacyjnej bazie danych.

$$(1) \quad \mathbf{WS} = [\mathbf{WS}^{\text{PRI}}, \mathbf{WS}^{\text{RF}}, \mathbf{WS}^{\text{PD}}, \text{sigRF}, \text{sigPRI}, \text{sigPD}]$$

$$(2) \quad \mathbf{WS}^{\text{PRI}} = [PRI_M^F, PRI_{L,H}^S, PRI_{1+k}^{D\&S}, nPRI^{D\&S}, \dots, \dots, PRI_{1+k}^{Stg}, nPRI^{Stg}, PRI_{L,H}^J]$$

$$(3) \quad \mathbf{WS}^{\text{RF}} = [RF^F, RF^S, RF^{D\&S}, RF^{Stg}, RF^J]$$

$$(4) \quad \mathbf{WS}^{\text{PD}} = [PD^F, PD^S, PD^{D\&S}, PD^{Stg}, PD^J]$$

Parametry czasowe wektora \mathbf{WS}^{PRI} zgodnie ze wzorem (2) oznaczają odpowiednio: stały okres powtarzania impulsów PRI_M^F , płynnie zmienny okres powtarzania impulsów $PRI_{L,H}^S$ wraz z jego wartością maksymalną PRI_H^S i minimalną PRI_L^S , zatrzymany i przełączany okres powtarzania impulsów $PRI_{1+k}^{D\&S}$ wraz z poszczególnymi wartościami od $1+k$ oraz liczbą wartości $nPRI^{D\&S}$, przemienny okres powtarzania impulsów PRI_{1+k}^{Stg} wraz z poszczególnymi wartościami od $1+k$ oraz liczbą wartości $nPRI^{Stg}$ oraz fluktuujący okres powtarzania impulsów $PRI_{L,H}^J$ wraz z jego wartością maksymalną PRI_H^J i minimalną PRI_L^J . Parametry częstotliwościowe wektora \mathbf{WS}^{RF} zgodnie ze wzorem (3) oznaczają odpowiednio: wartość średnią częstotliwości nośnej RF^F stałego okresu powtarzania impulsów, wartość średnią częstotliwości nośnej RF^S płynnie zmiennego okresu powtarzania impulsów, wartość średnią częstotliwości nośnej $RF^{D\&S}$ zatrzymanego i przełączanego okresu powtarzania impulsów, wartość średnią częstotliwości nośnej RF^{Stg} przemiennego okresu powtarzania impulsów, wartość średnią częstotliwości nośnej RF^J fluktuującego okresu powtarzania impulsów. Parametry czasowe wektora \mathbf{WS}^{PD} zgodnie ze wzorem (4) oznaczają odpowiednio: wartość średnią czasu trwania impulsu PD^F stałego okresu powtarzania impulsów, wartość średnią czasu trwania impulsu PD^S płynnie zmiennego okresu powtarzania impulsów, wartość średnią

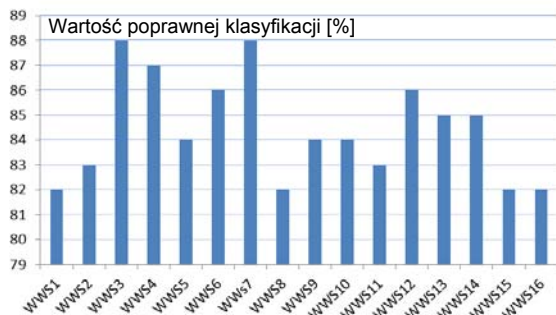
czasu trwania impulsu $PD^{D\&S}$ zatrzymanego i przełączanego okresu powtarzania impulsów, wartość średnią czasu trwania impulsu PD^{Stg} przemiennego okresu powtarzania impulsów, wartość średnią czasu trwania impulsu PD^J fluktuującego okresu powtarzania impulsów.

W wyniku procedury identyfikacji otrzymano wynikowy wektor sygnałowy \mathbf{WWS} zgodnie ze wzorem (5), który zawiera liczbę wzorców P_N skojarzonych z wektorem \mathbf{WS} , dla których wartość funkcji decyzyjnej K_{ij} jest większa od zera, (tj.: $K_{ij} > 0$), numer egzemplarza wzorca nP_N dla którego $K_{ij} = \max$, wartość maksymalną funkcji decyzyjnej $K_{ij \max}$, wektor wzorcowych parametrów czasowych \mathbf{PV}^{PRI} oraz \mathbf{PV}^{PD} i wektor wzorcowych parametrów częstotliwościowych \mathbf{PV}^{RF} dla których $K_{ij} = \max$. Funkcja decyzyjna K_{ij} służy do oceny stopnia podobieństwa i -tego wektora \mathbf{WS} do j -tego wzorca znajdującego się w bazie danych [13].

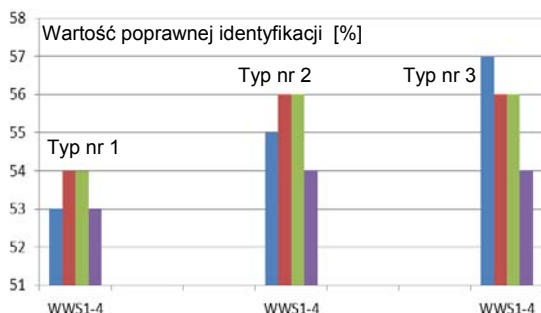
$$(5) \quad \mathbf{WWS} = \left[P_N \Big|_{\text{dla } K_{ij} > 0}, nP_N \Big|_{\text{dla } K_{ij} = \max}, K_{ij \max}, \dots, \dots, \mathbf{PV}^{\text{PRI}} \Big|_{\text{dla } K_{ij} = \max}, \mathbf{PV}^{\text{PD}} \Big|_{\text{dla } K_{ij} = \max}, \mathbf{PV}^{\text{RF}} \Big|_{\text{dla } K_{ij} = \max} \right]$$

Proces identyfikacji został przeprowadzony przy wykorzystaniu relacyjnej bazy danych, zaprojektowanej przez autorów artykułu przy wykorzystaniu modelowania związków encji ERD (ang. *Entity Relationship Diagrams*) [18,19,20,21]. W wyniku procedury identyfikacji otrzymano wynikowy wektor sygnałowy, który zawierał liczbę wzorców skojarzonych z wektorem sygnałowym, dla predefiniowanych wartości funkcji decyzyjnej. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń uzyskano ocenę zgodności wektora \mathbf{WS} z wzorcem w bazie danych w przedziale 82÷88 dla klasyfikacji typów radarów oraz wartość w przedziale 53÷57 dla identyfikacji egzemplarzy tego samego typu radaru. Uzyskane rezultaty na poziomie 82÷88% poprawnej klasyfikacji dla 16 różnych typów radarów można uznać za wynik zadawalający. Graficzne zobrazowanie uzyskanych wyników zostało przedstawione na Rys.11. Uzyskane wyniki w procesie identyfikacji kilkunastu egzemplarzy spośród trzech różnych typów radarów nie są w pełni zadawalające, bowiem uzyskana wartość poprawnej identyfikacji zawiera się w przedziale 53÷57%. Graficzne zobrazowanie uzyskanych wyników zostało przedstawione na Rys.12, na którym odpowiednimi kolorami przedstawiono dwanaście egzemplarzy spośród trzech różnych typów radarów (po 4 egzemplarze w każdym typie).

Należy zaznaczyć, że każdy z estymowanych parametrów RF, PRI oraz PD posiadały tę samą wagę, co uniemożliwiło ocenę wpływu poszczególnych parametrów na procedurę identyfikacji. Modyfikacja algorytmu FdIA w aspekcie definicji wag oraz ich wpływu na proces specyficznej identyfikacji SEI w odniesieniu do uzyskanych struktur wektorów sygnałowych $\mathbf{WS}(\mathbf{WS}^{\text{PRI}}, \mathbf{WS}^{\text{RF}}, \mathbf{WS}^{\text{PD}})$ będzie kolejnym obszarem prac autorów niniejszego artykułu. Należy przypuszczać, że przyczyni się ona do zwiększenia prawdopodobieństwa poprawnej identyfikacji poszczególnych egzemplarzy tego samego typu radaru.



Rys. 11. Zobrazowanie graficzne wyników poprawnej klasyfikacji dla 16 różnych typów radarów (WWS1+WWS16)



Rys. 12. Zobrazowanie graficzne wyników poprawnej identyfikacji dla 12 egzemplarzy radarów spośród 3 różnych typów

Podsumowanie

Z przeprowadzonej analizy technicznej parametrów sygnałów radarowych wynika, że jednoznaczne rozróżnienie ich źródła emisji co do egzemplarza na podstawie standardowych parametrów w wielu przypadkach jest niemożliwe. W konsekwencji działania algorytmu FdIA obliczone zostały postaci wyników wektorów sygnałowych WSS, które utworzyły nowe rekordy w bazie danych. Jest to bardzo cenna informacja o rozpoznawanych źródłach emisji, która w dalszym procesie optymalizacji procesu identyfikacji przyczyni się do jego usprawnienia oraz zwiększenia efektywności działania samej bazy danych ELINT.

Analiza właściwości sygnałów radarowych pod kątem modulacji międzyimpulsowej wymaga stałych i systematycznych pomiarów ich rzeczywistych parametrów. Bazy danych o źródłach zagrożeń stanowią integralną część odbiorników ostrzegawczych o opromieniowaniu radarowym RWR wchodzących w skład systemów walki elektronicznej na platformach powietrznych.

Autorzy: dr inż. Janusz Dudczyk, WB Electronics S.A., ul. Poznańska 129/133, 05-850 Ożarów Mazowiecki, E-mail: j.dudczyk@wb.com.pl; dr inż. Jan Matuszewski, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Radioelektroniki, Wydział Elektroniki, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: jan.matuszewski@wat.edu.pl. prof. dr hab. inż. Adam Kawalec, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Radioelektroniki, Wydział Elektroniki, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: adam.kawalec@wat.edu.pl

LITERATURA

- [1] Adamy L. D., EW 102, A Second Course in Electronic Warfare. Artech House (2004)
- [2] Gini F., Rangaswamy M., Knowledge-based radar detection, tracking, and classification. John Wiley & Sons., Inc. USA, (2008)
- [3] Willey R. G., Electronic Intelligence: The Analysis of Radar Signals. Second Edition. Artech House. Boston, London (1993)
- [4] Matuszewski J., The Specific Radar Signature in Electronic Recognition System, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), n.7, 236-239.
- [5] Dudczyk J., Kawalec A., Identification of emitter sources in the aspect of their fractal features, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* 61 (2012), n.3, 623-628
- [6] Dudczyk J., Kawalec A., Fractal Features of Specific Emitter Identification, *Acta Physica Polonica A*. 124 (2013), n.3, 406-409
- [7] Dudczyk J., Kawalec A., Wykorzystanie cech fraktalnych ekstrahowanych z sygnałów radarowych w procesie specyficznej identyfikacji, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), n.11, 212-215
- [8] Dudczyk J., Kawalec A., Specific emitter identification based on graphical representation of the distribution of radar signal parameters, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, 63 (2015), n.2, 391-396
- [9] Liu M.W., Doherty J.F., Specific Emitter Identification using Nonlinear Device Estimation, *Proc. Sarnoff Symposium IEEE*, New Jersey, (2008), 1-5
- [10] Talbot K.I., Duley P.R., Hyatt M.H., Specific Emitter Identification and Verification, *Technology Review J.*, Spring/Summer, (2003), 113-133
- [11] Matuszewski J., Metryka radaru w bazie danych systemu rozpoznania elektronicznego, *Biuletyn WAT*, 61 (2012), n.2, 137-152.
- [12] Matuszewski J., The Radar Signature in Recognition System Database, *Proc 19th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON-2012*, 2, (2012) 617-622.
- [13] Dudczyk J., Kawalec A., Fast-decision identification algorithm of emission source pattern in database. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, 63 (2015), n.2, 385-389
- [14] Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G., Pattern Classification. Second Edition. John Wiley & Sons, New York (2000)
- [15] Fukunaga K., Introduction to Statistical Pattern Recognition. Second Edition. Academic Press, New York (1990)
- [16] Tadeusiewicz R., Flasiński M., Rozpoznawanie obrazów, PWN, Warszawa (1991)
- [17] Matuszewski J., Metody tworzenia wzorców klasy dla celów rozpoznawania źródeł emisji, *Przegląd Elektrotechniczny*, 84 (2008), n.5, 104-108
- [18] Roe J., Cussons S. Felthman A., Knowledge-based Signal Processing for Radar ESM Systems, *IEEE Proc.* 137 (5), 293-301 (1990).
- [19] Dudczyk J., Ph.D. Thesis, Faculties Telecommunication, Univ. of Tech., Warsaw (2004).
- [20] Kolahi S., Libkin L., An information-theoretic analysis of worst-case redundancy in database design, *Journal ACM Transactions on Database Systems*, 35 (2010), n.1
- [21] Teorey T.J., Yang D., Fry J.P., A logical design methodology for relational databases using the extended entity-relationship model, *Journal ACM Computing Surveys* 18 (1986), n.2, 197-222