

## Kazimierz BANASIAK

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA,  
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

# Wykrywanie sygnałów impulsowych w złożonych warunkach ich akwizycji

Dr inż. Kazimierz BANASIAK



Absolwent Wydziału Cybernetyki WAT, oficer WP. Zajmował się projektami informatycznymi, badaniami i wdrożeniami na rzecz wojsk. Od 1992 jest adiunktem na Wydziale Elektroniki WAT. Wykładowca przedmiotów dotyczących algorytmizacji, programowania, metod numerycznych, przetwarzania informacji, walki elektronicznej i przeciwdziałania oraz innych przedmiotów specjalistycznych. Współautor urządzeń i systemów rozpoznania sygnałów radarowych wdrożonych do produkcji.

e-mail: kbanasiak@wat.edu.pl

### Streszczenie

Skuteczność systemu rozpoznania elektronicznego ELINT / ESM zależy od częstotliwości, szerokości pasma pracy, warunków propagacji i jego lokalizacji. System może odbierać strumień impulsów pojedynczego radaru, ale często odbierane są zmieszane sygnały wielu źródeł (rys. 2). Proces pomiaru przypisuje do każdego impulsu wektor jego parametrów PDV. W artykule przedstawiono niektóre aspekty analizy strumienia PDV, skierunkowanej na identyfikację estymację parametrów okresu powtarzania impulsów [1, 2, 6] (PRI). Przedstawiono wyniki uzyskane przy wykorzystaniu funkcji autokorelacji Delta- $\tau$  i zespolonej transformaty PRI [2].

**Słowa kluczowe:** analiza PRI, przechwyt sygnałów, ELINT/ESM.

## The pulse signal detection in complex acquisition conditions

### Abstract

The effectiveness of electronic intelligence systems (1) ELINT/ESM (Fig. 1a) depends on the frequency, bandwidth, propagation conditions and system location. The system can receive a stream of pulses of a single radar, single radar pulses stream, however it is typical when multiple overlapping signals are observed (Fig. 2). The measurement process assigns a Pulse Descriptor Vector (1) to each signal pulse (Fig. 1b). The PRI [1, 2, 3] is an important parameter in the recognition of radar signals because of its distinctiveness (Fig. 3). The significant difficulty of PRI analysis is an existence of distortions (Fig. 4) arising from the propagation properties, overlapping stream pulses and interference during the measurement [1, 2, 3]. The paper presents some aspects of the PRI analysis on the basis of simulated and real signals (see Fig. 2). The presented results of the algorithm are based on the autocorrelation function Delta- $\tau$  [2, 3] and the complex PRI transform [2]. Fig. 7 illustrates the PRI for three observed overlapping signals with jitter PRI modulation of each. Figs. 8, 9, 11 show the results obtained by the histogram Delta- $\tau$ , and a method using a complex PRI transform. The research confirms the favourable features of the complex transform of the PRI in the recognition of radar emissions.

**Keywords:** PRI analysis, signal interception, ELINT/ESM.

## 1. Wstęp

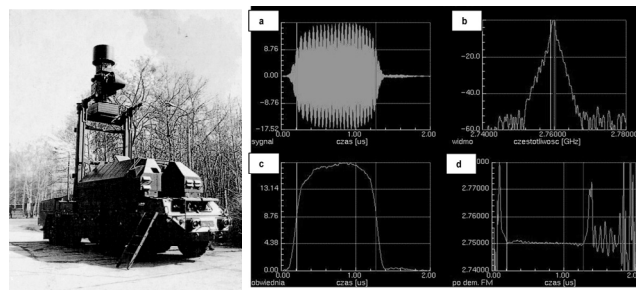
Urządzenia rozpoznawcze ELINT (Electronic Intelligence) lub ESM (Electronic Support Measure) wykorzystują do wykrywania sygnałów kanał szerokopasmowy z kierunkowym i dookólnym systemem antenowym. Możliwy jest wówczas odbiór sygnałów pojedynczych źródeł emisji (ZE) lub też sygnałów wielu ZE [1, 4, 6, 7]. Na rys. 1a przedstawiono tego rodzaju system, którym jest MUR-20 projektu WAT i Przemysłowego Instytutu Telekomunikacji. W urządzeniach ELINT/ESM każdemu odbieranemu impulsowi (rys. 1b) jest przyporządkowany wektor pomiarowy WP oznaczany jako PDV lub PDW (Pulse Descriptor Vector (Word)) [1, 3, 4, 6, 7]. Jego struktura zależy od możliwości pomiarowych urządzenia.

Obligatoryjnie PDV zawiera co najmniej poniższe parametry:

$$WP_i = PDV_i = \langle TOA, PW, A, F, AOA \rangle \quad (1)$$

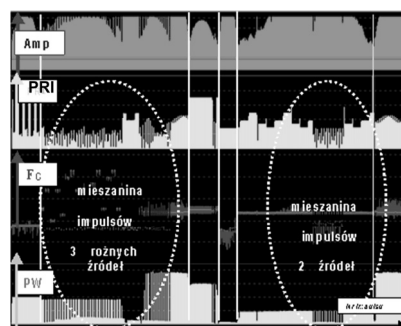
gdzie:  $i$  - indeks impulsu ( $i=0,1,2,\dots,N-1$ ),  $N$  - ilość impulsów;  $TOA$  - czas przyścia impulsu (Time of Arrival),  $PW$  - czas trwania impulsu (Pulse Width),  $A$  - amplituda,  $F$  - częstotliwość nośna (Frequency),  $AOA$  - kąt odbioru (Angle of Arrival).

Parametry czasowe WP impulsu (rys. 1a, 1c) są uzyskiwane w procesach pomiarowych wykorzystujących informację z toru odbiorczego AM (rys. 1a, 1c), a parametry częstotliwościowe z toru FM (rys. 1b, 1d).



Rys. 1a. System ELINT/ESM Rys. 1b. Charakterystyka pomiarowa impulsu  
Fig. 1a. ELINT/ESM system Fig. 1b. The measurement pulse characteristic

Rys. 2 przedstawia wizualizację parametrów WP w środowisku, w którym pracuje kilka źródeł sygnałów. Wykres pierwszy (górny) przedstawia amplitudy ciągu impulsów, wykres drugi przedstawia różnice czasów przyścia par kolejnych impulsów  $\Delta TOA_i = TOA_{i+1} - TOA_i$  (gdzie  $i=0,1,2,\dots,N-2$ ). Różnice czasów przyścia są wartościami okresów powtarzania impulsów- PRI (Pulse Repetition Interval), jeśli ciąg impulsów, w przedziale obserwacji, pochodzi tylko od jednego źródła i odebrane zostały wszystkie impulsy. Stąd na wykresie widoczne są charakterystyczne „obrazy” odpowiadające różnym modom zmian PRI. Wykres trzeci przedstawia częstotliwość nośną i jej zakres zmian w ciągu impulsów, a wykres 4 przedstawia czasy trwania impulsów.



Rys. 2. Przykład odbieranego strumienia impulsów  
Fig. 2. Example of the received pulse stream

Odbierany strumień impulsów (rys. 2) zawiera:

1. ciągi impulsów pojedynczych ZE,
2. zmieszane ciągi impulsów różnych ZE,
3. przerwy w napływie impulsów (rys. 2-białe, pionowe linie),
4. zakłócenia.

Rozpoznawanie pojedynczego ZE wymaga:

1. skojarzenia ciągów WP z poszczególnymi, logicznymi ZE (sortowanie/rozplatanie (deinterleaving)) [1, 2, 3, 4, 7],
2. określenia wektora sygnałowego WS dla każdego ZE:

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

gdzie:  $D_{PRI}$  - deskryptor PRI,  $D_{FC}$  - deskryptor częstotliwości,  $I$  - inne (np. czas trwania impulsu, kąt odbioru, itp).

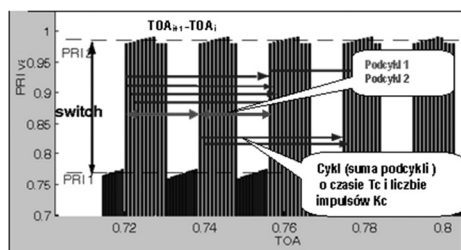
Definicję PRI może stanowić w WS kilkadziesiąt lub więcej wartości liczbowych opisujących szczegóły PRI (rys. 3).

3. porównywania WS z bazą danych (BD) i podjęcia decyzji o wykryciu nowego ZE lub potwierdzeniu ponownego wykrycia znanego źródła.

Skojarzone z pojedynczym źródłem ciągi WP wielu paczek (grup) impulsów pozwalają na określenie szerszej charakterystyki sygnału dla tego ZE (Interpulse Signal Analysis). Istotne wartości informacyjne wnosi charakterystyka sposobu powtarzania impulsów PRI [1, 6]. Jest ona ściśle związana z funkcją radaru i odzwierciedla tryb (mod) jego pracy [1], ale pełne określenie charakterystyki PRI wymaga niekiedy odbioru długich, niezakłóconych ciągów impulsów - tak jak to pokazano na rys. 3, dla trybu skokowej zmiany PRI (przełączania między dwiema grupami zbliżonych do wartości średnich: PRI1 i PRI2 - tryb dwell and switch).

Deskryptor  $D_{PRI}$  (2) zawiera parametry PRI [1,6] takie jak:

- sposób zmian PRI w sygnale, który może być:
  - stały (fixed, stable) lub stały niestabilny (jitter), płynnie zmienny (sliding), przemienny dyskretny prosty i złożony (stagger, stagger complex), skokowy przełączany (dwell and switch), losowy dyskretny (random),
- parametry cyklu PRI.



Rys. 3. Przykład sygnału z PRI o modzie Dwell and Switch  
Fig. 3. The example PRI for a Switch and Dwell mode

Pod pojęciem cyklu PRI rozumiane jest okresowe powtarzanie się w sygnale sekwencji wielu różnych wartości PRI. Parametrami cyklu są: jego okres -  $T_c$ , długość  $K_c$  określająca liczbę impulsów tworzących cykl oraz zbiór wartości PRI. W sygnałach rzeczywistych, niektóre z wartości PRI mogą występować w cyklu wielokrotnie, na różnych pozycjach cyklu, dlatego w definicji cyklu niezbędnym jest także relacja porządku występowania wartości PRI. Deskryptor  $D_{PRI}$  powinien zawierać poniższe składowe:

$$D_{PRI} = \langle L, \{PRI_i, w_i, \delta_i\}_1^L, \{T_c, K_c, \delta T_c\}, \{x_j \times PRI_{sj}\}_1^S \rangle. \quad (3)$$

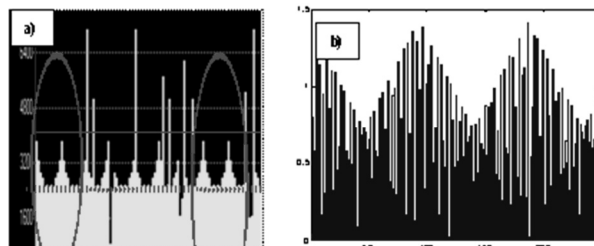
gdzie:  $\{PRI, w, \delta\}$  - zbiór  $L$  wartości PRI, częstości ich występowania i odchylenia standardowe  $PRI_i$ ,  $\{T_c, K_c, \delta T_c\}$  - czas cyklu PRI, liczba wartości tworzących ( $K_c \geq L$ ) i odchylenie standardowe  $T_c$ ,  $S$  - liczba grup wartości  $\{PRI\}$  w cyklu;  $L \leq S \leq K_c$ ,  $x_j$  - liczba powtórzeń każdej z wartości PRI w grupie  $S_j$

W praktyce, automatyczne określenie parametrów cyklu PRI jest trudne ze względu na zakłócenia [1, 4, 5, 6, 7] wynikające z:

- a) wielodrogowości odbioru sygnałów (multipath);
- b) relacji energetycznych impulsów z progami wykrywania,
- c) ze zmian częstotliwości sygnału (frequency agile).

Zakłócenia utrudniają lub uniemożliwiają występowanie niezakłóconych fragmentów ciągu - niezbędnych do określenia  $D_{PRI}$  [6]. Efektami zakłóceń (rys. 4a) w ciągu impulsów jest „gubienie” (missing) impulsów, oznaczane dalej jako ZI lub też „wtrącenia” impulsów nie pochodzących od danego źródła - dalej oznaczane jako ZII. Występowanie zakłóceń ZI powoduje, że różnica czasu  $\Delta TOA$  przyjęcia kolejnych dwu impulsów danego ZE jest większy niż  $PRI_{max}$  (bo jest kombinacją liniową dwu lub więcej wartości PRI), a występowanie ZII powoduje, że w ciągu występują losowe

wartości mniejsze niż rzeczywista wartość  $PRI_{min}$ . Na rys. 4a fragmenty ciągu o wartościach PRI z przedziału  $[PRI_{min}, PRI_{max}]$ , sprzyjające estymacji parametrów  $D_{PRI}$ , zaznaczono elipsą. Zakłócenia wynikające z wielodrogowego odbioru powodują z kolei powstanie złożonych superpozycji dwóch lub więcej sygnałów reprezentujących to samo ZE - rys. 4b.



Rys. 4. a) Sygnał z PRI stagger complex przy występowaniu zakłóceń

b) Różnice TOA dla sygnału z wielodrogowością odbioru

Fig. 4. a) The PRI stagger mode plus noise

b) The difference of TOA signal received in a multipath way

Powyżej przedstawiono zarys estymacji parametrów  $D_{PRI}$ , z wykorzystaniem pomiarów TOA. Poprawne wyznaczenie  $D_{PRI}$  pomaga też w estymacji parametrów częstotliwościowych  $D_{FC}$ .

## 2. Sortowanie ciągów impulsów

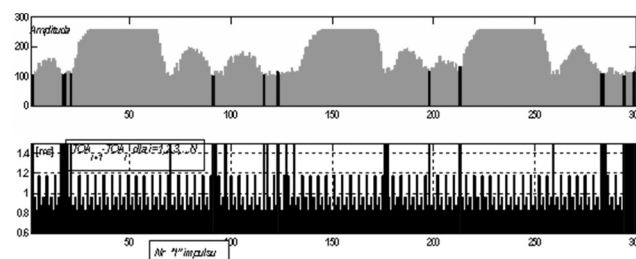
Pierwszym etapem analizy odbieranej informacji pomiarowej jest sortowanie (grupowanie) impulsów wg kąta AOA oraz według częstotliwości. Dalsza analiza dotyczy już jednej z tak wydzielonych grup impulsów. Wówczas analiza TOA pozwala na ewentualny, dalszy podział wydzielonego ciągu impulsów na kolejne, rozłączne grupy (paczki) - pionowe, białe linie na rys. 2. Ostatecznie źródłem każdego z wydzielonych ciągów impulsów może być: pojedyncze ZE (paczka jednorodna) bądź też więcej ZE (paczka niejednorodna). Wyodrębnienie w strumieniu danych paczek jednorodnych, pozwala na ich kojarzenie w logiczne źródła [7], określenie liczby tych ZE i odpowiadających im WS. Trudności sprawia zapewnienie automatycznej analizy w przypadku niejednorodnego ciągu impulsów, a w szczególności, jeśli mieszanie impulsów tworzą sygnały z PRI typu jitter [2]. Problemy ten (deinterleaving) jest przedmiotem dalszych rozważań.

Jeśli przez  $t_n$  oznaczyć TOA  $n$ -tego impulsu ( $n=0,1,2,\dots,N-1$ ), to odebrany ciąg impulsów opisuje funkcja:

$$f(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \delta(t - t_n). \quad (4)$$

gdzie:  $\delta(t)$  - jest jednostkową funkcją delta Diraca,  $t_n$  - wartości TOA odebranych impulsów.

Przykład ciągu opisanego funkcją  $f(t)$  przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Przykład ciągu impulsów ze zmianami PRI typu stagger

Fig. 5. Example of the pulse stream with stagger PRI

Ciąg składa się z kilku paczek impulsów jednego źródła ze zmianami PRI typu stagger o czterech różnych wartościach PRI.

Autokorelacja funkcji  $f(t)$  jest określana [1,2] wyrażeniem:

$$h(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)f(t-\tau)dt = \int_{-\infty}^{\infty} \left( \sum_n \delta(t-t_n) \left( \sum_k \delta(t-t_k-\tau) \right) \right) dt \quad (5)$$

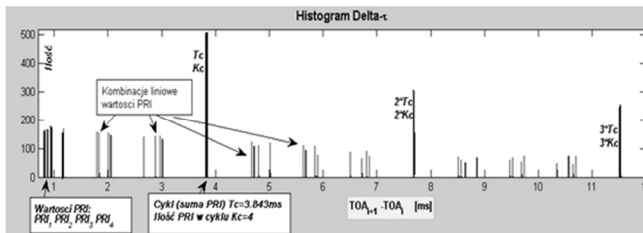
Całka funkcji autokorelacji w przedziale jednostkowym jest określona przez wyrażenie:

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} h(t)d\tau = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \sum_n \sum_k \delta(t_n - t_k - \tau) d\tau \quad (6)$$

Funkcja podcałkowa równania (6) istnieje dla par impulsów, których czasy przyścia spełniają zależność:

$$\tau_1 < t_n - t_k < \tau_2 \quad (7)$$

Tak więc całkowita liczba par impulsów, takich że ich czasy przyścia spełniają (7), jest równa całce (6) funkcji autokorelacji  $h(\tau)$  w granicach od  $\tau_1$  do  $\tau_2$ . Histogram, który jest zdefiniowany dla pewnego zakresu  $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$  w postaci  $K$  przedziałów jest określany histogramem Delta- $\tau$  [1, 2]. Rys. 6 przedstawia rozkład odstępów  $\Delta TOA$  w postaci histogramu Delta- $\tau$  dla ciągu impulsów z rys. 5. Najwyższy prążek histogramu z rys. 6 umożliwia precyzyjne określenie deskryptora  $D_{PRI}$  wektora WS (2). Gdy histogram jest wykonywany dla zmieszanych impulsów różnych ZE to zawiera on zmieszane histogramy Delta- $\tau$  sygnałów składowych oraz szum, który jest efektem losowych (mało powtarzalnych) różnic  $\Delta TOA$  między impulsami różnych źródeł.



Rys. 6. Histogram Delta- $\tau$  dla sygnału z zmiennymi zmianami PRI  
Fig. 6. The Delta- $\tau$  histogram for a stagger PRI signal

Utрудnieniem automatycznej interpretacji informacji zawartej w histogramie funkcji autokorelacji jest występowanie tzw. prążków subharmonicznych, (wielokrotności  $T_c$  - rys. 6) oraz ewentualne występowanie podcykli (rys. 4). Istnieją algorytmy, które próbują unikać prążków subharmonicznych np. sekwencyjny histogram różnicowy (Sequential Difference Histogram - SDIF) [3, 4], ale wymagają one współpracy z operatorem i mogą być stosowane tylko w systemach klasy ELINT, gdzie czas jest nieistotny.

### 3. Rozplatanie zmieszanych ciągów impulsów

Z literatury [2] wynika, że tłumienie prążków subharmonicznych można osiągnąć bazując na zespolonej wartości całki autokorelacji. W efekcie tego można otrzymać „widmo”, którego wartości szczytowe wskazują np. podstawową wartość PRI lub też PRI sygnałów zmieszanych. Niżej podana całka nosi nazwę transformaty PRI [2] (PRI transform):

$$D(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)f(t+\tau)\exp(2\pi i t / \tau) dt \quad (8)$$

W tej postaci transformata PRI jest podobna do funkcji autokorelacji  $C(\tau)$ , a także do transformaty Fouriera. Dokonując odpowiednich przekształceń [2] można uzyskać postać zespoloną dla ciągu impulsowego:

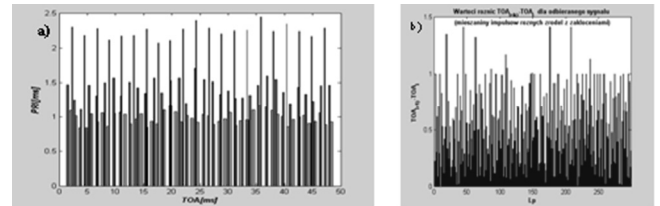
$$D(\tau) = \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=0}^{n-1} \delta(\tau - t_n + t_m) \exp[2\pi i t_n / (t_n - t_m)] \quad (9)$$

$$D(\tau) = C(\tau) \exp[2\pi i t_n / (t_n - t_m)]$$

gdzie:  $C(\tau)$ - funkcja autokorelacji.

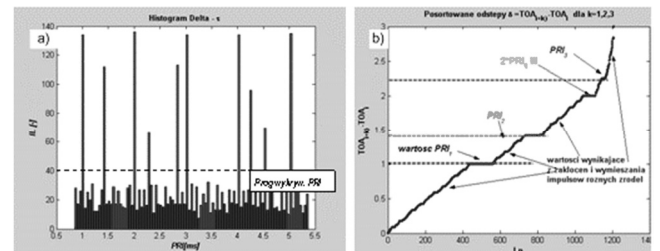
Różnica pomiędzy transformatą PRI a funkcją autokorelacji jest taka, że transformata posiada współczynnik fazy pomagający w tłumieniu subharmonicznych w funkcji autokorelacji.

Rys. 7a przedstawia kolejność występowania impulsów trzech różnych ZE o PRI typu jitter w czasie ok. 50 ms. Impulsy w zmieszonym ciągu wyróżnia wysokość prążka i grubość. Założone w symulacji wartości PRI wynosiły:  $PRI_1=1\text{ms}$ ,  $PRI_2=1.41\text{ms}$ ,  $PRI_3=2.25\text{ms}$  a ich jitter 10%. Z punktu widzenia analizy PRI wejściową informacją jest ciąg różnic czasów przyścia- jak na rys. 7b, a odpowiada mu histogram Delta- $\tau$  w postaci jak na rys. 8a. Wykresy na rys. 8a i 8b są wynikiem symulacji 3 ZE (jak na rys. 7a), ale dla małej (0.5%) wartości niestabilności PRI.



Rys. 7a. Przykład zmieszanego ciągu  $f(t)$  dla 3 ZE o PRI typu jitter  
Fig. 7a. Example  $f(t)$  for three overlapping signals with jitter PRI  
Rys. 7b. Różnice czasów przyścia impulsów  
Fig. 7b. Differences of signal arrival times

W sytuacjach jak przedstawione na rys. 7, informacji uzyskanych z histogramu Delta- $\tau$  (rys. 8a) nie można bezpośrednio wykorzystać do ustalenia liczby sygnałów, bo trudno tu w sposób automatyczny wykryć dominujące prążki. Informacja dostarczana przez histogram musi być dodatkowo, szczegółowo analizowana w sensie powiązań poszczególnych wartości. Fragment interpretacji pierwszych prążków histogramu Delta- $\tau$  z rys. 8a przedstawiono na rys. 8b. Wysokość prążka histogramu wynika z liczności podzbioru, zbliżonych do siebie wartości  $\Delta TOA$  (widoczne wypłaszczenia odcinków krzywej na wykresie- dłuższe wypłaszczenia to wyższy prążek histogramu).



Rys. 8a. Histogram Delta- $\tau$  dla trzech zmieszanych sygnałów z PRI jitter  
Rys. 8b. Interpretacja prążków histogramu Delta- $\tau$   
Fig. 8a. The Delta- $\tau$  histogram for three overlapping signals with jitter PRI  
Fig. 8b. The interpretation of a Delta- $\tau$  histogram

Na rys. 9 przedstawiono moduł transformaty  $D(\tau)$  obliczony dla zmieszanego ciągu 310 impulsów 3 ZE z małym 0.5% jitterem. Z wykresu widoczna jest możliwość identyfikacji PRI dla 3 ZE, a estymowane wartości PRI odpowiadają wartościom średnim PRI sygnałów przyjętych w badaniach tj. 1.0, 1.41 i 2.25 ms. Identyfikowana jest również ilość impulsów poszczególnych źródeł w zmieszonym ciągu. Ilościowo zidentyfikowano ok. 80% impulsów. Efekt tłumienia prążków subharmonicznych można ocenić drogą porównania funkcji autokorelacji  $C(\tau)$  z rys. 8a z transformatą  $D(\tau)$  na rys. 9a. Na rys. 9b przedstawiono również zespoloną wartość transformaty  $D(\tau)$ . Pozwala ona również na identyfikację liczby ZE, liczności zbioru PRI poszczególnych ZE oraz dodatkowo przesunięć fazowych ciągów impulsów poszczególnych ZE. Wyniki te dotyczą zmieszanego ciągu impulsów 3 ZE - tak jak na rys. 7 ale dla małej wartości jitter.

Przedstawione poglądowo, cząstkowe wyniki badań są zachęcające do stosowania transformaty do rozplatania ciągów impulsów w paczkach niejednorodnych. Bardziej dokładne badania pokazują, że jakość wyników zastosowania transformaty ulega bardzo szybkiemu pogorszeniu ze wzrostem niestabilności PRI w sygnałach superpozycji.

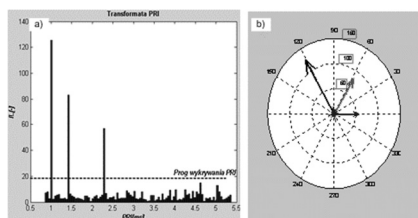
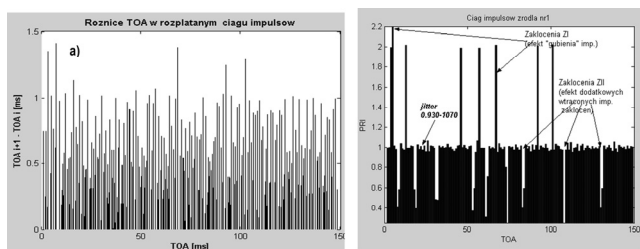


Fig. 9. Histogram wartości transformaty PRI (Rys. b – wykres typu compass)  
Fig. 9. Histogram for the PRI transform (Fig. 9 b – compass chart)

Transformata nie radzi sobie też z sygnałami typu stagger o wielu stabilnych wartościach PRI i parametrach cyklu ( $T_c, K_c$ ). Taka klasa sygnałów jest traktowana jako superpozycja  $K_c$  ciągów impulsów stałej wartości  $PRI=T_c$  i przesuniętych względem siebie w czasie o wartości  $PRI_1, PRI_2, \dots, PRI_{K_c}$ . Powoduje to, że są one traktowane tak, jak prążki subharmoniczne (wielokrotności  $T_c$ ) i znikają całkowicie z histogramu. Również pojawienie się zakłóceń ZI i ZII w zmieszonym ciągu powoduje istotne pogorszenie wyników rozplatania. Natomiast niewątpliwie transformata PRI w swej definicyjnej formie jest doskonała do identyfikacji i rozplatania źródeł o stałym PRI lub źródeł z niewielkim jitterem. Transformata  $D(\tau)$  była inspiracją do poszukiwania rozwiązań poszerzających obszar jej przydatności i przyczyniła się do powstania własnej modyfikacji algorytmu. Algorytm jest przedmiotem badań i analiz, i nie jest tu omawiany, ale zostaną przedstawione przykładowe możliwości identyfikacji parametrów PRI przy jego wykorzystaniu do analizy zmieszanych ciągów o niestabilnych wartościach PRI (duży jitter). Przedmiotem badań były krótkie (trwające ok. 150 ms) paczki zmieszanych impulsów 3 źródeł o PRI typu jitter z wartościami średnimi: 1.0, 1.41 i 2.25 ms). Do celów badań przyjęto następujące założenia symulacji:

- o każde źródło ZE generuje ciąg impulsów o zadanych parametrach PRI i dużej wartości jitter do 10%,
- o losowo generowane są straty niektórych impulsów (do 10%),
- o losowo są generowane momenty TOA wystąpienia impulsów zakłóceń (do 10%);

Uwzględniając superpozycję sygnałów dla powyższych warunków uzyskiwano zmieszane ciągi impulsów. Na rys. 10a przedstawiono graficzną interpretację jednego z analizowanych ciągów impulsów, który jest mieszaniną impulsów trzech ZE. Wizualnie widoczne jest duże zróżnicowanie i brak regularności zmian. Natomiast na rys. 10b przedstawiono odstępy czasu, które reprezentowały PRI o niestabilnej wartości około 1 ms, w jednym z trzech składowych sygnałów badanej superpozycji z rys. 10a.

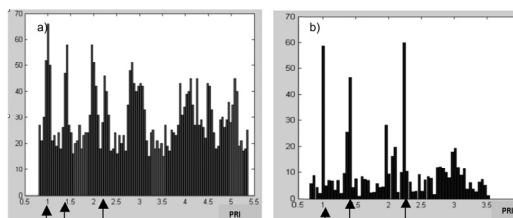


Rys. 10a. Różnice TOA dla badanego ciągu zmieszanych impulsów  
Rys. 10b. Wykres PRI dla jednego ze zmieszanych sygnałów  
Fig. 10a. Differences of the TOA for pulse stream analysis  
Fig. 10b. The PRI chart for one of overlapping signals

Stosując do zdefiniowanej wyżej sytuacji pomiarowej postać definicyjną transformaty PRI nie udaje się ustalić prążków identyfikujących PRI sygnałów, jak w przypadku omawianej wcześniej sytuacji pomiarowej z rys. 9. Wyniki dla zmodyfikowanego algorytmu przedstawiono na rys. 11. Na rys. 11a przedstawiona została funkcja autokorelacji, a na rys. 11b zmodyfikowaną transformata  $D(\tau)$ . Strzałki wskazują rzeczywiste wartości PRI sygnałów zmieszanych.

Z wyników widać, że mimo dużej niestabilności PRI, oraz występowania ZI i ZII, zmodyfikowany algorytm umożliwił prawidłowe wykrycie ilości ZE i ich wartości PRI, a histogram z rys. 11b jest bardziej przejrzysty niż histogram z rys. 11a, przez co jest

bardziej przydatnym do automatycznego podejmowania decyzji. W niektórych wariantach badań nie wykrywano źródła nr 3 o wartości  $PRI=2.25$ ms. To źródło jest reprezentowane najmniejszą liczbą impulsów w ciągu. Widoczny jest też, nie całkowicie wytłumiony prążek odpowiadający wartości  $2 \cdot PRI_1=2$  ms.



Rys. 11a. Histogram Delta- $\tau$  Rys. 11b. Transformata PRI  
Fig. 11a. The Delta- $\tau$  histogram Fig. 11b. The PRI transform

Mimo tych wad transformata PRI może być jednym z narzędzi do analizy zmieszanych ciągów impulsów, ukierunkowanym na wstępną selekcję sygnałów o stałym PRI i typu jitter.

## 4. Podsumowanie

Celem urządzeń rozpoznawczych jest identyfikacja źródła emisji, każdego wykrytego sygnału. Istotnym problemem jest automatyzacja przetwarzania pomiarów w urządzeniach ESM, w których czas wykrycia jest istotny. Wymaga ona opisanych wcześniej etapów przetwarzania danych pomiarowych, a jej efektem jest estymacja  $WS(2)$ , stanowiącego swoisty odcisk palca sygnału rozpoznawanego ZE. Ostatnim etapem przetwarzania jest porównanie deskryptora  $WS$  z wzorcami sygnałów przechowywanymi w bazie danych. Wynikiem jest potwierdzenie pracy znanego ZE lub też na wykrycie nowego ZE. Kluczowa dla rozpoznawania, estymacja parametrów  $WS$ , musi być poprzedzona procesem sortowania, a czasami też tzw. rozplatania w przypadku całkowicie zmieszanych ciągów impulsów. W artykule przedstawiono rozplatanie bazujące na histogramie Delta- $\tau$  i zespolonej transformacie PRI [2]. Z badań wynika, że główną jej wadą jest mała odporność na wahania PRI (jitter) oraz na zakłócenia typu ZI i ZII. Opracowano modyfikację algorytmu obliczeń, pozwalającą na stosowanie transformaty również w przypadku sygnałów o znaczącej niestabilności PRI (jitterze). Z przeprowadzonych badań wynika, że zespolona transformata PRI może być narzędziem wstępnej analizy pomiarów pod kątem wykrywania w odbieranych, zmieszanych ciągach impulsów emisji impulsowych o stałych lub niestabilnych wartościach PRI.

## 5. Literatura

- [1] Wiley R. G.: Electronic Intelligence: The analysis of radar signals. Second edition, Artech House, Boston, 1993.
- [2] Nishiguchi K., Kobayashi M.: Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals. IEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, tom 36, nr 2, 04.2000.
- [3] Mardia H.K.: New Techniques for the deinterleaving of repetitive sequences. IEE Proceedings, Vol.136, No.4, 1989.
- [4] Milojevec D.J., Popovic B.M.: Improved Algorithm for the dinterleaving of radar pulses. IEE Proceeding, Communications, Radar and Signal Processing, T. 139, nr 1, 02.1992.
- [5] Banasiak K., Pieniężny A. SACD algorithm of pulse stream analysis, XVII International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON-2008, 19-21 May, Wrocław, Poland, pp.241-244, 2008.
- [6] Banasiak K.: Automatyzacja przetwarzania pomiarów w rozpoznawaniu sygnałów impulsowych, Przegląd Elektrotechniczny, R87, Nr 9a/2011, pp. 12-19.
- [7] Banasiak K.: Wybrane aspekty monitorowania źródeł sygnałów w urządzeniach rozpoznania elektronicznego, Przegląd Elektrotechniczny, R89 Nr 9/2013, pp. 66-71.