



Wybrane aspekty przetwarzania danych pomiarowych w urządzeniach walki radioelektronicznej

KAZIMIERZ BANASIAK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Radioelektroniki,
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, kazimierz.banasiak@wat.edu.pl

Streszczenie. Walka radioelektroniczna WRE (ang. EW — *Electronic Warfare*) jest zamierzonym działaniem opartym na wykorzystaniu widma elektromagnetycznego i obejmuje:

- przechwyt i identyfikację emisji elektromagnetycznych,
- zmniejszenie skuteczności działań urządzeń elektronicznych przeciwnika,
- zapewnienie efektywnego wykorzystania widma przez siły własne.

Zadaniem WRE w czasie pokoju jest zdobywanie informacji o środkach radioelektronicznych, a szczególnie o radarach. Realizują to urządzenia i systemy ELINT (ang. *Electronic Intelligence*) i/lub ESM (ang. *Electronic Warfare Support Measures*). Pracują one pasywnie w paśmie 0,5÷18 GHz, są trudne do wykrycia, a dostarczana przez nie informacja umożliwia ocenę zagrożenia sił własnych i podjęcie właściwego przeciwdziałania. Rozpoznawanie radarów impulsowych to proces, w którym można wyróżnić kilka etapów. Pierwszy etap to pomiary parametrów odbieranych ciągów impulsów, ich grupowanie w paczki oraz zobrazowanie. Pomiary są reprezentowane wektorami pomiarowymi zawierającymi parametry ciągów impulsów, a wśród nich z dokładnością nanosekundową czasy przyjscia impulsów TOA (ang. *Time of Arrival*). Następny etap to sortowanie i rozplatanie (ang. *signal sorting, deinterleaving*), czyli kojarzenie paczek impulsów ze źródłami logicznymi w celu uzyskania bardziej licznych ciągów danych powiązanych ze źródłami emisji (ZE). Kolejny etap to estymacja parametrów wektorów (deskryptorów) sygnałowych WS wykrytych ZE. Końcowym etapem przetwarzania danych jest porównanie uzyskanych parametrów WS z wzorcami sygnałów bazy danych (BD). Pozwala to na podjęcie decyzji o wyniku rozpoznania i wnioskowanie o stopniu zagrożenia, wynikającym z wykrycia pracy danego radaru. Rozpoznanie radaru wymaga precyzyjnego określenia wielu parametrów jego sygnału. Dla radarów pracujących impulsowo ważnymi parametrami są okres powtarzania impulsów PRI (ang. *Pulse Repetition Interval*) oraz rodzaj modulacji PRI. Radary charakteryzuje duża złożoność zmian PRI, a to zapewnia dużą przydatność informacyjną i daje możliwość rozróżniania nawet egzemplarzy radarów i zmian ich lokalizacji. Pozwala to na wykrycie i pełną identyfikację obiektów (nosicieli) wykorzystujących radary (np. okrętów, samolotów) bez ich widzialności oraz na ocenę zamiaru ich działania. Do podstawowych modulacji PRI należą zmiany: przemienne (ang. *stagger*),

skokowe przełączane (ang. *dwell and switch*), fluktuujące (ang. *jitter*) lub płynne programowane (ang. *sliding*). Niestety odbierane ciągi impulsów są w różnym stopniu zniekształcone. Utrudnia to proces estymacji parametrów WS — szczególnie w trybie automatycznym. Występujące zakłócenia mogą wynikać z relacji energetycznych, zmian częstotliwości w sygnałach lub mogą też być wynikiem zmieszania ciągów impulsów różnych źródeł. W wielu sygnałach, niezależnie od modulacji PRI, zmiany PRI mogą mieć charakter okresowy, trudny do zidentyfikowania w warunkach zakłóceń. W literaturze poświęca się dużo uwagi analizie PRI. Metody są często złożone obliczeniowo i mają ograniczenia. W artykule przedstawiono wykrywanie cyklu z zastosowaniem metody histogramowej oraz autorski algorytm ASWC (algorytm sekwencyjnego wykrywania cyklu PRI), o relatywnie małej złożoności obliczeniowej. Wskazano również przykładowe wyniki badań potwierdzające jego wysoką skuteczność w automatycznej analizie PRI, wykonywanej w warunkach intensywnych zakłóceń.

Słowa kluczowe: radary, walka radioelektroniczna, rozpoznawanie radarów, ELINT, ESM, deskryptor impulsu, PRI

DOI: 10.5604/01.3001.0054.6451

1. Wprowadzenie

Współczesne wojska wykorzystują różnorodne urządzenia emitujące energię elektromagnetyczną i pracujące w szerokim zakresie częstotliwości. Szczególnie ważne są urządzenia radiolokacyjne związane z kierowaniem uzbrojeniem, które mogą skutecznie wspierać obronę wojsk przeciwnika oraz jego działania ofensywne. Radary wykorzystują zakres mikrofalowy (0,5÷18 GHz) częstotliwości (rys. 1).

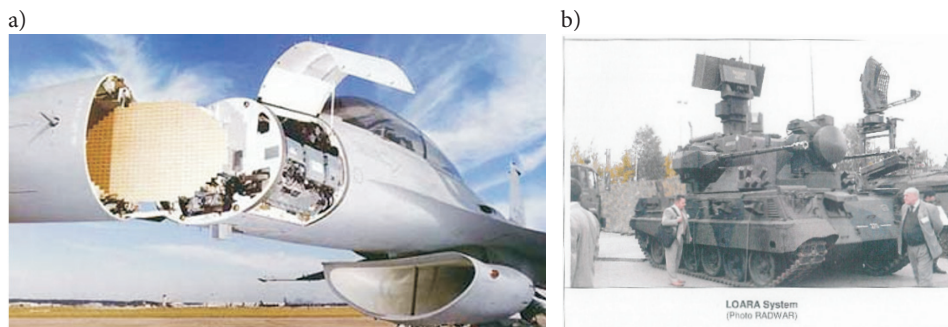
Tabela oznaczeń częstotliwości

Częstotliwość [GHz]	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,50,60,75	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30	40	50	60	70	100		
Wcześniejsze oznaczenia pasm (jeszcze używane)	VHF		UHF				L	S	C			X	K _a	K	K _a	milimetry									
Oznaczenia pasm (podczas II wojny)	P		L				S	X			K	Q		V											
Oznaczenia amerykańskie	RG 202/U		RG 204/U		RG 69/U		RG 112/U		RG 51/U		RG 92/U		RG 99/U												
Aktualne oznaczenia pasm	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M												
Długość fali [cm]	300	200	150	100	75	60	50	40	30	20	15	10	7,5	6	5	3,75	3	2	1,5	1	0,750	0,6	0,5	0,4	0,3
Długość fali λ [dB/metr]	4,8	3,0	0	-3,0	-7,0	-10,0	-13,0	-17,0	-20,0	-23,0	-25,2														

Rys. 1. Podział i oznaczenia pasm widma częstotliwości

Źródło: opracowano na podstawie materiałów firmy Lockheed Martin Company

Przykłady mobilnych radarów samolotu F-16 i kierowania ogniem systemu Loara przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. a) Radar pokładowy samolotu oraz b) mobilnego systemu obrony przeciwlotniczej

Źródło: a) prospekt firmy Terma, <https://www.terma.com/markets/air/electronic-warfare/>;
b) materiały producenta, firmy Radwar

Szerokie zastosowanie radarów wymusza potrzebę uprzedzającego wykrywania ich pracy oraz precyzyjnej identyfikacji, przeznaczenia i lokalizacji pracujących systemów w celu ewentualnego ograniczenia skuteczności ich działania (np. przez zastosowanie odpowiednich zakłóceń) lub też podjęcia działań prowadzących do ich fizycznego zniszczenia. Potrzeba efektywnego rozpoznania, umożliwiająca skuteczne działanie wojsk własnych z jednej strony, a z drugiej konieczność przeciwdziałania ograniczającego skuteczność wykorzystania energii elektromagnetycznej przez przeciwnika, były przyczyną wyodrębnienia działań określanymi jako walka elektroniczna WRE (EW) [1, 2, 3, 4]. Zautomatyzowane systemy EW od wielu lat są integralną częścią sprzętową, szczególnie wyposażenia samolotów i okrętów. Jednym z komponentów EW, istotnym dla zapewnienia bezpieczeństwa działań wojsk, jest przeciwdziałanie radioelektroniczne (ECM) [1, 3, 4].

Walka radioelektroniczna WRE (ang. EW — *Electronic Warfare*) obejmuje:

- **przeciwdziałanie radioelektroniczne** (ang. ECM — *Electronic Countermeasures*);
- **wsparcie radioelektroniczne** (ang. ESM — *Electronic Warfare Support Measures*);
- **obronę radioelektroniczną** (ang. EPM — *Electronic Protective Measures*).

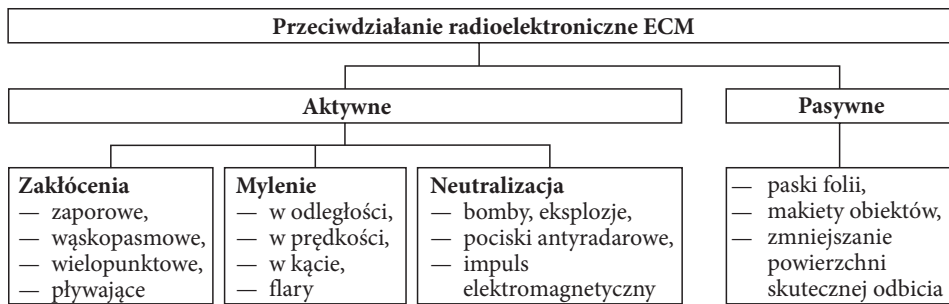
Diagram zakresu pojęciowego przeciwdziałania radioelektronicznego przedstawia rysunek 3. Do realizacji celów EW wykorzystuje się różnorodne systemy i urządzenia, i tak:

- klasa ELINT (ang. *Electronic Intelligence*) zapewnia precyzyjne, ciągłe rozpoznanie radarów i gromadzenie informacji. Wykorzystuje też komercyjne urządzenia, np. analizatory widma;
- klasa ESM (ang. *Electronic Support Measure*) zapewnia wsparcie rozpoznawcze bezpośrednio na polu walki. Współczesne urządzenia często pozwalają na łączenie możliwości ELINT/ESM;

- klasa RWR (ang. *Radar Warning Receiver*) ostrzega o zagrożeniu (samoloty, okręty, czołgi).

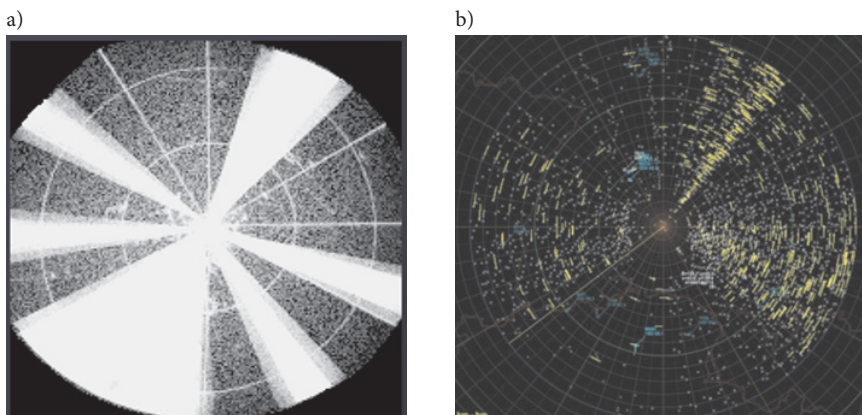
Cele przeciwdziałania radioelektronicznego ECM (rys. 3) są realizowane przez:

- 1) wytworzenie zakłóceń (elektronicznych czynnych lub biernych w postaci chmury dipoli — pasków metalizowanej folii o długości dopasowanej do długości fal elektromagnetycznych);
- 2) zmianę właściwości odbijających (technologia stealth, pokrycia tłumiące) ochranianego obiektu lub otaczającego tła (odbijacze, makiety).



Rys. 3. Metody realizacji przedsięwzięć z zakresu przeciwdziałania radioelektronicznego

Przykłady działań ECM przedstawiono na rysunku 4a oraz 4b.

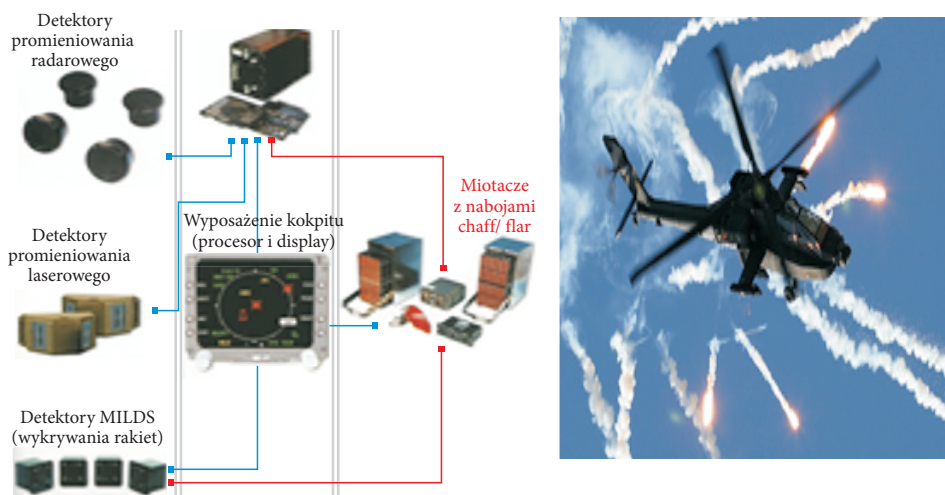


Rys. 4. Przykłady silnych zakłóceń a) szumowych oraz b) impulsowych

Źródło: www.radartutorial.eu

Rezultatem działań ECM jest tło maskujące oraz fałszywe zobrazowanie celów na ekranach radarów. Przykrycie sektora obserwacji radaru (rys. 4a) zakłóceniami uniemożliwia wykrycie i śledzenie obiektów znajdujących się w tym sektorze, a generacja celów pozornych (rys. 4b) powoduje, że znaczniki rzeczywistych obiektów są trudne do wykrycia i śledzenia.

Na rysunku 5a przedstawiono przykład zintegrowanego systemu obrony śmigłowca firmy Daimler Chrysler Aerospace. Ma on zdolność wskazywania orientacyjnego kierunku zagrożenia, wynikającego z wykrycia śledzenia przez radar lub też kierunku zbliżania (startu) rakiety. System w celu samoobrony ma zdolność wystrzeliwania pułapek termicznych w postaci flar (rys. 5b) do obrony śmigłowca przed raketami lub wystrzeliwania pasków metalizowanej folii (*chaff*), aby użyć zakłóceń biernych do maskowania śmigłowca.



Rys. 5. a) System ECM samoobrony helikoptera; b) użycie flar mylących rakiety
 Źródło: a) Prospekt EW-Self- Protection System firmy Daimler Chrysler Aerospace;
 b) <https://www.terma.com/markets/air/electronic-warfare>

Na rysunku 6 przedstawiono poglądową strukturę pokładowego systemu EWMS zarządzania walką elektroniczną (ang. *Electronic Warfare Management System*) samolotów klasy F-16. Tego typu rozwiązania są technicznie bardzo złożonymi systemami, produkowanymi tylko przez niektóre zaawansowane technologicznie firmy.

Wsparcie radioelektroniczne (ang. ESM — *Electronic Warfare Support Measures*) obejmuje działania związane z poszukiwaniem, przechwytem i identyfikacją emisji elektromagnetycznych oraz lokalizacją ZE. Głównym zadaniem ESM jest wykorzystanie pracy radarów w celu dostarczenia w czasie rzeczywistym informacji o wykryciu zagrożenia bezpieczeństwa, ostrzeżenia i obrony wojsk własnych [1, 3, 4].

Na polu walki ESM dostarcza przetworzone dane pomiarowe niezbędne do:

- ostrzegania przed zagrożeniem oraz identyfikacji zamiaru przeciwnika,
- opracowania i zmiany rozkazu bojowego (ang. *Electronic Order of Battle*),
- tworzenia i modyfikowania bazy danych (BD),
- selekcji informacji i wspierania dowódcy obrony radioelektronicznej.

Podobne zadania realizuje ELINT. Różnice występują w stosowanych metodach i rozległości analizy. Przykład pokładowego systemu ESM przedstawiono dalej na rysunku 8.

Obrona radioelektroniczna (ang. EPM — *Electronic Protective Measures*) to działania prowadzące do efektywnego, aktywnego lub pasywnego użycia widma elektromagnetycznego przez siły własne i zapobieżenie wykorzystaniu tego widma przez systemy wsparcia i przeciwdziałania przeciwnika [1, 3, 4].

W NATO używane jest również pojęcie kontrprzeciwdziałania radioelektronicznego (ang. ECCM — *Electronic Counter-Counter Measures*). Głównymi zadaniami ECCM są:

- zmniejszenie prawdopodobieństwa przechwyty emisji,
- zwiększenie odporności na zakłócenia.

Te cele są osiągnięte np. przez stosowanie sygnałów LPI (ang. *Low Probability of Interception*) o bardzo niskim poziomie mocy, trudno wykrywalnych.

Głównym zadaniem SIGINT jest zdobywanie informacji o przeciwniku w celu wsparcia rozpoznania radioelektronicznego (RRE) i innych operacji. Zadania SIGINT oraz ELINT realizowane są zarówno w czasie pokoju, jak i wojny i cechują się większą rozległością i dłuższym czasem analizy.

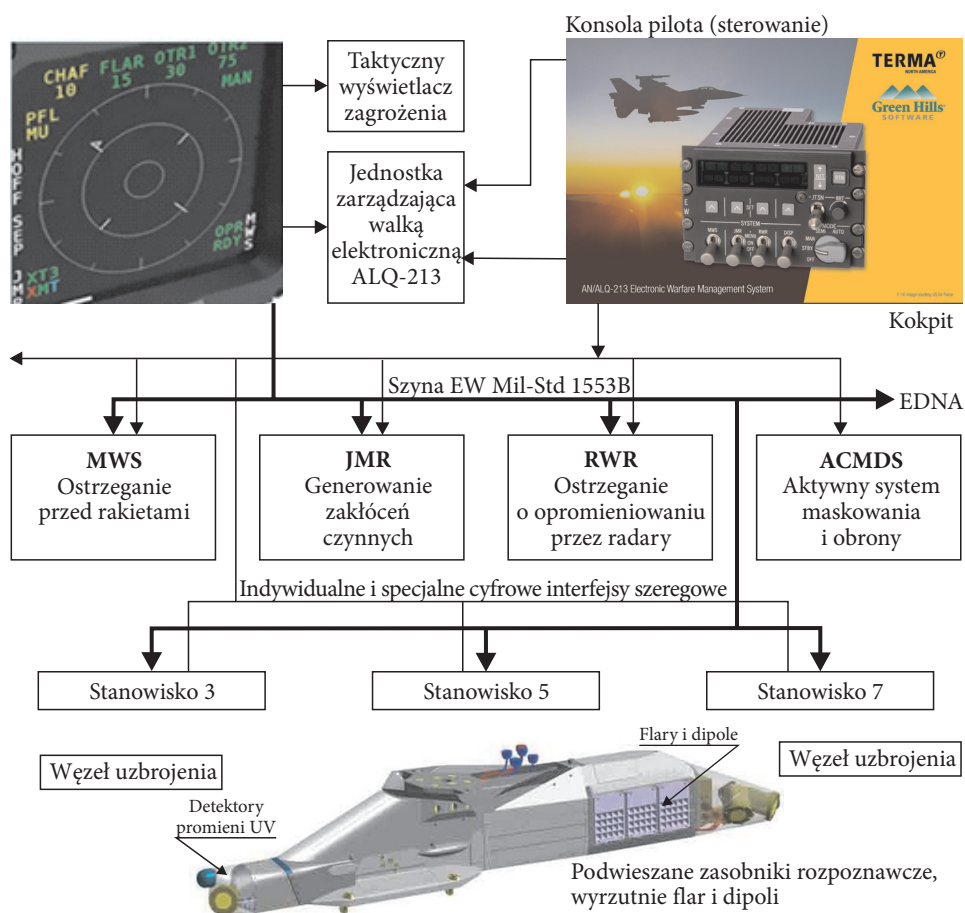
Do walki radioelektronicznej EW zalicza się też **wywiad sygnałowy** (ang. SIGINT — *Signal Intelligence*), dostarczający informacje techniczne i operacyjne pochodzące z wywiadów:

- radiowego (ang. COMINT — *Communications Intelligence*),
- elektronicznego (ang. ELINT — *Electronic Intelligence*).

Systemy elektroniczne typu ELINT/ESM (np. polski MUR 20 BREŃ, rys. 7) są przeznaczone do:

- zautomatyzowanego wykrywania sygnałów impulsowych źródeł emisji, wspierających systemy uzbrojenia w strefie taktycznej w paśmie częstotliwości 0,5÷18 GHz (z opcją do 40 GHz);
- automatycznego, monoimpulsowego pomiaru następujących parametrów impulsów:
 - częstotliwości nośnej, czasu przyjscia impulsu, amplitudy średniej impulsu,
 - czasu trwania impulsu, okresu powtarzania (częstotliwości powtarzania) impulsów;
- standaryzacji informacji pomiarowej do postaci tzw. wektora pomiarowego (WP) przyporządkowanego do każdego kolejnego odebranego impulsu;

- przetwarzania informacji pomiarowej zawartej w ciągu (ciągach) WP;
- automatycznego rozpoznawania wykrytych sygnałów i źródeł ich emisji;
- zautomatyzowanego określania kierunku **źródeł** (z lokalizacją w pracy systemowej);
- śledzenia w częstotliwości źródeł emisji wykrytych w paśmie 0,5÷18 GHz;
- gromadzenia wyników rozpoznania i danych pomiarowych;
- przekazywania łączem cyfrowym lub fonicznym informacji z rozpoznania.



MWS — *Missile Warning Systems*,
 JMR — *Active ECM Jammer*,
 ACMDS — *Advanced Countermeasures Dispensing System*,
 RWR — *Radar Warning Receiver*

Rys. 6. Struktura pokładowego systemu zarządzania walką elektroniczną EWMS i konsola pilota
 Źródło: na podstawie materiałów firmy Terma, <https://www.terma.com> (wersja autora)

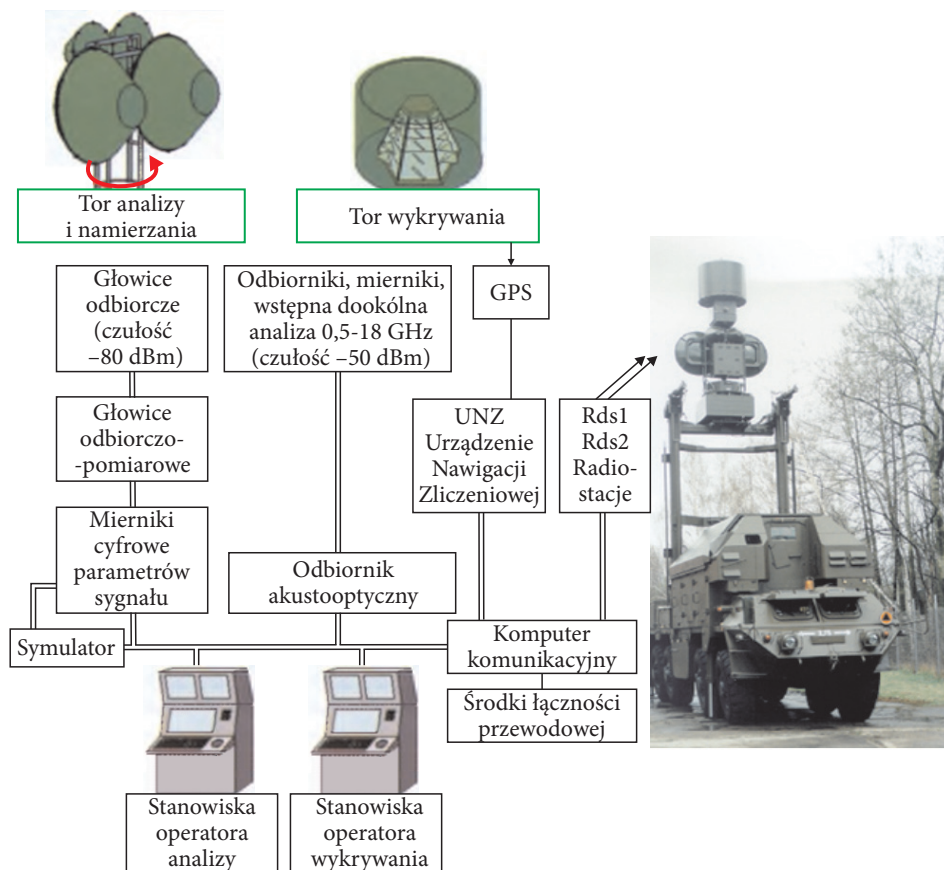
Przedstawione w artykule rozważania dotyczą wybranych aspektów przetwarzania pomiarów w urządzeniu rozpoznawczym (UR) klasy ELINT/ESM o wysokim stopniu automatyzacji. Pierwszy tego typu automatyczny system rozpoznawania (ASYR) został opracowany w Instytucie Radiolokacji WAT pod koniec lat 70. Wdrożony do produkcji i wyposażenia wojsk był dużym osiągnięciem ze względu na miniaturyzację i wykorzystanie, przełomowej wówczas, technologii mikroprocesorowej firmy Intel bazującej na procesorze 8080. Rozbudowane oprogramowanie napisane w kodzie wewnętrznym zapewniało automatyczne rozpoznawanie radarów w czasie rzeczywistym. ASYR wykorzystywał poddawane cyfryzacji analogowe sygnały rozpoznawanych radarów odbierane przez odbiorniki lub stacje rozpoznawcze wykonywane w technologii analogowej, co znacząco rozszerzało możliwości rozpoznawcze, szczególnie na okrętach, w systemie obrony powietrznej. Z tego powodu zyskał uznanie w wielu krajach i wraz z oprogramowaniem był przedmiotem eksportu. Dużym wyróżnieniem była prezentacja na wystawie w Federalnym Urzędzie Technologii Obronnej w Koblencji w RFN. Doświadczenia projektowe i eksploatacyjne umożliwiły dalszy rozwój systemów rozpoznania radioelektronicznego, głównie przy współpracy WAT z dynamicznymi i innowacyjnymi technologicznie przedsiębiorstwami polskimi takimi jak Przemysłowy Instytut Telekomunikacji (PIT) oraz Wojskowe Zakłady Elektroniczne (WZE). Dlatego prezentacja opisowa problematyki rozpoznania, realizowana dla WP w polskich przedsiębiorstwach, znalazła się również w piśmie „Przedsiębiorstwo Przyszłości” [6].

UR typu ESM wykorzystują do wykrywania sygnałów impulsowych kanał szerokopasmowy z kierunkowymi lub dookólnymi antenami. Przykład pierwszego tego typu mobilnego urządzenia rozpoznawczego MUR 20 klasy ELINT/ESM, opracowanego i wdrożonego przez WAT i PIT, przedstawiono na rysunku 7. MUR ma do odbioru i analizy dwa tory:

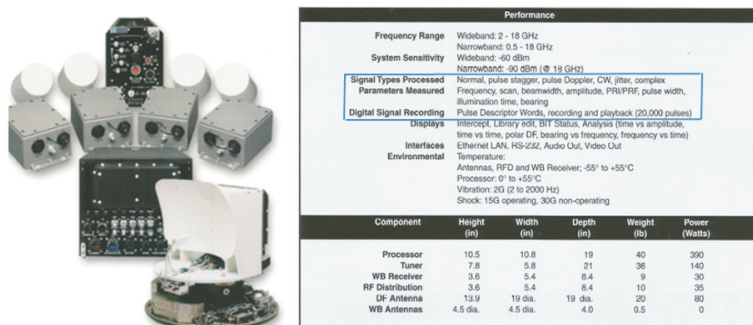
- szerokopasmowy typu ESM o paśmie 500 MHz, bazujący na odbiorniku akustooptycznym. Wykrywa on sygnały bliskich źródeł stwarzających zagrożenie dla wojsk własnych;
- wąskopasmowy o wysokiej czułości, przeznaczony do dokładnej analizy sygnałów wskazanych przez operatora lub też do analizy sygnałów wykrywanych w wyniku przeszukiwania określonych fragmentów pasma częstotliwości. Praca w tym torze jest charakterystyczna dla ELINT. Tor korzysta z superheterodynowego odbiornika oraz dwóch par anten (w zależności od podpasma) do określania kierunku do rozpoznawanego źródła metodą amplitudową. Zwiększenie dokładności namiaru zapewnia metoda interferometryczna, wykorzystująca różnice czasu przyścia sygnału do dwóch anten.

Na rysunku 8 przedstawiono elementy zminiaturyzowanego pokładowego systemu ESM amerykańskiej firmy Condor.

Ten małowagowy, lekki, relatywnie prosty konstrukcyjnie system pokładowy, łatwy w montażu, był (i ciągle jest) używany na pokładach helikopterów, samolotów i okrętów.



Rys. 7. System ELINT/ESM MUR 20 — schemat funkcjonalny i widok urządzenia
 Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów producenta PIT, Warszawa



Rys. 8. Pokładowy system ESM Condor i jego podstawowe cechy
 Źródło: prospekt firmy Condor, www.condorsys.com

2. Przetwarzanie pomiarów

W rozpoznawaniu sygnałów radarowych w urządzeniach typu ELINT i ESM w zależności od częstotliwości, pasma, warunków propagacji i miejsca pomiarów możliwy jest odbiór i przetwarzanie parametrów sygnałów pojedynczych ZE lub też pochodzących od wielu ZE [1, 2, 4, 7, 8].

Ciąg impulsów sygnału jest reprezentowany ciągiem wektorów pomiarowych WP, określanych także jako deskryptory impulsów PDW (ang. *Pulse Descriptor Words*) lub PDV (*Pulse Descriptor Vector*) [2, 7, 8]. Struktura deskryptora zależy od konkretnego UR, ale zwykle zawiera parametry:

$$\text{PDW} = \text{WP} = \langle \text{TOA}, \text{PW}, \text{A}, \text{RF}, \text{AOA} \rangle \quad (1)$$

gdzie: TOA — czas przyścia impulsu (ang. *Time of Arrival*),
 PW — czas trwania impulsu (ang. *Pulse Width, Pulse Duration*),
 A — amplituda impulsu,
 RF — częstotliwość (ang. *Radio Frequency*),
 AOA — kąt odbioru (ang. *Angle of Arrival*).

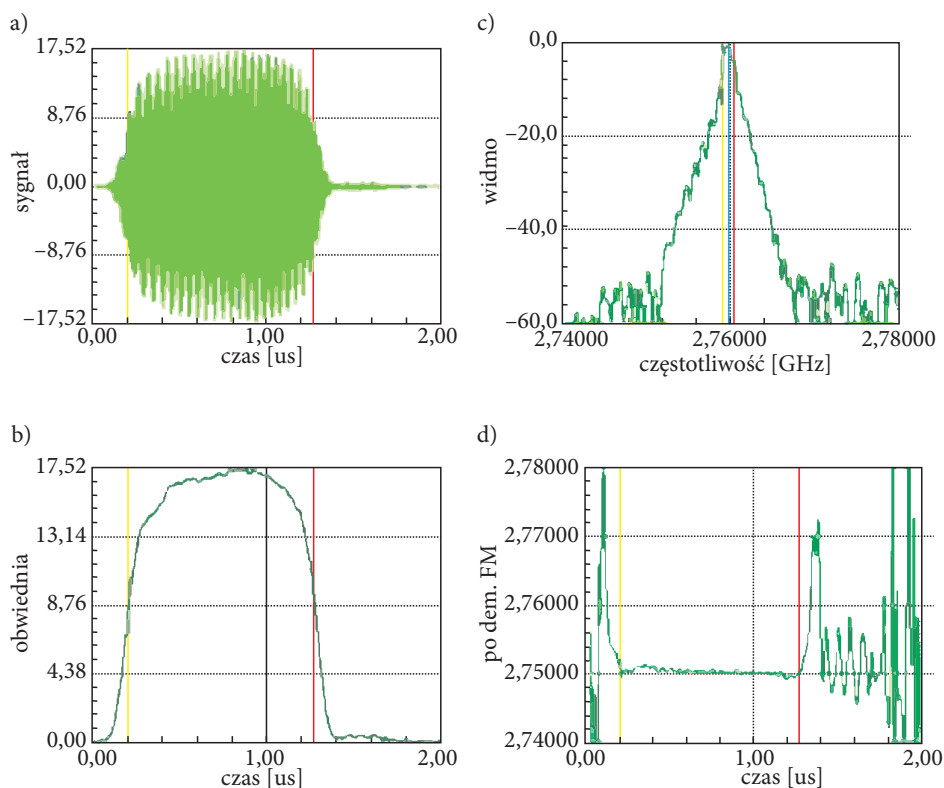
TABELA 1

Fragment ciągu wektorów pomiarowych impulsów radaru ze zmianami PRI typu stagger

Nr	TOA [s]	TOA _{i+1} -TOA _i [ms]	Amp	PW [μs]	F _{min}	F _{sr} [MHz]	F _{max}			
...										
134	1.0613409	1061.3409	141.0	0.700	2795.863	2807.415	2807.824			
135	1.0621698	0.8289	154.0	0.700	2795.863	2808.140	2808.020			
136	1.0633461	1.1763	176.0	$T_c = \sum_{i=1,4} \text{TOA}_i \approx 3,840 \text{ ms}, K_c = 4$	1	1	2808.216			
137	1.0642212	0.8751	200.0				0.900	2796.059	2808.547	2808.716
138	1.0651813	0.9601	212.0				0.900	2796.059	2808.239	2808.316
139	1.0660102	0.8289	232.0				0.900	2796.059	2808.377	2808.520
140	1.0671863	1.1761	235.0				0.900	2795.863	2808.273	2808.412
141	1.0680614	0.8751	246.0				1.000	2796.059	2808.510	2808.612
142	1.0690215	0.9601	243.0				1.000	2796.059	2808.303	2808.420
143	1.0698504	0.8289	246.0				0.900	2796.059	2808.181	2808.220
144	1.0710267	1.1763	246.0				1.100	2796.059	2807.123	2808.222
...										

Cyfrowe parametry czasowe i częstotliwościowe PDW są uzyskiwane dla każdego odbieranego impulsu. Na rysunku 9 przedstawiono interpretację graficzną parametrów impulsu radarowego, a w tabeli 1 znajdują się przykłady pomiarów parametrów dla 10 impulsów.

Charakterystyki impulsu



Rys. 9. Impuls radaru oraz jego parametry

Na rysunku 9a widoczna jest postać radiowa impulsu, a w części dolnej (rys. 9b) jego obwiednia. Impuls poddawany jest próbkowaniu i cyfryzacji. Na tej podstawie wyznaczone są: czas przyścia, czas trwania i amplituda impulsu. Na rysunkach 9c i 9d przedstawione są sygnały na wyjściu FM. Wykres na rysunku 9c pozwala na wyznaczenie wartości średniej, minimalnej i maksymalnej częstotliwości nośnej.

Rysunek 9d pokazuje zmiany częstotliwości wewnątrz impulsu, np. stała, z linio- wymi lub nieliniowymi zmianami (tu częstotliwość ma stałą wartość). W tabeli 1 przedstawiono fragment niezakłóconego okresowego (o okresie $T_c \approx 3,840$ ms) ciągu wektorów pomiarowych WP sygnału radarowego o zmianach PRI z czterema ($K_c = 4$) wartościami PRI (*stagger* prosty).

Kolejność występowania wartości PRI w sygnale zaznaczono klamrami. Kolejne wartości PRI wynikają z różnic TOA czasów przyścia kolejnych par impulsów. PRI jest parametrem umożliwiającym rozróżnianie nawet egzemplarzy radarów tego samego typu, co pozwala np. identyfikować okręty i samoloty bez ich fizycznej widzialności (np. w nocy czy we mgle).

Rysunek 10 przedstawia zobrazowanie parametrów wektorów pomiarowych w ciągu ok. 500 impulsów dla superpozycji czterech źródeł (S1, S2, S3 i S4) sygnałów radarowych. Fragmenty zmieszane różnych źródeł oznaczono np. jako S1 + S3. Strumień danych na rysunku 10 jest reprezentowany amplitudami kolejnych impulsów (rysunek górny, oznaczenie A), różnicami czasów przyjscia kolejnych par impulsów (DTOA — ang. *Differences TOA*, oznaczenie PRI) i pomiarami częstotliwości (rysunek dolny, oznaczenie RF, ang. *Radio Frequency*). Przy braku zakłóceń wartości DTOA są wartościami okresu powtarzania impulsów PRI, stąd oznaczenie PRI na rysunku. Ciągi PDW wielu paczek (czyli grup kolejnych, generowanych przez źródło impulsów) skojarzone z pojedynczym ZE pozwalają na szerszą charakterystykę sygnału (ang. *Interpulse Signal Analysis*). Istotę kojarzenia odbieranych ciągów z poszczególnymi ZE (selekcji, sortowania, rozplatania) przedstawiono na rysunku 11. Graficzna prezentacja pomiarów (jak na rys. 10) ułatwia operatorowi wyszukiwanie podobieństwa między fragmentami obrazów przetwarzanego ciągu. Jest to prostsze niż szukanie podobieństwa w kolumnach liczb, tak jak to pokazano w tabeli 1, a takie zadania są często wykonywane w systemach ELINT.

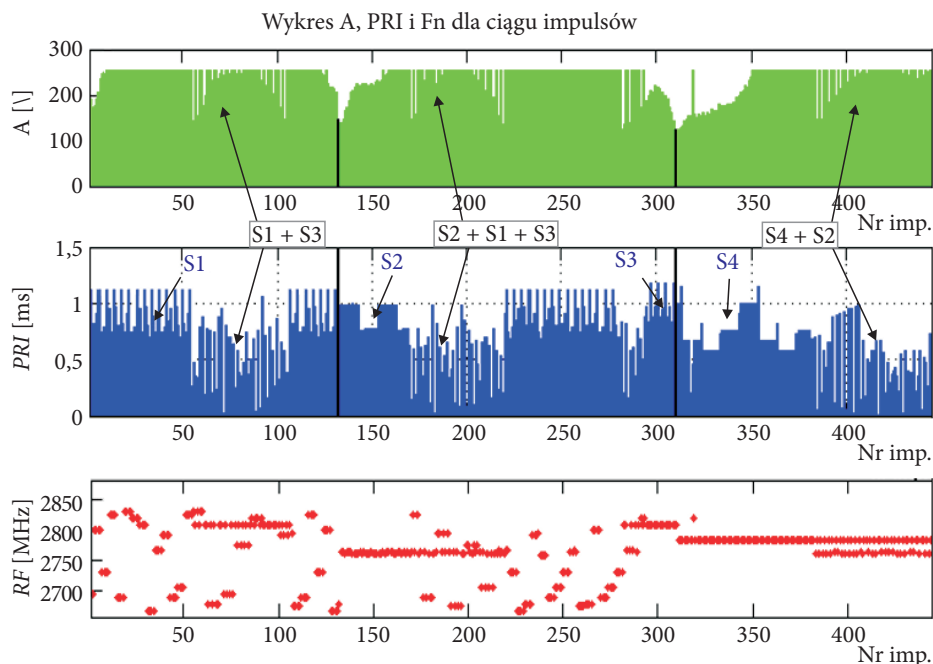
W wyniku analizy międzyimpulsowej, na podstawie wielu paczek, zostają określone (rys. 13) parametry tzw. wektora sygnałowego — WS (ang. *Emitter Descriptor Vector*) [2, 7, 8].

Parametry WS są w końcowym etapie rozpoznawania porównywane ze znanymi wzorcami bazy danych (rys. 11) w celu wyznaczenia wzorca o maksymalnej wartości miary podobieństwa, oceniającej zgodność parametrów WS i wzorców BD (rys. 14). Dla ustalonej postaci kryterium porównania oraz zasobów BD jakość rozpoznania zależy od liczby parametrów w WS, dokładności ich estymacji oraz ich wagi przy rozpoznawaniu konkretnego radaru. Ogólna struktura wektora sygnałowego WS jest następująca:

$$WS = \{EDV\} = \langle \{D_{PRI}\}, \{D_{RF}\}, \{I\} \rangle \quad (2)$$

gdzie: $\{D_{PRI}\}$ — zbiór parametrów (deskryptor) okresu powtarzania impulsów,
 $\{D_{RF}\}$ — zbiór parametrów (deskryptor) częstotliwości nośnej,
 $\{I\}$ — inne parametry (np. czas trwania impulsu, polaryzacja, kąt odbioru itp.).

Szczegółowa struktura deskryptora WS powinna uwzględniać najbardziej dystynktywne cechy sygnału sondującego i być dopasowana do sposobu zmian parametrów czasowych i częstotliwościowych w sygnale. Należy podkreślić, że poprawne określenie deskryptora D_{PRI} ułatwia też określenie deskryptora parametrów częstotliwościowych D_{RF} — szczególnie w zakresie określenia kolejności zmian wartości częstotliwości RF, co wpływa na poprawność rozpoznania.



Rys. 10. Fragment zmian parametrów w ciągu impulsów dla superpozycji sygnałów czterech radarów

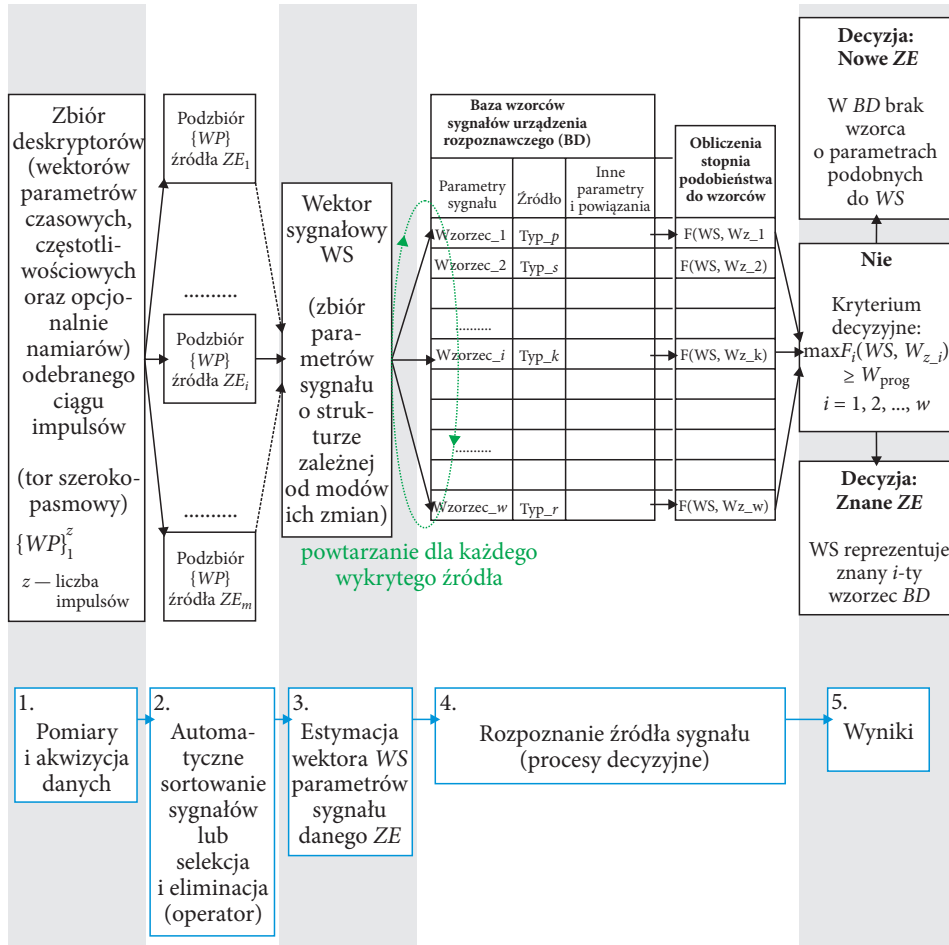
Źródło: na podstawie pomiarów własnych i symulacji

Zakres przetwarzania danych w ciągu PDW sygnału od pojedynczego ZE zależy od złożoności zmian parametrów PRI i RF w sygnale. Przykłady typowych zmian w sygnałach przedstawiono na rysunku 12. W sygnale na rysunku 12a występują nieliniowe dyskretne zmiany PRI i częstotliwości. To typowy sposób zmian parametrów radaru przy generacji wielu wiązek w elewacji. W tym sygnale występują też zakłócenia typu ZI (dalej omawiane straty części impulsów). Sygnały na rysunkach 12b i 12c są pozbawione zakłóceń. W sygnale na rysunku 12b występują zmiany PRI typu *dwel and switch*, natomiast częstotliwość jest stała. W sygnale na rysunku 12c zmiany częstotliwości są skokowe (co 4 impulsy) w paśmie około 100 MHz, natomiast zmiany PRI są typu *stagger complex* i są powtarzalne w cyklu co 16 impulsów.

Sposób przetwarzania oraz algorytmy powinny zapewnić identyfikację sposobu zmian parametru PRI dla wariantów takich jak:

- wartości stałe,
- fluktuujące (ang. *jitter*),
- zmiany o charakterze skokowym (ang. *dwel and switch*),
- zmieniane w sposób płynny (ang. *sliding*) — zmiany liniowe lub nieliniowe,

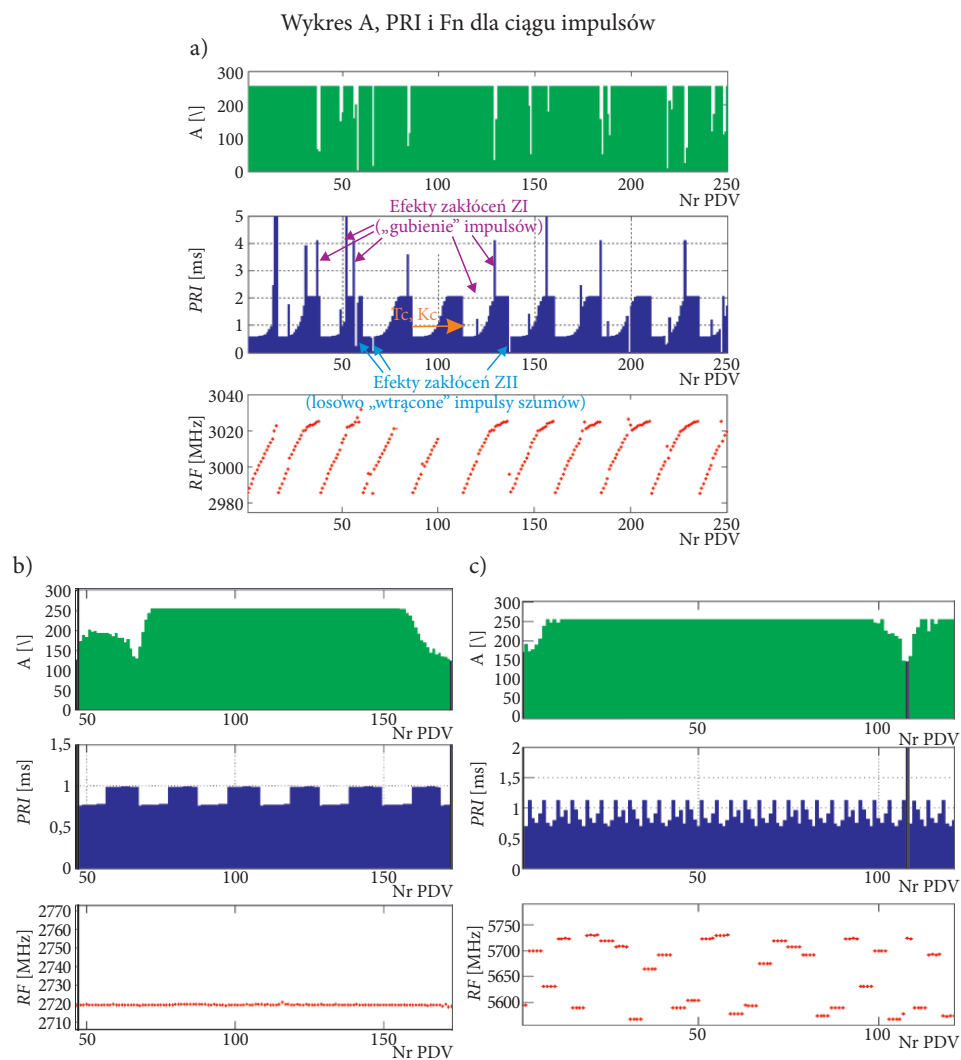
- zmieniane przemiennie (ang. *stagger*) — ustalona liczba wartości w określonym porządku,
- losowe (ang. *random*) — duża liczba dyskretnych wartości powtarzalnych (lub nie).



gdzie: w — liczba wzorców sygnałów w bazie danych,
 r — liczba źródeł emisji reprezentowana liczbą „ w ” wzorców ($w > r$),
 $F_i(WS, Wz_i)$ — wartość miary podobieństwa między zbiorem parametrów WS a i -tym wzorcem BD

Rys. 11. Schemat blokowy systemu przetwarzania informacji pomiarowej.

Wymienione cechy sygnałów występują także w specyfikacji parametrów systemu ESM Condor przedstawionego na rysunku 8.



Rys. 12. Przykładowe rodzaje zmian parametrów PRI i RF w ciągach impulsów radarów

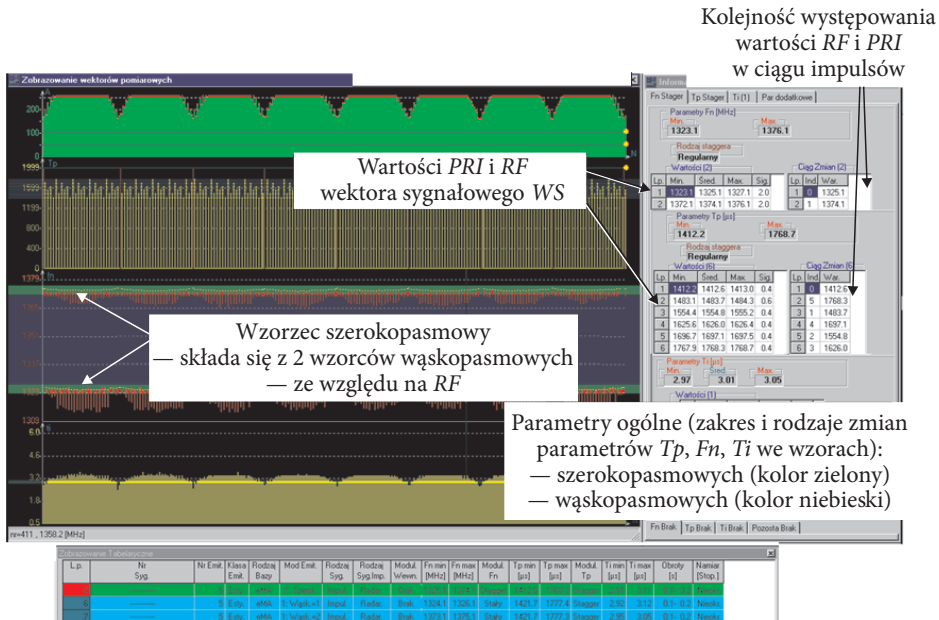
Źródło: pomiary własne

Złożoność zmian z jednej strony komplikuje proces analizy wyników pomiarów i stawia przed algorytmami wymóg adaptacji do aktualnej sytuacji pomiarowej, ale też potencjalnie pozwala na zwiększenie rozróżnialności sygnałów. W rozpoznawaniu ważnym parametrem, z uwagi na podatność pomiarową, wysoką dokładność [1, 2] oraz wartość informacyjną jest PRI. Jedną z jego ważnych cech informacyjnych i identyfikacyjnych jest występowanie okresowości (cykliczności) zmian wartości PRI [1, 2, 6, 7] tworzących cykl. Jednak wykrycie cykliczności jest utrudnione z uwagi na różnorodne zakłócenia występujące w procesie odbiorczym i pomiarowym [1, 2]. Problematykę tę bardziej szczegółowo omówiono w końcowej części artykułu.

Rozpoznawanie pojedynczego ZE wymaga realizacji następujących etapów (rys. 11):

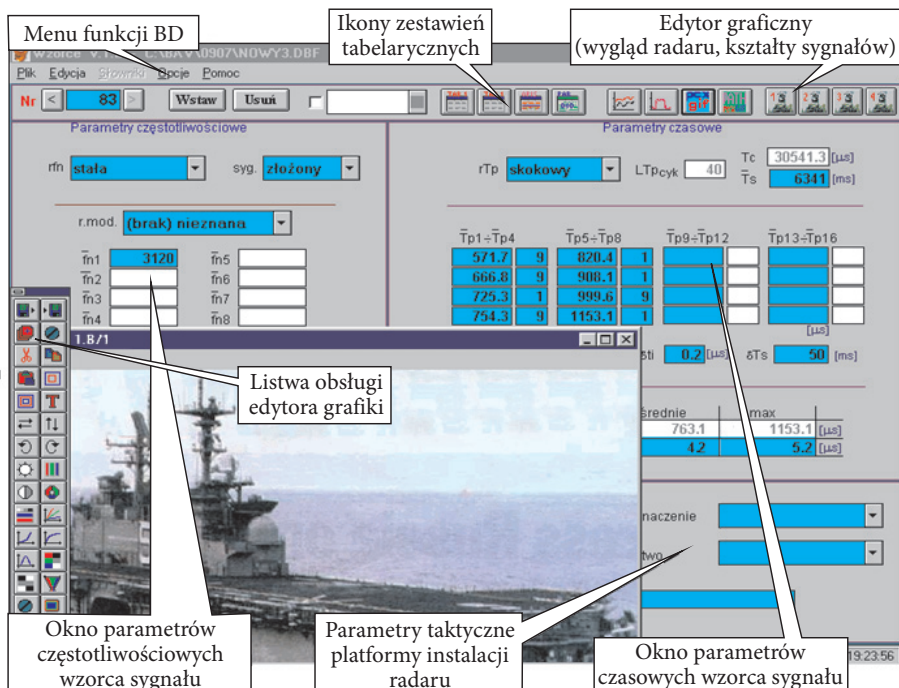
- 1) skojarzenie (sortowanie) odbieranych ciągów WP z poszczególnymi ZE;
- 2) estymacja parametrów dla poszczególnych ZE w postaci wektorów sygnałowych WS (przykład przedstawiono na rysunku 13);
- 3) rozpoznawanie radaru (porównywanie WS z wzorcami bazy danych BD) i podjęcie decyzji o wykryciu nowego ZE lub potwierdzeniu pracy znanego.

Przykład poglądowy wyników rozpoznania (dane WS są fikcyjne) przedstawiono na rysunku 14.



Rys. 13. Wizualizacja parametrów ciągu impulsów sygnału oraz wyniku estymacji wektora sygnałowego WS

Źródło: na podstawie pomiarów własnych



Rys. 14. Rozpoznanie radaru i platformy jego wykorzystania

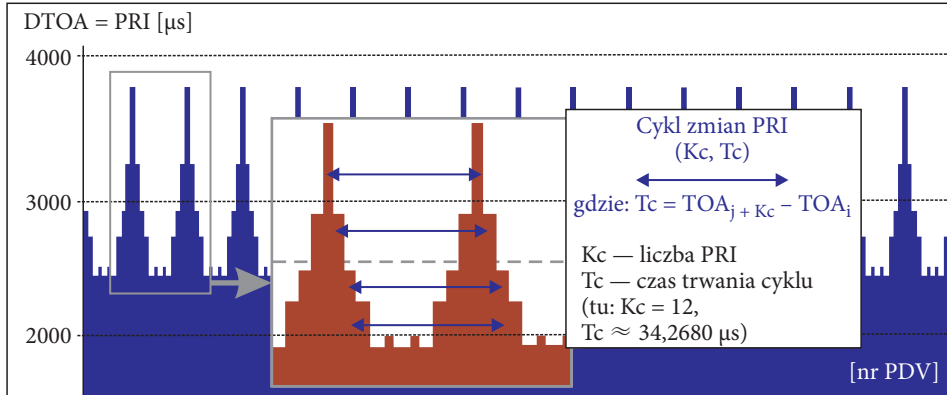
Źródło: symulacja

Proces kojarzenia odbieranych ciągów z poszczególnymi ZE jest określany jako sortowanie sygnałów (ang. *signal sorting*) lub rozplatanie (ang. *deinterleaving*) [2, 6, 7]. Według jednej z pierwszych prac [2] dotyczących problemu rozpoznania rozplatanie (ang. *deinterleaving pulse train*) jest rozumiane jako proces określania liczby ZE i przyporządkowania dla każdego ZE ciągów impulsów (deskryptorów) w przypadku, gdy ciągi impulsów poszczególnych ZE są „zmieszane”. W prostym przypadku do rozpoznania radaru można wyznaczyć tylko statystyczne wartości PRI i RF. Jednak przy dużej liczbie wzorców BD wynik rozpoznania może być niejednoznaczny, bo różne radary mogą mieć podobne parametry, ale np. o różnej kolejności występowania wartości PRI w cyklu, tak jak to pokazano na rysunku 13. Uwzględnienie tego zwiększa możliwość rozróżniania sygnałów.

Pod pojęciem **cyklu zmian PRI** rozumiane jest tu okresowe powtarzanie się w sygnale sekwencji wielu różnych wartości PRI. Z podanych rozważań wynika, że aby wykorzystać dystynktywne cechy sygnałów sondujących, algorytmy przetwarzające ciągi PDW powinny:

- zapewnić wykrywanie w ciągu PDW faktu istnienia cyklu zmian PRI,
- umożliwić określenie parametrów (K_c , T_c) tego cyklu.

Parametrami cyklu są: jego okres — T_c oraz długość K_c , określająca liczbę wartości PRI w cyklu. Interpretację cyklu PRI w niezakłóconym ciągu impulsów z przemiennym złożonym PRI (ang. *stagger complex*) o parametrach $T_c \approx 34,268$ ms, $K_c = 12$ i sześciu różnych wartościach $PRI_1, PRI_2, \dots, PRI_6$ pokazano na rysunku 15.



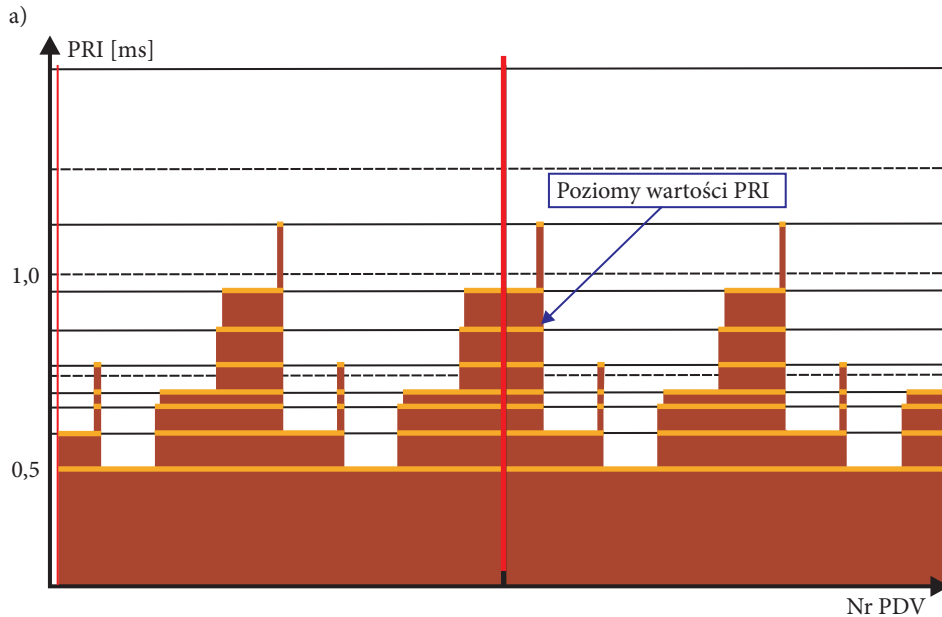
Rys. 15. Interpretacja wartości PRI oraz cyklu PRI ($T_c \approx 34,268$ ms, $K_c = 12$) w ciągu impulsów typu *stagger complex*

Bardziej złożone cykle, występujące w sygnałach ze zmianami PRI typu *dwell and switch*, przedstawiono na rysunkach 16 oraz 20.

Ogólna struktura cyklu (T_c , K_c) nie odzwierciedla jego pełnej zawartości informacyjnej, ponieważ niektóre z wartości PRI mogą występować w cyklu pojedynczo lub wielokrotnie, na różnych kolejnych pozycjach cyklu. Tego rodzaju cykle są określane jako złożone (np. *stagger complex*). Formalną strukturę parametrów deskryptora PRI (2) przedstawia zapis (3):

$$D_{PRI} = \left\langle \begin{array}{l} \{L, \delta_{PRI}\} \\ \{PRI_1, PRI_2, \dots, PRI_L\}, \\ \{w_1, w_2, \dots, w_L\}, \\ \{T_c, K_c, \delta_{T_c}\}, \\ U_{PRI} \end{array} \right\rangle, \quad (3)$$

gdzie: L — liczba różnych wartości PRI w sygnale,
 U_{PRI} — relacja porządku wartości PRI w cyklu o czasie trwania T_c i długości K_c ,
 δ_{T_c} , δ_{PRI} — dokładności wyznaczenia T_c i PRI,
 $\{PRI\}$, $\{w_1, \dots, w_L\}$ — zbiór dyskretnych wartości PRI i częstotliwości ich występowania.



b)

Wyniki estymacji parametrów sygnału

Wartości PRI w sygnale:

01 = 0.5716-09;
 02 = 0.6667-09;
 03 = 0.7264-01
 04 = 0.7548-09;
 05 = 0.8206-01;
 06 = 0.9084-01;
 07 = 0.9995-09;
 08 = 1.1530-01;

Cykl: $Kc = 40$ $Tc [ms] = 30.541$ ms Rodz. zmian PRI = dwell and switch

Kolejność wartości PRI w cyklu

01 = 0.5716 02 = 0.5716 03 = 0.5716 04 = 0.5716 05 = 0.5716 06 = 0.5716 07 = 0.5716 08 = 0.5716
 09 = 0.5716 10 = 0.7264 11 = 0.9995 12 = 0.9995 13 = 0.9995 14 = 0.9995 15 = 0.9995 16 = 0.9995
 17 = 0.9995 18 = 0.9995 19 = 0.9995 20 = 1.1530 21 = 0.7548 22 = 0.7548 23 = 0.7548 24 = 0.7548
 25 = 0.7548 26 = 0.7548 27 = 0.7548 28 = 0.7548 29 = 0.7548 30 = 0.9084 31 = 0.6667 32 = 0.6667
 33 = 0.6667 34 = 0.6667 35 = 0.6667 36 = 0.6667 37 = 0.6667 38 = 0.6667 39 = 0.6667 40 = 0.8206

Rodz. zmian Fn: R_Fn = 0 — Stały; Dew := 4.00

Fn01 = 3305.73

Zakres zmian parametrów w cyklu

fn min = 3304.96 fn sr = 3305.81 fn max = 3306.67 _Ts = 6338.87

PRImin = 0.5716 PRI sr = 0.7635 PRI max = 1.1530

Rys. 16. a) Zmiany PRI w sygnale, b) Interpretacja D_{PRI} w wektorze sygnału WS

Jeżeli w sygnale występuje cykl PRI, to wartość T_c jest kombinacją liniową różnych wartości PRI, a ponadto spełnione są relacje (4):

$$T_c \cong \sum_{j=1}^L w_j \cdot PRI_j; K_c = \sum_{j=1}^L w_j, \quad (4)$$

gdzie: L — liczba różnych wartości PRI w zbiorze ($1 < L \leq K_c$),
 w_j — liczba powtórzeń w cyklu danej wartości PRI _{j} ($j = 1, 2, 3, \dots, K_c$).

Na rysunku 16a pokazano przykład zmian wartości PRI typu *dwell and switch* w sygnale bez zakłóceń, a na rysunku 16b wynik estymacji WS (w tym strukturę (3) D_{PRI}).

Na rysunkach 16a i 16b widoczna jest grupa ośmiu wartości PRI, które na rysunku 16a są zaznaczone poziomymi liniami. Radar generuje grupę impulsów o wartościach wynikających z danego poziomu PRI (*dwell*) i następuje przełączenie (*switch*) na inny poziom PRI. Natomiast na rysunku 16b wartości zbioru PRI są ponumerowane i wyróżnione kolorem czerwonym. Tworzą one cykl PRI o czasie $T_c = 30,541$ ms i długości liczącej 40 wartości PRI ($K_c = 40$). Kolejność U_{PRI} (3) wartości PRI w cyklu pokazano na rys. 16b (kolor niebieski).

3. Zakłócenia procesu akwizycji pomiarów

W praktyce automatyczne wykrycie cyklu PRI może być trudne ze względu na zakłócenia w odbiorze sygnałów i przy pomiarze PDW impulsów.

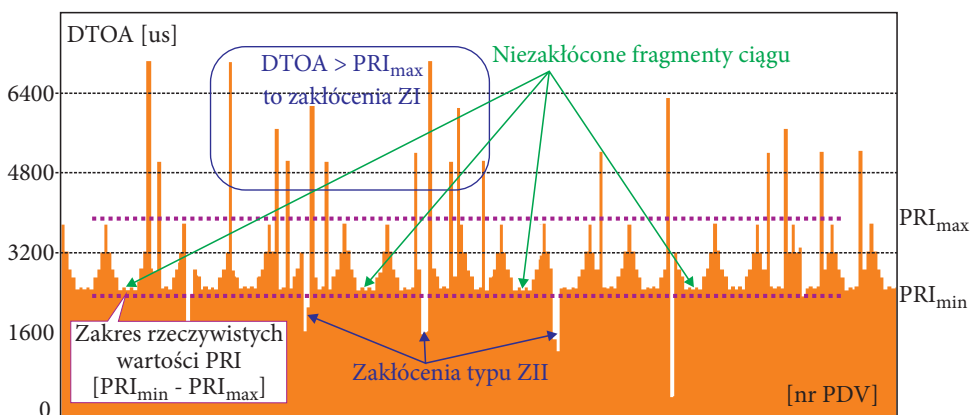
Zakłócenia [1, 2, 3, 7, 8] wynikają:

- a) z odbioru sygnałów odbitych — wielodrogowość (ang. *multi path*),
- b) z relacji między wartością energii impulsów i progami wykrywania,
- c) ze zmian częstotliwości sygnału (ang. *frequency agile*),
- d) z niedokładności (błędów) rozplatania w przypadku mieszaniny impulsów różnych ZE.

Na rysunku 17 przedstawiono interpretację symulowanych zakłóceń w odniesieniu do cyklicznego ciągu (ok. 350 impulsów) sygnału rzeczywistego przedstawionego wcześniej na rysunku 15.

Efekty zakłóceń widoczne na rysunku 17 mogą być rozpatrywane jako „gubienie” (ang. *missing*) impulsów, określane dalej jako **zakłócenia typu ZI**. Wówczas odstęp między momentami przyścia kolejnych odebranych impulsów ($D_{TOA_i} = TOA_{i+1} - TOA_i$ dla $i = 1, 2, 3, \dots, n - 1$, gdzie: i — numer bieżącego impulsu,

n — liczba odebranych impulsów) nie odpowiada żadnej z wartości rzeczywistych PRI, gdyż jest sumą (kombinacją liniową) dwóch lub więcej kolejnych wartości PRI. Na rysunku 17 są to prążki DTOA większe niż PRI_{\max} .



Rys. 17. Interpretacja zakłóceń w analizowanych ciągach impulsów

W procesie odbiorczym mogą wystąpić również przypadkowe impulsy zakłóceń (np. atmosferycznych czy też wynikające z szumów odbiornika lub wpływu pracy urządzeń sąsiednich). Ich efekty mogą być też interpretowane jako widoczne w dolnej części rys. 17 „wtrącenia” impulsów — dalej określane jako **zakłócenia typu ZII**.

Zakłócenia tego typu powodują przypadkowe „dzielenie” rzeczywistych wartości PRI na dwie wartości krótsze i wówczas odpowiadają im wartości DTOA mniejsze niż PRI_{\min} . Posługując się określonymi pojęciami zakłóceń ZI i ZII (z rys. 17), można przewidywać, że:

- jeśli wystąpią tylko zakłócenia ZI, to liczba PDW po stronie odbiorczej będzie mniejsza niż liczba impulsów faktycznie wygenerowanych przez radar;
- jeśli wystąpią tylko zakłócenia ZII, to liczba PDW po stronie odbiorczej będzie większa od rzeczywistej liczby impulsów generowanych przez radar;
- jeśli występują jednocześnie ZI i ZII (jak na rys. 17), to sytuacja jest niestabilna, trudna do przewidzenia, bo zależy od intensywności zakłóceń ZI oraz ZII.

Z przedstawionych rozważań i rysunku 17 widać, że w przypadku zakłóceń znacznie pogarszają się warunki pozwalające na identyfikację cyklu oraz poprawne określenie zbioru wartości PRI.

4. Identyfikacja zakłóceń i wartości PRI w ciągach impulsów

Dla ciągu PDW_r ($r = 1, 2, \dots, z$, gdzie: z - liczba PDW) można określić różnice czasów przyścia dla różnych par impulsów odległych o zadaną (stałą) liczbę całkowitą k impulsów. Wtedy powstanie zbiór $\{\Delta T_j(k)\}$ odstępów czasu między k impulsami (ang. *TOA Differences Histogram*) o elementach:

$$\Delta T_j(k) = \Delta T_{r,s} = \text{TOAs} - \text{TOAr} \quad (5)$$

gdzie: TOA - czas przyścia impulsów o numerach s i r , $s > r$,
 $r = 1, 2, 3, \dots (z - k)$,
 $s = (r + k)$,
 z - liczba PDW,
 $j \in [1, 2, 3, \dots, (z - k)]$.

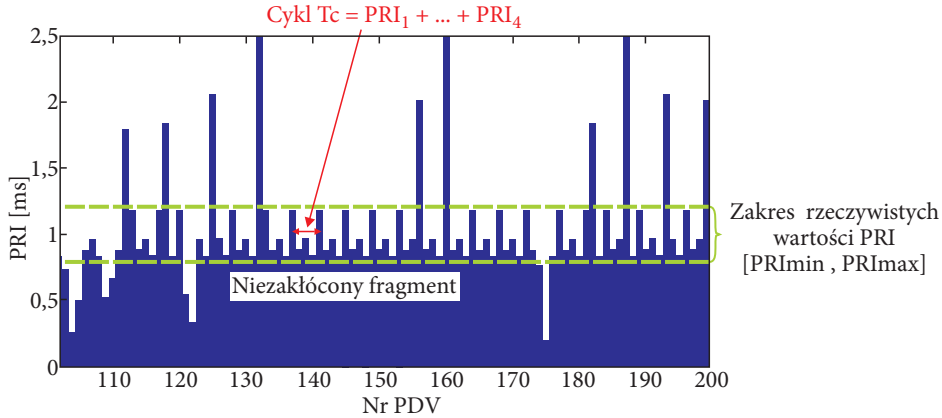
Dla ustalonej wartości k jest on określany jako histogram sekwencyjny SDH (ang. *Sequential Difference Histogram*) [2, 8]). Może też być interpretowany jako wiersz macierzy Delta- τ [1] odległości czasowej przychodzących impulsów. Dla zadanej wartości k liczba odstępów $\Delta T_{r,s}$ wyniesie $(z - k)$. Jeżeli dla ciągu PRI zostaje określona macierz odległości czasowych dla wszystkich możliwych par impulsów, to odpowiadający jej histogram (zbiór skupień) jest nazywany histogramem Delta- τ . Ze względu na symetryczność macierzy Delta- τ liczba $L(z)$ odstępów dla ciągu z impulsów wynosi:

$$L(z) = \sum_{i=1}^{z-1} (z-i) = \frac{1}{2} * (z^2 - z). \quad (6)$$

Aby pokazać istotę histogramu Delta- τ , na rysunku 18 przedstawiono fragment ciągu wartości PRI typu *stagger* (dla $K_c = 4$, $T_c \approx 3,840$ ms), a na rysunku 19 histogram Delta- τ tego sygnału.

Wcześniej, w tabeli 1, wskazano parametry PDV odpowiadające impulsom o numerach 134-144 z rysunku 18. Cały przedstawiony ciąg parametrów PRI dotyczy około 700 impulsów, co w histogramie przenosi się na licznosc zbiorów skupień (rys. 19). Przerywanymi liniami na rysunku 18 zaznaczono zakres wartości PRI. Wartości większe od PRI_{\max} wynikają z obecności zakłóceń ZI, a mniejsze od PRI_{\min} z zakłóceń ZII.

Rysunek 19 przedstawia histogram Delta- τ dla całego ciągu ok. 700 impulsów. Histogram ten to inaczej wykres funkcji autokorelacji dla wartości dyskretnych. Oś pozioma to czas w ms, a pionowa wskazuje licznosc skupień odstępów czasu między impulsami. Pierwsze cztery prążki o licznosci po ok. 175 wartości odpowiadają rzeczywistym wartościom $\text{PRI}_1, \text{PRI}_2, \text{PRI}_3, \text{PRI}_4$. Najwyższy (zaznaczony kolorem czerwonym na rysunku 19) prążek o licznosci $N_1 \approx 700$ dla $T_c \approx 3,840$ ms jest sumą czterech kolejnych wartości PRI w cyklu T_c (co pokazano wcześniej w tabeli 1).



Rys. 18. Fragment ciągu impulsów typu *stagger* o parametrach $K_c = 4$, $T_c = 3,840$ ms

Elementy zbioru odstępów czasu między k impulsami (5) mogą zostać podane procesowi skupiania (grupowania) wartości zbliżonych do siebie (z zadaną dokładnością — rozdzielczość histogramu). Przyjęto, że dla dalszych rozważań dla k -tego etapu efektem grupowania odstępów czasu między impulsami są zbiory (7) charakteryzujące podstawowe parametry statyczne pewnej liczby L_k skupień. Dla k -tego etapu zbiory (D^k, N^k, S^k) zawierają uzyskane parametry statystyczne skupień:

$$\begin{aligned} D^k &= \langle d_1^k, d_2^k, d_3^k, \dots, d_i^k, \dots, d_{L_k}^k \rangle \\ N^k &= \langle n_1^k, n_2^k, n_3^k, \dots, n_i^k, \dots, n_{L_k}^k \rangle \\ S^k &= \langle \delta_1^k, \delta_2^k, \delta_3^k, \dots, \delta_i^k, \dots, \delta_{L_k}^k \rangle \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie: $\{d_i^k, n_i^k, \delta_i^k\}$ — wartość średnia, liczność odchylenie standardowe i -tego skupienia

Dalej w algorytmie ASWC skupienia odstępów między impulsami (7) będą wykorzystane do wykrywania i identyfikacji rodzaju zakłóceń (ZI, ZII), określania zbioru wartości PRI oraz wykrywania cyklu PRI i określania jego parametrów. Wykorzystując własności zbiorów skupień między kolejnymi impulsami (indeks $k1 = 1$) i niekolejnymi ($k2 = 2$ oraz $k3 = 3$) impulsami, można zapisać reguły identyfikacji rodzaju zakłóceń:

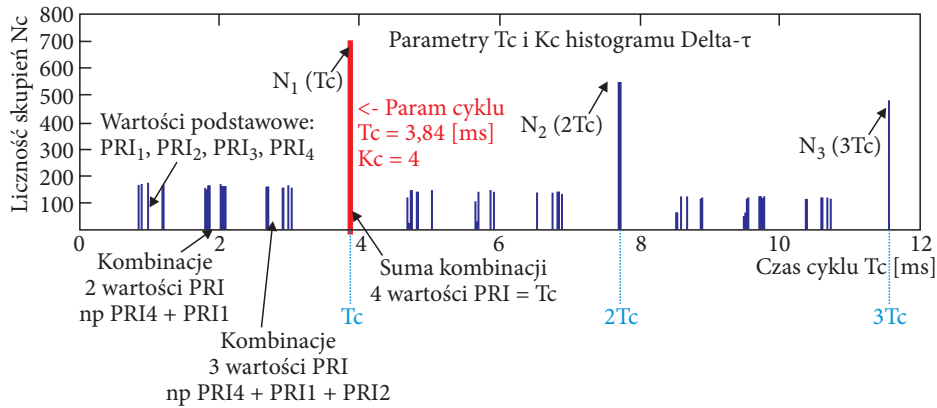
a) Jeżeli:

$$\begin{aligned} &\exists (i, j) \left[\left(\left[d_i^{k1} \cong d_j^{k2} \right] \vee \left[d_i^{k1} \cong d_j^{k3} \right] \right) \wedge \right. \\ &\left. \wedge \left(\left[n_i^{k1} \ll n_j^{k2} \right] \vee \left[n_i^{k1} \ll n_j^{k3} \right] \right) \right] \Rightarrow ZI = TRUE \end{aligned} \quad (8)$$

b) Jeżeli:

$$\exists (i, j) \left[\left(d_i^{k1} \overset{\delta}{\cong} d_j^{k2} \right) \wedge \left(n_i^{k1} \gg n_j^{k2} \right) \right] \Rightarrow ZII = TRUE$$

gdzie: $i = 1, 2, 3, \dots, L1, j = 1, 2, 3, \dots, L2(L3)$;
 $L1, L2$ — liczba skupień odstępów między kolejnymi i niekolejnymi impulsami,
 δ — zakładana dokładność porównania — $\max \{ \delta_i^{k1}, \delta_j^{k2} \}$.



Rys. 19. Histogram Delta- τ dla ciągu impulsów o długości cyklu $Kc = 4$ i czasie trwania cyklu $Tc \approx 3,840$ ms

Znajomość rodzaju występujących zakłóceń umożliwia precyzyjne określenie zbioru wartości PRI (dalej oznaczanego jako Ω^{PRI}) oraz zbioru kombinacji (Ω^{Kom}) wartości PRI spełniających regułę (8a). Przykładowo, jeśli w ciągu zidentyfikowano tylko ZI, to skupienie odstępów d_i^{k1} między kolejnymi impulsami, dla którego nie jest spełniony pierwszy z powyższych warunków (8), jest wartością PRI (tzn. $d_i^{k1} \in \{PRI\}$), nawet jeśli odpowiadająca mu częstość występowania jest mała (jest to praktycznie możliwe przy analizie krótkich ciągów, w których występują długie, złożone cykle PRI). Przykład estymacji zbiorów skupień dla ciągu z rysunku 17 przedstawiono w tabeli 2.

Przedstawione dane o parametrach skupień umożliwiają interpretację podanych reguł identyfikacji zakłóceń ZI i ZII. Przykładowo w kolumnie 2 tab. 2 jest odstęp między impulsami 2,5110 ms, a częstość jego występowania w ciągu to 44 razy. Najbardziej zbliżony odstęp występuje też w kolumnie 5 w wierszu 11, ale jego częstość wynosi tylko 5. Z relacji logicznych wynika, że 2,5110 ms to wartość PRI i jednocześnie wynika z tego fakt obecności w sygnale zakłóceń ZII, które spowodowały wystąpienie wartości 2,5110 ms, jako odstępów między niekolejnymi

impulsami, tzn. dla $k = 2$. Taka automatycznie oprogramowana analiza pozwala określić wartość PRI, tak jak pokazano w kolumnie 4 tabeli 2.

TABELA 2

Przykładowy zbiór skupień i jego wykorzystanie do określenia rodzaju zakłóceń i wartości PRI

Skupienia dla $k = 1$		Interpretacja	Skupienia dla $k = 2$		Uwagi
Skupienia odstępów między kolejnymi impulsami (dla $k = 1$) $\Delta T_i(k) = TOA_{i+1} - TOA_i$	Liczność skupień		Skupienia odstępów między niekolejnymi impulsami (dla $k = 2$) $\Delta T_i(k) = TOA_{i+2} - TOA_i$	Liczność skupień	
$d_i^{k=1}$ [ms]	n_i^k		d_i^k [ms]	n_i^k	
2,5500	45	PRI ₁	5,0490	39	→ZI = True
2,5110	44	PRI ₂	5,0610	37	→ZI = True
3,2455	40	PRI ₃	5,2730	34	
2,7620	39	PRI ₄	6,1680	33	
2,9225	37	PRI ₅	7,0326	27	→ZI = True
2,4990	22	PRI ₆	5,6845	26	→ZI = True
3,7870	18	PRI ₇	8,9303	9	
6,1682	9	Kombinacja PRI	2,7620	8	→ZII = True
7,0328	8	-II-	9,9554	7	→ZII = True
5,6853	8	-II-	2,9222	6	
5,0612	7	-II-	2,5110	5	→ZII = True
5,0490	6	-II-	7,5600	5	
...	
Łącznie 93 skupienia			Łącznie 103 skupienia		

5. Wykrywanie cyklu PRI z wykorzystaniem histogramu Delta- τ

Do wyznaczania cykliczności zmian PRI najprostszym rozwiązaniem jest algorytm wykorzystujący pełny histogram Delta- τ . Taki histogram jest dyskretną postacią funkcji autokorelacji. Otrzymane wtedy skupienia typu (7) reprezentują wszystkie kombinacje odstępów czasu między impulsami. Wówczas, jeżeli w sygnale występuje cykl, to jego długość T_c określa najbardziej liczne skupienie (prążek) o numerze j^* , tzn.:

$$T_c = d_{j^*} \quad (9)$$

gdzie: j^* jest numerem skupienia (indeksem) o największej liczności, tzn.: $n_{j^*} = \max, n_j, j = 1, 2, 3, \dots, m$
 m — ilość skupień otrzymana dla liczby $0,5(z^2 - z)$ skupianych odstępów $\Delta T_{r,s}$ (wzór 5).

Znając T_c , można w wyniku dalszej analizy wyznaczyć K_c , ale wadą tej metody jest:

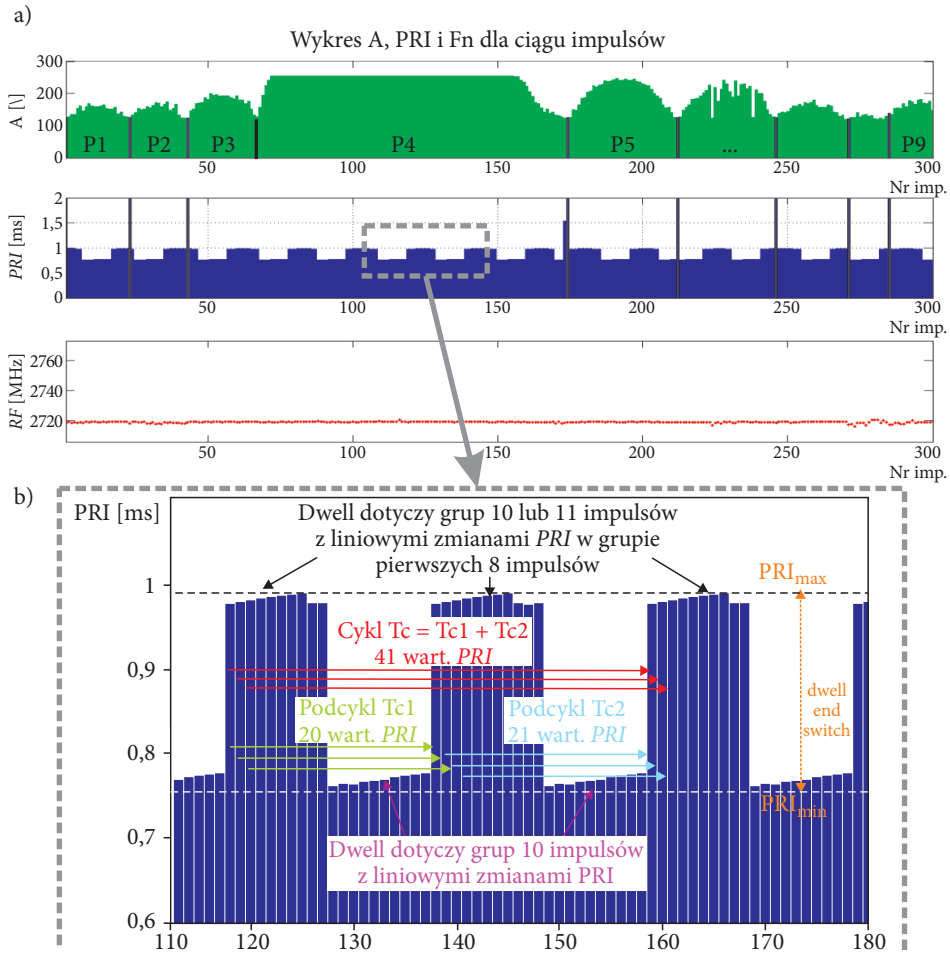
- duża liczba obliczeń i zajętości pamięci oraz brak możliwości prostego wyznaczenia K_c ;
- skupienie najliczniejsze nie zawsze odpowiada wartości T_c ze względu na zakłócenia, rozdzielczość skupiania i występowanie prążków subharmicznych.

Praktycznie odbierany ciąg pomiarów (rys. 20a) to zbiór fragmentów (paczek impulsów P1, P2, ..., P9) ciągu nadawanego. Wynika to:

- ze stosowania różnych metod skanowania przestrzeni przez rozpoznawany radar,
- z wykorzystywania przez radary anten o bardzo wąskich charakterystykach kierunkowych,
- z odbioru słabych energetycznie rozpoznawanych sygnałów radarowych,
- ze stosowania w urządzeniach rozpoznawczych anten o dużym zysku (ale też o wąskich charakterystykach).

Stąd często wynik analizy prowadzącej do wykrywania cyklu nie będzie zgodny z oczekiwaniami wynikającymi ze wzoru (9). Szczególnie będzie to widoczne w przypadku sygnałów o zmianach PRI typu *dwell and switch* o długich cyklach (T_c , K_c) zmian PRI. Taki sygnał pokazano w górnym oknie na rysunku 20.

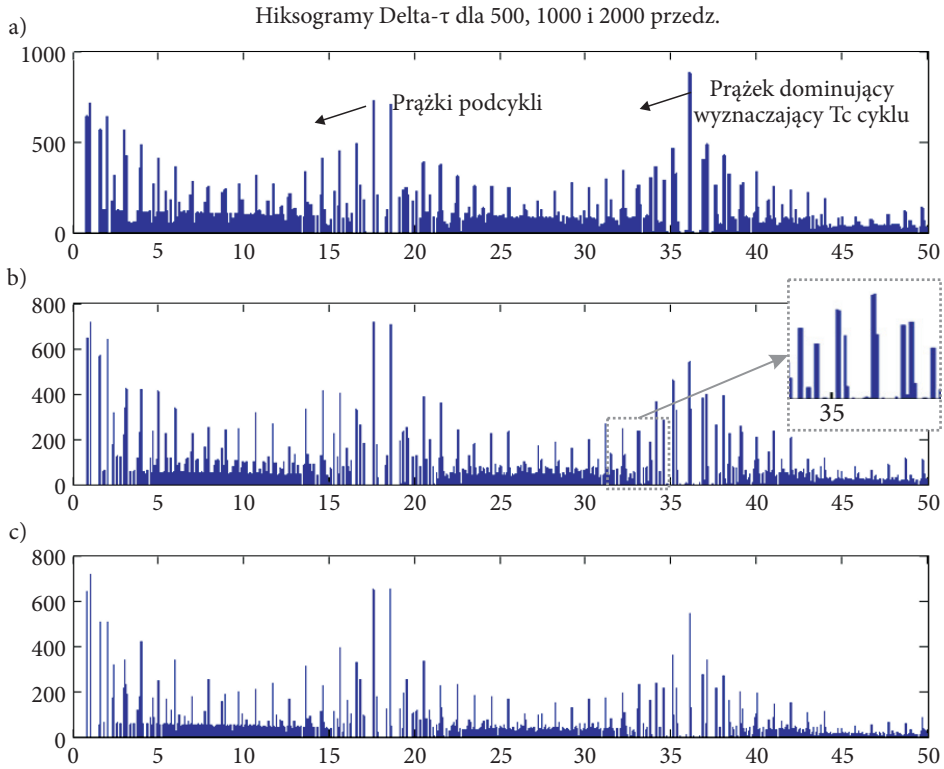
Przedstawiony na rysunku 20 sygnał składa się z paczek impulsów oznaczonych jako: P1, P2, ..., P9. Występowanie paczek wynika z omawianych czynników, takich jak skanowanie anteny radaru oraz skanowanie anteny urządzenia rozpoznawczego, a także z wpływu ich charakterystyk energetycznych. Dlatego niektóre paczki pochodzące np. z listków bocznych czy tylnych anten zawierają mało impulsów (często mniej impulsów niż długość cyklu rozpoznawanego sygnału (tu: $K_c = 41$ impulsów, a $T_c = 36,008$ ms)). Stąd w sygnale z rysunku 20 odstęp między 41 impulsami w wielu paczkach nie występują lub występują nielicznie i dlatego pojawia się dominacja ilościowa wskazująca na cykle krótsze (podcykle — rys. 20: zoom), co widać z histogramów przedstawionych na rysunku 21. Z analizy wynika, że w histogramie $\Delta\tau$ informację poprawną o czasie trwania cyklu $T_c = 36,008$ ms i jego długości $K_c = 41$ można uzyskać tylko z paczki P4. Pozostałe paczki w tym przypadku praktycznie nic nie wnoszą, co przekłada się na utrudnienie poprawnego wykrywania.



Rys. 20. a) Zobrazowanie ciągu wartości PDV sygnału ze zmianami PRI typu *dwell and switch*; b) powiększenie fragmentu (zoom) eksponujące szczegóły zmian PRI

Istotny wpływ na wykrywanie cyklu ma oczywiście wysokość prążka oceny liczności N skupienia.

Na rysunku 21 poprawny wynik uzyskano z histogramu a), gdzie prążek najwyższy jest przywiązany do wartości $T_c = 36,008$ ms. Nadmierna rozdzielczość histogramu (rys. b i c) prowadzi do „rozszcpień prążków” i w efekcie zmniejszenia liczności prążka dominującego (np. w histogramie rys. 21b).



Rys. 21. Histogramy Delta- τ dla badanego sygnału o długim cyklu PRI

Innym sposobem identyfikacji faktu istnienia cyklu może być etapowe (sekwencyjne) skupianie odstępów czasu między impulsami realizowane dla kolejnych wartości k ($k = 1, 2, 3, \dots, (z - k)$). Ich wynikiem będą wówczas zbiory skupień (7) otrzymywane dla każdego etapu k . Zakładając pamiętanie wyników etapowych, wówczas po zrealizowaniu wszystkich etapów można wyznaczyć parametry (T_c , K_c). Wartość T_c jest wartością d_{j^*} , której odpowiadają najbardziej liczne skupienia z wszystkich etapów k :

$$n_{j^*}^{k^*} = \max_{k \in [1, 2, \dots, (z-k)]} \left(\max_{i \in [1, 2, \dots, m_k]} n_i^k \right) \quad (10)$$

gdzie: m_k — liczba skupień na etapie k .

Parametr $K_c = k^*$ jest określony przez nr etapu k , dla którego (9) określono d_{j^*} .

W tej metodzie obliczenia dla zadanego k są prostsze niż dla histogramu Delta- τ , ale wymagane jest pamiętanie wyników z wszystkich kolejnych etapów k .

6. Algorytm sekwencyjnego wykrywania cyklu

Algorytm autorski sekwencyjnego wykrywania cykliczności ASWC bazuje na zasadzie budowy i analizy danych z histogramów Delta- τ tworzonych kolejno dla etapów z parametrem k , które są utożsamiane z hipotezą o długości cyklu $k = Kc$, gdzie $k = 1, 2, 3, \dots, k_{\max}$. Główna różnica polega na ograniczeniu liczby etapów k poszukiwania do zadanej wartości k_{\max} wynikającej z doświadczeń pomiarowych. Takie rozwiązanie zmniejsza też w istotny sposób wymagania pamięciowe. Jednak ograniczenie zakresu poszukiwania wymaga, by po każdym etapie k podjąć decyzję o wykryciu cyklu i zakończeniu poszukiwania lub też o kontynuacji obliczeń. Konieczne jest do tego zdefiniowanie wskaźnika wykrycia cyklu dla danego etapu k obliczeń i przyjęcie hipotezy ($T_c = d_{j^*}$, $Kc = k$), gdzie długość czasowa cyklu T_c jest określona przez najbardziej liczne skupienie odstępów czasu między k impulsami. Ocena wykrycia powinna dotyczyć tylko wartości T_c , gdyż wartość Kc będzie zgodna z numerem k bieżącego etapu. W ciągach niezakłóconych może być zastosowany prosty wskaźnik $W_0(T_c, k)$ (dalej wzór 15), jednak jego wartości są bardzo wrażliwe na zakłócenia. Pokazano to w wynikach badań w punkcie 7. W algorytmie zaproponowany został zmodyfikowany wskaźnik wykrycia cyklu (17). Badania wykazały, że jest on bardzo odporny na zakłócenia. Porównując wartość wskaźnika z progami (18), można rozstrzygnąć o dalszym przebiegu obliczeń. Wskaźnik wykrycia cyklu bazuje na informacji zawartej w zbiorach skupień (7) z każdego etapu „ k ” i relacjach (8) tych zbiorów ze zbiorami PRI oraz ich kombinacjami (Ω^{PRI} , Ω^{Kom}), a te są określone i dostępne już po etapie $k = 2$.

6.1. Własności zbioru skupień przy wyznaczaniu parametrów cyklu PRI

Dalej w punktach (11-14) podano własności zbiorów skupień (7) między k impulsami w dostatecznie długim ciągu z impulsów, w którym występuje cykl o parametrach (T_c, Kc) ($Kc \ll z$), a także pokazano powiązania ze zbiorami (Ω^{PRI} , Ω^{Kom}). Podane własności dotyczą zbioru skupień odstępów czasu między impulsami przy założeniu, że bieżący etap $k = Kc$ odpowiada etapowi, na którym istnieje cykl (T_c, Kc), a otrzymane zbiory skupień zostały uporządkowane według klucza, którym jest rosnąca wartości odstępów czasu d_i^k między parami impulsów. Zakłada się też, że zbiory skupień (7) nie przechowują informacji o skupieniach zawierających pojedyncze elementy — jeżeli w ciągu zidentyfikowano wykrywanie zakłóceń ZII (wg reguł (8)). Wówczas dla zbiorów skupień 7 można podać następujące własności:

1. Jeżeli w odbieranym ciągu impulsów nie występowały zakłócenia ZI i ZII, to zbiory (7):
 - będą zbiorami tylko jednoelementowymi ($L_k = 1$),

— elementy tych zbiorów będą spełniały relacje:

$$d_1^k - 3\delta_1^k \leq T_c \leq d_1^k + 3\delta_1^k; n_1^k = (z - k) \quad (11)$$

Oznacza to, że czas cyklu wynosi $T_c = d_1^k$.

2. Jeżeli występowały tylko zakłócenia ZI, to zbiory (7):

— będą zawierały $Lk > 1$ elementów,

— pierwsze elementy tych zbiorów (d_1^k, n_1^k) będą spełniały relacje:

$$d_1^k - 3\delta_1^k \leq T_c \leq d_1^k + 3\delta_1^k; n_1^k = \max_{i \in [1, 2, \dots, m]} n_i^k; n_1^k < (z - k) \quad (12)$$

Oznacza to, że czas cyklu wynosi $T_c = d_1^k$;

— w zbiorze D^k między elementami $d_i^k > d_1^k$ będzie zachodziła relacja:

$$(d_i^k - d_1^k) \in \{\Omega^{PRI} \cup \Omega^{kom}\}; \quad (i \in [2, \dots, Lk]).$$

3. Jeżeli występowały tylko zakłócenia ZII, to zbiory (7) będą miały własności:

— będą zawierały dużą liczbę $Lk \gg 1$ elementów,

— w zbiorze D^k ostatniemu elementowi d_m^k o indeksie m odpowiada największa liczność

$$n_m^k = \max_{i \in [1, 2, \dots, m]} n_i^k, \quad n_m^k < (z - k); n_i^k \ll n_m^k \quad (13)$$

dla $i \in [1, 2, \dots, Lk - 1]$

Oznacza to, że czas cyklu wynosi $T_c = d_m^k$.

4. Jeżeli występowały łącznie zakłócenia ZI i ZII, to zbiory (7) będą miały własności:

— będą zawierały $Lk \gg 1$ elementów,

— w zbiorze D^k będzie występował element d_t^k ($t \in [2, \dots, Lk]$) o maksymalnej liczności i nie będzie on elementem pierwszym ani ostatnim zbioru. Element ten będzie spełniał:

$$d_t^k - 3\delta_t^k \leq T_c \leq d_t^k + 3\delta_t^k; n_t^k = \max_{i \in [1, 2, \dots, m]} n_i^k; n_t^k < (z - k). \quad (14)$$

— niektóre z elementów d_p^k ($p = 1, 2, \dots, Lk, p \neq t$) będą spełniały relację:

$$(d_p^k - d_t^k) \in \{\Omega^{PRI} \cup \Omega^{kom}\}.$$

Z podanych własności dla zbiorów skupień (7) wynika, że wykrycie cyklu w niezakłóconym ciągu impulsów (własność 11) nie stwarza trudności (jedno skupienie, określona jego liczność). W przypadku zakłóceń zbiory nie mają tych własności, ale własności ciągu niezakłóconego mogą być przyjęte jako punkt odniesienia.

Należy tu też nadmienić, że na bieżącym k -tym etapie (dla $k > 2$) dostępna będzie informacja o wariancie zakłóceń (ZI, ZII) w analizowanym ciągu (na podstawie wzorów 8) — stąd też w procesie decyzyjnym wiadomo, jakich własności należy oczekiwać. Na przykład jeżeli zidentyfikowano tylko zakłócenia ZI, to na pewno etap $k > 2$, na którym liczność pierwszego skupienia nie jest największa, nie jest etapem właściwym do wyznaczenia długości cyklu K_c i wówczas poszukiwania należy kontynuować, zwiększając wartość k .

6.2. Wskaźniki oceny występowania cyklu PRI

Zakładając niezakłócony ciąg impulsów i bazując na własnościach (11), można zdefiniować wskaźnik $W_0(.) \in (0,1]$ wykrycia cyklu dla hipotezy ($T_c = d_{j^*}^k$, $K_c = k$). Wskaźnik definiuje wzór:

$$W_0(T_c \cong d_{j^*}^k, K_c = k) = \frac{n_{j^*}^k}{z - k}. \quad (15)$$

gdzie: j^* — określa indeks skupienia o maksymalnej liczbie $n_{j^*}^k$ odstępów z etapu k ,
 z — liczba impulsów.

We wzorze (15), ponieważ jest tylko jedno skupienie (wynika to z wzoru (11)), jego indeks $j^* = 1$. Z analizy wskaźnika $W_0(.)$ (15) widać, że będzie on podatny na wpływ zakłóceń. W przypadku wystąpienia np. ZI na etapie $k = K_c$, pojawi się (w zależności od intensywności zakłóceń) co najmniej kilka skupień. Stąd liczność skupienia najbardziej licznego (licznik (15)) musi być mniejsza niż w przypadku braku zakłóceń. Wartość $W_0(.)$ również będzie mniejsza. Jednak w omawianym przypadku wartość z (w mianowniku (15)) będzie też mniejsza niż faktyczna liczba impulsów generowanych przez radar, której nie znamy, co wpłynie na podniesienie wartości wskaźnika. Stąd należy oczekiwać, że wartości (15) będą niestabilne w warunkach zakłóceń ZI. Wskaźnik $W_0(.)$ dla oceny hipotezy o występowaniu cyklu w danym etapie k bazuje na ocenie statystycznej częstości występowania odstępów czasu między k -impulsami w analizowanym ciągu. Niestety występowanie zakłóceń zmniejsza częstość występowania prawdziwej sekwencji PRI. Dlatego należy oczekiwać, że to zjawisko będzie niekorzystnie wpływać na możliwości wykrywania długich cykli K_c . Z tego powodu zostanie przedstawiona modyfikacja sposobu obliczania oceny $W_0(.)$. Polega ona na analizie powiązań (skorzeń) najliczniejszego skupienia (j^*) z danego etapu k (w zbiorze 7) o parametrach $(d_{j^*}^k, n_{j^*}^k)$ z innymi skupieniami określonymi na etapie k . Zasada zostanie wyjaśniona przy założeniu, że w analizowanym ciągu zidentyfikowano (reguła 8) tylko zakłócenia typu ZI.

Wówczas początkowa wartość oceny skojarzenia wynosi $S(j^*) = n_{j^*}^k$, co odpowiada liczbie elementów j -tego, najbardziej licznego skupienia (w tym przypadku, ze względu na występowanie zakłóceń ZI, będzie to też skupienie o indeksie $j = 1$). Dla innych skupień o numerach p z etapu k wskaźnik skojarzenia ze skupieniem najliczniejszym j^* jest określany wzorem (16).

$$\bigvee_{p=j^*+1, j^*+2, \dots, Lk} (d_p^k - d_{j^*}^k) \in \{ \Omega^{PRI} \cup \Omega^{kom} \} \quad \text{to} \quad S(j^*) := S(j^*) + n_p^k \quad (16)$$

Relacja (8) pozwala na stwierdzenie, czy skupienie o numerze n powstało w wyniku braku jednego lub kilku kolejnych impulsów w ciągu (z zakłóceniami ZI). Prawdopodobnie zrealizowane skojarzenie (16) powinno powiązać wszystkie skupienia z k -tego etapu (własności 12), jeśli etap ten odpowiada etapowi $k = Kc$ i w ciągu nie występowały straty większej liczby kolejnych impulsów.

Przyjmując na etapie k hipotezę o parametrach cyklu ($T_c = d_{j^*}^k$, $K_c = k$), można zdefiniować wskaźnik liczbowej oceny wykrycia cyklu wykorzystujący ocenę $S(j^*)$ (16) skojarzenia skupień:

$$W_{sk} \left(T_c \cong d_{j^*}^k, K_c = k \right) = S(j^*) / \sum_{i=1}^{Lk} n_i^k, \quad (17)$$

gdzie: Lk — liczba skupień na etapie „ k ”,

j^* — indeks skupienia najbardziej licznego:

— $j^* = 1$ (jeśli ZI = True, ZII = False),

— $j^* = Lk$ (jeśli ZI = False, ZII = True),

— j^* - wynika z relacji: $n_{j^*} = \max_{i=1,2,\dots,Lk} n_i^k$ (jeśli ZI, ZII = True),

$S(j^*)$ — licznosc skojarzonych skupień ze skupieniem j^* , obliczana wg wzoru (16).

Podobnie można skojarzać skupienia, jeśli występują inne warianty zakłóceń. Wykorzystując wskaźnik $W_0(\cdot)$ lub $W_{sk}(\cdot)$ (w postaci (15) lub (17)), można określić kryterium wykrycia etapu k , na którym występuje cykl:

$$W \left(T_c \cong d_{j^*}^k, K_c = k \right) \left\{ \begin{array}{l} \text{Pr} - \text{wykryto cykl} \\ \text{Pr} - \text{brak cyklu} \end{array} \right. , \quad (18)$$

gdzie: Pr — założona wartość progu,

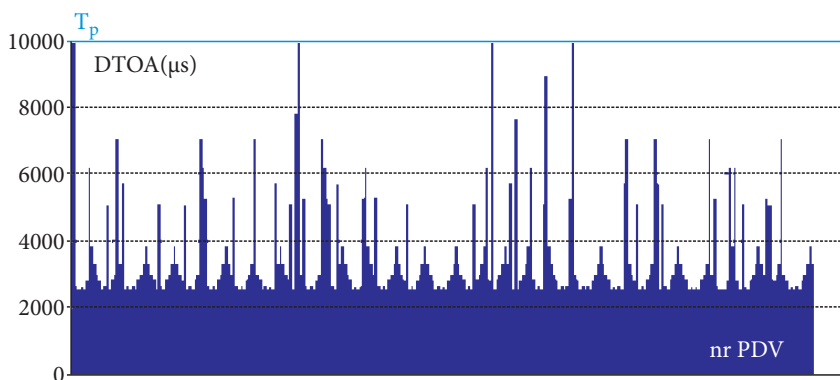
δ_{j^*} — dokładność T_c (odchylenie standardowe).

Przyjęta w (18) wartość progu Pr powinna być możliwie duża, by uniknąć wykrywania podcykli, które mogą występować w niektórych modach zmian PRI, co pokazano wcześniej na rysunku 20. Jednocześnie przyjęta wartość progu nie powinna uniemożliwiać wykrycia cyklu w warunkach intensywnych zakłóceń. Niewątpliwie dobór progu musi tu zależeć od wrażliwości wskaźnika $W_{Sk}(\cdot)$ na wzrost zakłóceń. Przedstawione dalej wyniki badań pozwalają ocenić ten wpływ.

7. Wyniki badań i wnioski

Podstawowym ciągiem badanym był niezakłócony ciąg parametrów PRI ze zmianami typu *stagger complex* o parametrach cyklu: $Kc = 12$ i $Tc \approx 34,268$ ms (fragment przedstawiono na rysunku 15). Był on ciągiem odniesienia. Taki niezakłócony ciąg generuje w histogramie Delta- τ najwyższy prążek odpowiadający skupieniu o wartości $Tc \approx 34,268$ ms. Na wszystkich czterech wykresach wyników badań na rysunku 23 ten prążek powoduje, że wskaźniki wykrycia cyklu $W_0(Tc, Kc = 12)$ i $W_{Sk}(Tc, Kc = 12)$ określone wzorami 15 i 17 przyjmują wartości maksymalne bliskie 1.0. Przedstawione na rysunku 23 wykresy:

- w kolumnie pierwszej dotyczą badań wskaźnika $W_0(\cdot)$ zapisanego wzorem 15,
- w kolumnie drugiej dotyczą badań zmodyfikowanego wskaźnika $W_{Sk}(\cdot)$ zapisanego wzorem 17.

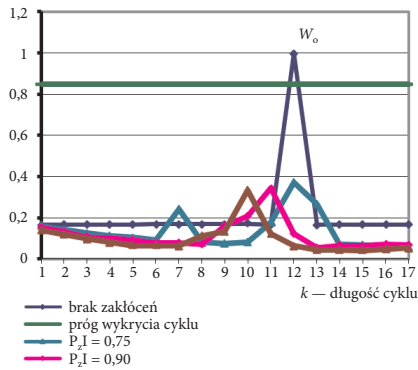


Rys. 22. Wizualizacja wpływu intensywnych zakłóceń ZI w procesie identyfikacji cyklu i wartości PRI

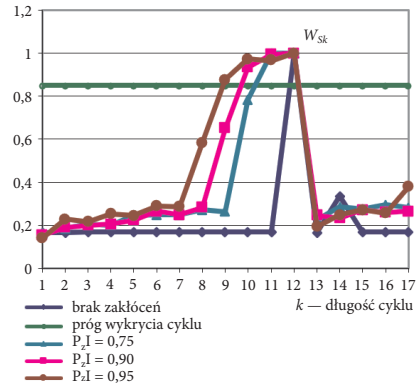
Oprócz wariantu bez zakłóceń na rysunku 23a przedstawiono wartości wskaźnika $W_0(\cdot)$ dla trzech innych wariantów z zakłóceniami ZI o różnej intensywności. Warianty te uzyskano, zakłócając losowo (równomiernie) dane pomiarowe z wariantu podstawowego ciągu, przedstawionego na rysunku 15. Poziom zakłóceń, np.: $PzI = 0,75$ (z rysunku 23a) jest tu rozumiany jako utrata 75% liczności skupienia maksymalnego uzyskiwanego w sygnale niezakłóconym. Wizualizacja danych dla

tego wariantu ciągu jest przedstawiona na rysunku 22. W podobny sposób należy interpretować zakłócenia o poziomie $PzI = 0,90$ oraz $PzI = 0,95$. Z rysunku 23a wynika, że ze wzrostem zakłóceń wartości wskaźnika $W_0(\cdot)$ (wzór 15) są mniejsze niż założony próg wykrycia 0,85. Potwierdza to wrażliwość wskaźnika $W_0(\cdot)$ na zakłócenia i wyklucza jego stosowanie do automatycznego wykrywania cyklu PRI.

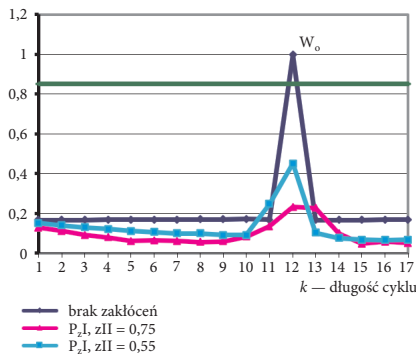
a) Wartości wskaźnika W_0 wykrycia cyklu o długości $K_c = 12$ dla niezakłóconego ciągu oraz dla ciągów o różnym poziomie zakłóceń ZI



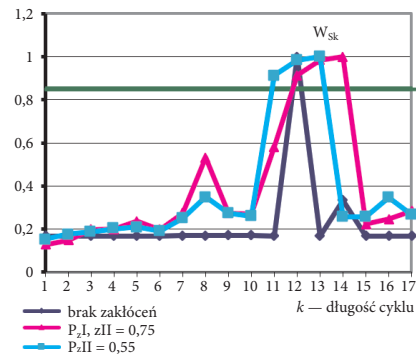
c) Wartości wskaźnika W_{Sk} wykrycia cyklu o $K_c = 12$ dla niezakłóconego ciągu oraz z różnym poziomem zakłóceń ZI



b) Wartości wskaźnika W_0 wykrycia cyklu o $K_c = 12$ dla ciągu niezakł. oraz z różnym poziomem jednocześnie występujących ZI i ZII



d) Wartości wskaźnika W_{Sk} wykrycia cyklu o $K_c = 12$ przy jednoczesnym występowaniu zakłóceń typu ZI i ZII



Uwaga. W celu poprawienia widzialności zmian obliczanych wartości wskaźników na wykresach punkty połączone liniami

Rys. 23. Wartości wskaźników W_0 i W_{Sk} wykrywania cyklu (K_c, T_c) dla różnych wariantów i zakłóceń PRI

W kolumnie 2 wykresów na rysunku 23c przedstawiono wyniki badań przy zastosowaniu zmodyfikowanego wskaźnika $W_{sk}(\cdot)$ zdefiniowanego wzorem (17) dla niezakłóconego ciągu odniesienia (jak na rysunku 15) i wariantów ciągów z intensywnymi zakłóceniami ZI. Badania były wykonane dla ciągów impulsów, identycznych jak w przypadku wyników z rysunku 23a. W tym przypadku (rysunek 23c) zawsze, niezależnie od zakłóceń ZI, identyfikowana jest poprawna długość czasowa cyklu T_c , ale zaniżona zostaje długość cyklu K_c (np. zamiast $K_c = 12$ jest 11).

Najtrudniejsze w analizie są ciągi z jednoczesnymi zakłóceniami ZI i ZII. Przykład takiego wariantu przedstawiono na rysunku 17, a wyniki badań dla wskaźnika $W_0(\cdot)$ przedstawiono na rysunku 23b.

Przy zastosowaniu wskaźnika $W_0(\cdot)$ nie jest możliwe wykrycie cyklu. Natomiast zastosowanie wskaźnika $W_{sk}(\cdot)$ zapewnia poprawne wykrycie cyklu, co widać z rysunku 23d.

Z przedstawionych wyników dla wskaźnika $W_0(\cdot)$ (rysunek 23a, b) widać, że:

- wartości wskaźnika $W_0(\cdot)$ są niestabilne — szybko maleją ze wzrostem ZI,
- jego wartości ulegają znaczącemu obniżeniu przy łącznym występowaniu ZI i ZII.

Niestabilność wskaźnika $W_0(\cdot)$ wyklucza jego stosowanie do automatycznego wykrywania cyklu PRI. Wartości wskaźnika $W_{sk}(\cdot)$ dla wariantów takich jak dla $W_0(\cdot)$ przedstawiono na rysunkach 23c, d.

Z przedstawionych na rysunkach 23c, d wykresów wyników badań wynika, że:

- wartości wskaźnika $W_{sk}(\cdot)$ przyjmują wartość maksymalną bliską 1,0 dla etapu $k = K_c$,
- ze wzrostem zakłóceń ZI wskaźnik $W_{sk}(\cdot)$ przyjmuje również wysokie wartości dla etapów $k < 12$, ale należy tu zaznaczyć, że w badaniach, aby uwidocznić różnice, celowo nie wykorzystywano własności (13) oraz (14). Ich uwzględnienie spowodowałyby, że wartość wskaźnika byłaby przyjmowana jako $W_{sk}(\cdot) = 0$, gdyż dla ZI = True i etapów $k = 8 \div 11$ skupienie najbardziej liczne nie jest skupieniem pierwszym (o $j^* = 1$),
- wartości $W_{sk}(\cdot)$ ulegają tylko niewielkiemu obniżeniu przy łącznym występowaniu ZI i ZII.

Badania potwierdzają, że wskaźnik $W_{sk}(\cdot)$ wykrycia cyklu ma oczekiwane cechy, które pozwalają na jego stosowanie w algorytmach automatycznego określania parametrów PRI. Analiza algorytmu ASWC umożliwia wyróżnienie jego następujących cech:

- wysoka niezawodność wykrywania cyklu w warunkach zakłóceń,
- wykrywanie cykli o złożonych strukturach PRI,
- wysoka dokładność wyznaczenia parametrów PRI,
- oszczędny ze względu na zapotrzebowanie pamięci.

Zasadnicze, bardziej czasochłonne operacje wynikają z sortowania zbioru odstępów w celu przyspieszenia ich grupowania, ale sortowane zbiory nie są liczne w stosunku do histogramu Delta- τ . Pesymistyczna szacowana złożoność obliczeniowa przy wykrywaniu cyklu o długości Kc w ciągu liczącym z impulsów wynosi $O(z, Kc) \approx 0,5 \cdot z^2$.

Podobne funkcje jak algorytm ASWC spełniają algorytmy opisane w pracy [5]. Bazują one na metodach macierzowych. Korzystają z pełnej macierzy odległości Delta- τ między impulsami (z^2 elementów). Wymagają jednak złożonych operacji, takich jak odwracanie macierzy. Pamiętanie danych i wyników wymaga dużej zajętości pamięci, a ich możliwości ograniczają się do wykrywania prostej struktury cyklu. Większe możliwości ma wersja algorytmu NASH, ale określanie zbioru wartości PRI jest złożone obliczeniowo. Algorytm NASH może być stosowany do wykrywania cykli w ciągach PRI typu *stagger*, ale jest on wrażliwy na zakłócenia.

Przedstawiając w rozdziale 5 cechy środowiska sygnałowego i wpływ czynników na pozyskiwanie dłuższych lub krótszych ciągów impulsów, akcentowano trudności przy wykrywaniu długich cykli, szczególnie w sygnałach ze zmianami *dwell and switch*. W rozdziale 5 zamieszczono także i omówiono przykładowe wyniki badań przy zastosowaniu histogramu Delta- τ . Wskazano wpływ różnych czynników na poprawność identyfikacji czasu trwania T_c cyklu. Pokazano wpływ rozdzielczości histogramu na poprawność identyfikacji T_c cyklu.

Źródło finansowania pracy — środki własne autora.

Artykuł wpłynął do redakcji 17.10.2023. Zatwierdzono do publikacji 8.11.2023.

Kazimierz Banasiak

<https://orcid.org/0000-0003-3517-0176>

LITERATURA

- [1] PARADOWSKI L., SZUTKOWSKI F., *Problemy rozpoznania i przeciwdziałania radioelektronicznego*, WAT, Warszawa 1986.
- [2] WILEY R.G., *Electronic Intelligence: The Analysis of Radar Signals*, Artech House, 1995.
- [3] ADAMY D., *EW 102. A First Course in Electronic Warfare*, Artech House, Boston – London 2004.
- [4] *Walka radioelektroniczna w radiolokacji*, paca zbiorowa, (red.) Pietrasiński J., Wyd. WAT, Warszawa 2019.
- [5] SHAHJOSEINI H.S., NASERI A., NADERI M., *A New Matrix Method for Pulse Train Identification: Implementing by Systolic Array*, Electrotechnical Conference, 2002, MELECON 2002, 11th Mediterranean, 7-9 May 2002, 183-187.
- [6] BANASIAK K., *Wybrane aspekty przetwarzania pomiarów sygnałów radarowych w zakresie bezpieczeństwa elektromagnetycznego*, Przedsiębiorstwo Przyszłości, 3(52), lipiec 2022.
- [7] BANASIAK K., *Wykrywanie sygnałów impulsowych w złożonych warunkach ich akwizycji*, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 60, 9, 2014, 722-725.
- [8] BANASIAK K., *Zastosowanie metod histogramowych w analizie sygnałów o długich cyklach okresu powtarzania impulsów*, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92, 1, 2016, 29-33.

K. BANASIAK

Selected aspects of measurement data processing in electronic warfare devices

Abstract. Electronic warfare (Polish acronym WRE - walka radioelektroniczna) is a set of military actions based on the use of the electromagnetic spectrum and it includes:

- reception and identification of electromagnetic emissions,
- reducing the effectiveness of the enemy's electronic devices,
- enabling effective use of the spectrum by own forces.

The task of the WRE in peacetime is to obtain information about radio-electronic devices, especially radars. These tasks are performed by ELINT (Electronic Intelligence) and/or ESM (Electronic Warfare Support Measures) devices. They operate passively in the 0.5-18 GHz band, their detection is difficult and the information they provide allows to detect a threat to own forces and to take appropriate countermeasures. Radar recognition is a complex process that involves the following stages. The first stage: gathering measurements and their grouping into the so-called packets and graphical display of the received pulse trains. The measurements are represented by the so-called measurement vectors (descriptors) containing signal parameters, including the TOA (Time of Arrival) pulse with nano-second accuracy. The second stage: associating pulse packets with logical sources in order to obtain representative data strings. This stage is signal sorting and deinterleaving. The third stage: estimation of the WS signal vector based on the associated pulse packets. The final stage of data processing is the comparison of the obtained signal descriptor parameters WS with Database (BD) radar patterns. The reconnaissance result allows for the assessment of the threat resulting from the operation of this radar. Radar recognition requires precise determination of many parameters of its signal. For pulsed radars, important parameters are the Pulse Repetition Interval (PRI) and the type of PRI modulation. Radars are characterised by a high complexity of PRI changes. This provides great utility and makes it possible to distinguish even radar units and changes in their locations. This allows for the detection and full identification of objects that use radars (e.g. ships) with the given object completely out of sight; it also allows to predict intentions of the target. The basic inter-pulse PRI modulations include: stagger, dwell and switch, jitter or sliding. PRI changes in radar signals may be periodic with long cycles, difficult to identify in cluttered conditions. Unfortunately, the received pulse trains are usually distorted. This makes the WS estimation process difficult - especially in automatic mode. PRI analysis has received much attention in the literature. The methods are computationally complex and have numerous limitations. This article presents ASWC algorithm (Sequential Cycle Detection Algorithm) of PRI proprietary, with relatively low computational complexity. Examples of test results confirming its high effectiveness in automatic PRI analysis performed under interference conditions were also presented.

Keywords: radars, electronic warfare, radar recognition, ELINT, ESM, pulse descriptor, PRI

DOI: 10.5604/01.3001.0054.6451

