

doi:10.15199/48.2016.01.07

## Zastosowanie metod histogramowych w analizie sygnałów o długich cyklach okresu powtarzania impulsów

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono problem wykrywania cyklu okresu powtarzania impulsów PRI (Pulse Repetition Interval), ważny w rozpoznawaniu sygnałów radarowych. Pomiar parametrów sygnału, ich przetwarzanie, identyfikację typów, egzemplarzy i ich przeznaczenia oraz namiary i lokalizację pracujących źródeł realizują urządzenia walki elektronicznej ELINT/ESM. Urządzenia te wykorzystują tory szerokopasmowe do szybkiego wykrywania i opcjonalnie tory wąskopasmowe do precyzyjnej analizy sygnałów. W środowisku pomiarowym występuje duża liczba sygnałów o złożonych sposobach ich zmian oraz różnorodne zakłócenia. Utrudnia lub uniemożliwia to automatyczne przetwarzanie i często wymaga interwencji operatora, powodującej wydłużenie rozpoznania. W artykule przedstawiono zarys zweryfikowanego praktycznie autorskiego algorytmu, pozwalającego na automatyzację wykrywania długich cykli PRI w rozpoznawanych sygnałach radarowych.

**Abstract.** Radar recognition is a process based on signal acquisition and analysis of their specific characteristics of their parameters. One of the important parameters is the pulse repetition period (PRI) and cyclical nature of its changes. Detection of the specific nature of the PRI hinder long cycles and a variety of noise measurement acquisition. The article presents a proven, proprietary algorithm that solves this problem. **Analysis of signals with long pulse repetition period**

**Słowa kluczowe:** Systemy ELINT/ESM, rozpoznawanie radarów, analiza okresu powtarzania impulsów, przechwyt sygnałów.

**Keywords:** ELINT/ESM, recognition of radar emitters, PRI analysis, signal interception.

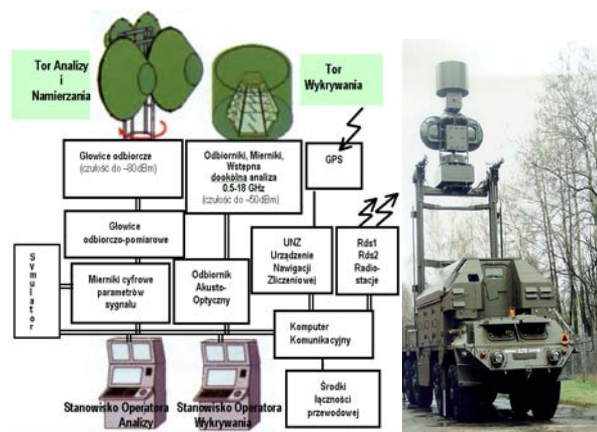
### Wprowadzenie

Współczesne wojska są wyposażone w różnorodne urządzenia promieniujące energią elektromagnetyczną. Szczególnie ważne są urządzenia radiolokacyjne, które są związane z systemami kierowania uzbrojeniem i mogą skutecznie przyczynić się do obrony wojsk własnych oraz pośrednio uczestniczyć w działaniach destrukcyjnych przeciwnika. Istnieje więc potrzeba uprzedzającego wykrywania oraz precyzyjnej identyfikacji, przeznaczenia i lokalizacji pracujących radarów w celu 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 strony potrzeba przeciwdziałania ograniczającego skuteczność wykorzystania energii elektromagnetycznej przez przeciwnika, były przyczyną wyodrębnienia działań, określanych jako walka elektroniczna EW [1] (Electronic Warfare). Do realizacji założonych celów EW wykorzystuje się różnorodne systemy i urządzenia, i tak klasa:

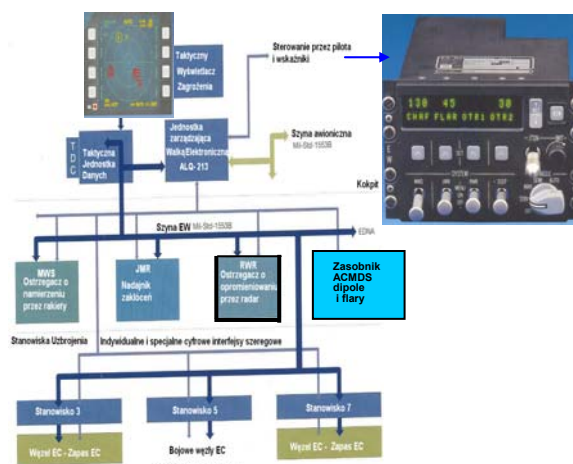
- ELINT (Electronic Intelligence) zapewnia precyzyjne, ciągłe rozpoznanie radarów i gromadzenie informacji. Wykorzystuje precyzyjne, często komercyjne, urządzenia odbiorcze, pomiarowe i analizujące sygnały.
- ESM (Electronic Support Measure) zapewnia wsparcie rozpoznawcze bezpośrednio na polu walki.
- RWR (Radar Warning Receiver) ostrzega o zagrożeniu.

Występują też urządzenia ESM, posiadające możliwości prowadzenia analizy podobnej do realizowanej w systemach ELINT, stąd ich oznaczenie ESM/ELINT. Szeroko stosowane urządzenia ESM nie promieniują energią elektromagnetyczną, co jest wielką ich zaletą. Przykład takiego urządzenia<sup>1</sup> i jego strukturę blokową przedstawia rys. 1. Urządzenia klasy RWR są zwykle elementami systemu EPM (Electronic Protective Measures) obrony samolotów i okrętów. Przykład systemu ALQ-213 firmy Terma<sup>2</sup> i jego wykorzystania w systemie samoobrony samolotu przedstawiono na rys. 2. Ostrzegające RWR,

stosowane w EPM, są całkowicie zautomatyzowane i programowane na wykrywanie radarów zagrażających w wykonywaniu danej misji. Systemy EPM posiadają też możliwości przeciwdziałania ECM (Electronic Counter Measures) drogą generowania zakłóceń czynnych (JMR) i biernych (wyrzutnie dipoli - dipols dispenser).



Rys. 1. Przykład urządzenia klasy ESM/ELINT



Rys. 2. Struktura zintegrowanego systemu zarządzania EW samolotu

<sup>1</sup> Źródła: Raport Wojsko Technika Obronność nr 12/1999,

PIT – materiały informacyjne, Zdjęcie: Bellona, Wydanie Specjalne 2008., Materiały IR WAT (autor był członkiem zespołu projektującego)

<sup>2</sup> Źródło: TERMA AS: AN/ALQ-213(V) Electronic Warfare Management System EWMS

Zakłócenia utrudniają lub uniemożliwiają obserwację na wskaźniku radaru. Przykład<sup>3</sup> pokazano na rys. 3b.

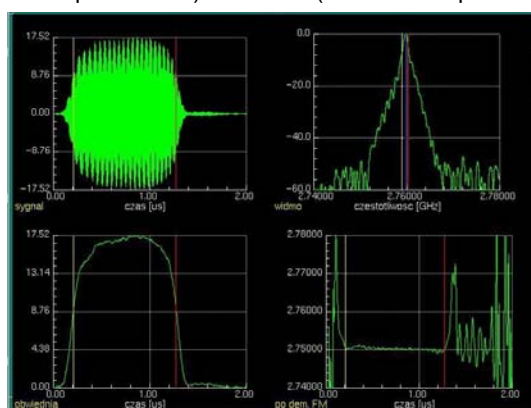
W systemie EPM, jak na rys. 2, RWR jest jednym z dwu źródeł informacji dla systemu zarządzania EW ALQ-213. Drugie źródło to system MWS (Missile Warning System) ostrzegający o starcie i zbliżaniu rakiet. System posiada też możliwość mylenia (rys. 3) zbliżających się rakiet pułapkami termicznymi<sup>4</sup> (flares dispenser).



Rys. 3.a) Mylenie rakiet pułapkami termicznymi  
a) Efekty zakłóceń czynnych na wskaźnikach radarów

### Istota działania urządzeń ELINT i ESM

Urządzenia rozpoznawcze (UR) typu ELINT i ESM różnią się głównie zakresem rozpoznania i stopniem zautomatyzowania. Do wykrywania sygnałów radarowych źródeł emisji (ZE) wykorzystują one kanał szerokopasmowy (rys. 1), a do analizy kanał wąskopasmowy. UR dokonuje automatycznie pomiarów parametrów dla każdego, odbieranego impulsu (rys. 4) i kompletuje je w wektor pomiarowy WP, określane też deskryptorem PDV (Pulse Descriptor Vector) lub PDW (Pulse Descriptor Word).



Rys. 4. Parametry czasowe i częstotliwościowe impulsu

Struktura PDV zależy od UR, a minimalna zawiera:

$$(1) PDV=WP=< TOA, A, RF, PW, AOA>$$

gdzie: TOA- czas przybycia impulsu (Time of Arrival), A - amplituda impulsu, RF - częstotliwość nośna (Radio Frequency), PW - czas trwania impulsu ( Pulse Width), AOA - kąt przybycia impulsu (Angle of Arrival)

Często odbierany strumień pomiarów jest wynikiem superpozycji wielu sygnałów. Przykład superpozycji

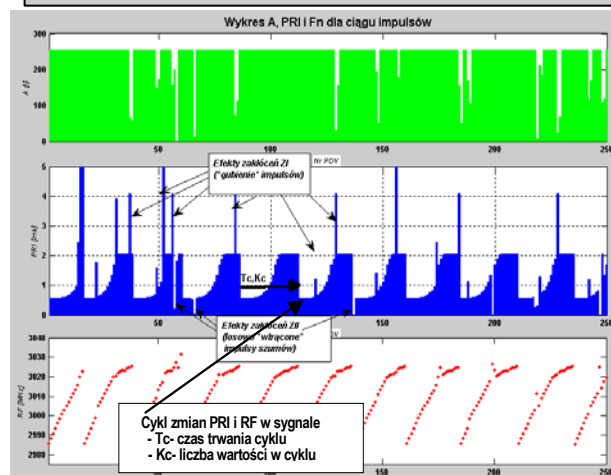
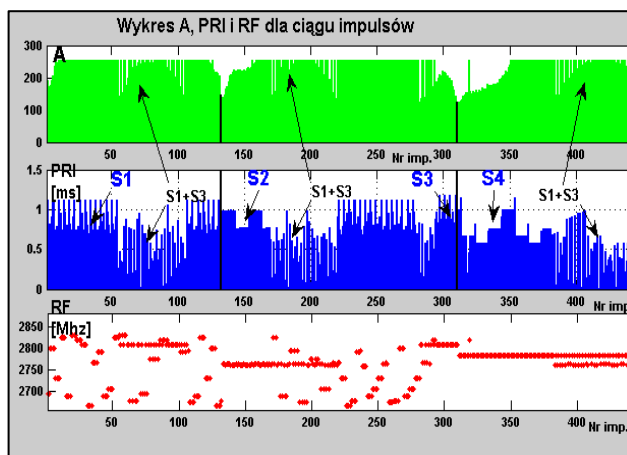
<sup>3</sup> Źródło: www.radartutorial.eu

<sup>4</sup> Źródło: Lars Tolstrup, TERMA AS

czterech sygnałów S1, S2, S3 i S4 przedstawiono na rys. 5.

Wykresy na rys. 5 przedstawiają trzy podstawowe parametry ciągu impulsów. Czas TOA [1-4] pozwala na określenie wartości PRI (Pulse Repetition Interval - okres powtarzania impulsów) oraz na kojarzenie informacji odbieranej z różnych kanałów częstotliwości. Wartości PRI określają [1,3,4] różnice TOA dwu odebranych impulsów<sup>5</sup>. Każdemu opromienieniu UR przez antenę danego ZE odpowiada odbiór paczki impulsów. Paczkę tworzy grupa impulsów odebranych w relatywnie krótkim przedziale czasu, wynikającym z jednokrotnego opromienienia anteny UR przez ZE emitujące sygnał. Odstępy czasu między impulsami paczki [1], powinny mieścić się w przedziale typowych wartości PRI radarów i są one dużo mniejsze od odstępów czasu między paczkami, wynikających z parametrów skanowania [1] przestrzeni przez antenę radaru. Odstępy te na rys. 5 są zaznaczone pionowymi czarnymi liniami.

Rys. 5. Wizualizacja ciągu impulsów superpozycji



Rys. 6. Przykład sygnału pojedynczego ZE

Rys. 6 przedstawia wizualizację ciągu PDV pojedynczego ZE o złożonych, cyklicznych (co 26 impulsów) zmianach PRI i RF (zmiany typu sliding [1, 4]). W praktyce nie wszystkie emitowane przez ZE impulsy są odbierane. Proces ich „gubienia” wynika np. z chwilowych relacji energetycznych [1,3,4] i jest określane jako zakłócenia ZI (rys.6). Inne zakłócenia, określane jako ZII, wynikają z odbioru fałszywych impulsów, których źródłem są szumy.

<sup>5</sup> Dotyczy to kolejnych impulsów generowanych przez to samo źródło - w innym przypadku różnica nie jest wartością PRI

### Zadania urządzeń ELINT ESM i sposoby ich realizacji

Głównym celem pracy urządzeń ELINT ESM jest rozpoznawanie radarów, rozumiane jako:

1. Identyfikacja pracujących ZE (znane, nieznane), ich przynależności oraz ocena stopnia zagrożenia.
2. Lokalizacja ważnych ZE.
3. Rozpoznawanie typu, egzemplarza i miejsca dyslokacji wykrytego ZE (np. okręt, samolot).
4. Aktualizacja informacji o znanych ZE (potwierdzenie ich pracy, aktualizacja parametrów).
5. Opracowywanie informacji i jej gromadzenie w bazach danych (BD).

Realizacja zadań 1-3 jest szczególnie ważna w systemach ESM. Zadania z punktów 4, 5 są głównym celem pracy urządzeń ELINT. Do realizacji zadań rozpoznawczych urządzenia ESM wykorzystują bazy danych tworzone i aktualizowane w systemach ELINT. BD zawierają wzorce z rodzajami pracy danego ZE, parametrami jego sygnału i użytkowymi (przeznaczenie, nosiciel, zdjęcia itp.).

W celu realizacji zadań urządzenia typu ESM muszą:

1. Zapewnić możliwość pozyskania dostatecznie reprezentatywnego ciągu PDV pojedynczego ZE. Zadanie to jest realizowane przez:
  - a. Sterowanie torem odbiorczo-pomiarowym.
  - b. Selekcję do analizy fragmentów ciągu (w przypadku superpozycji kilku sygnałów).
2. Na podstawie ciągu wektorów PDV dokonać estymacji deskryptora parametrów sygnału WS.
3. Porównać parametry WS ze znanymi wzorcami zawartymi w BD i podjąć decyzję o wykryciu znanego lub nowego ZE.
4. W przypadku wykrycia ZE o znanych parametrach sygnału dowiązać informacje z BD o parametrach taktyczno – technicznych radaru (nosiela).

Ogólna struktura deskryptora sygnału jest następująca:

$$(2) \quad WS = SDV = \{ D_{PRI}, D_{RF}, I \}$$

gdzie:  $D_{PRI}$ ,  $D_{RF}$  - deskryptory parametrów PRI i RF, I - inne parametry i cechy sygnału (np. rodzaj skanowania).

Deskryptor PRI, w zależności od rodzaju sygnału, jest zbiorem liczb (czasami nawet około 100) opisujących parametry sygnału. Uproszczona struktura zawiera:

$$(3) \quad D_{PRI} = \left\{ \begin{array}{l} \{R_{PRI}\} \\ \{PRI_{min}, PRI_{sr}, PRI_{max}\} \\ \{L, \delta_{PRI}\} \\ \{PRI_1, PRI_2, \dots, PRI_L\} \\ \{w_1, w_2, \dots, w_L\} \\ \{T_c, K_c, \delta_{Tc}\} \\ U_{PRI} \end{array} \right\}$$

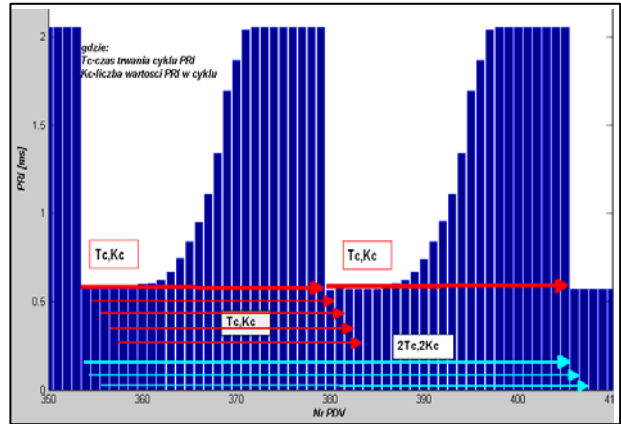
- rodzaj PRI  
 -- wartości statystyczne PRI  
 -L- Liczba PRI i dokładność  
 -L- dyskretnych wartości PRI  
 - częstotliwości występowania PRI  
 - Parametry cyklu i dokładność ( $T_c$ -czas,  $K_c$ - liczba impulsów)  
 - ustawienie PRI w cyklu

W podobny sposób jest opisywana struktura  $D_{RF}$ . (2)  
 Cykle PRI występują w sygnałach ze zmianami PRI typu:  
 - stagger (grupa wartości PRI na różnych pozycjach ciągu),  
 - sliding (płynnie zmieniany PRI – przykład rys. 7),  
 - dwell and switch (skokowa zmiana wartości PRI od grupy do grupy impulsów – przykład dalej, rys. 11).

W prostszych urządzeniach ESM do określenia  $D_{PRI}$  są wykorzystywane tylko statystyczne wartości PRI sygnału, bowiem w tym zakresie można zapewnić poprawną, automatyczną ich estymację.

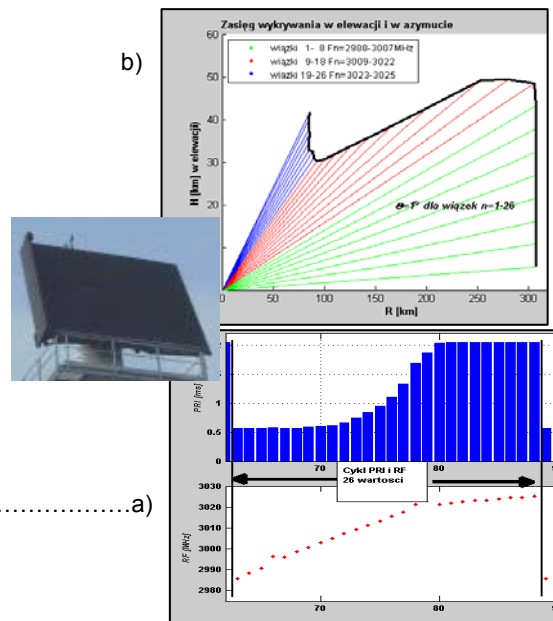
Automatyczną estymację parametrów cyklu utrudniają:

1. Występujące zakłócenia ZI i ZII.
2. Długie cykle PRI (kilkadziesiąt wartości).
3. Występowanie w długich cyklach krótszych podcykli (sygnały typu Dwell and Switch).
4. Odbiór niewystarczająco długich paczek impulsów w stosunku do długości cyklu.



Rys. 7. Cykl PRI ze zmianami typu Sliding

Z informacyjnego punktu widzenia znajomość cyklu PRI wnosi dużo specyficznej informacji, pozwalającej na rozróżnienie sygnałów. Te specyficzne cechy są w rozpoznaniu określane „odciskiem” sygnału (fingerprint). Znajomość cyklu pozwala również na łatwe powiązanie mierzonych parametrów z charakterystykami użytkowymi radaru. Przykład interpretujący powiązanie parametrów PRI i RF z rys 6 i 8a z charakterystyką zasięgu radaru w elewacji (w przestrzeni swobodnej) pokazano na rys. 8b.



Rys.8.a) Parametry częstotliwościowe i czasowe (RF,PRI) sygnału  
 b) Powiązanie parametrów RF i PRI z charakterystyką zasięgową

Z rys. 8 widać, że radar stosuje elektroniczne przeszukiwanie w elewacji zmniejszając zasięg dla wyższych kątów elewacji (26 wiązek w elewacji). Z parametrów sygnału i sposobu ich zmian w cyklu widać, że radar w elewacji realizuje bardzo pożądaną charakterystykę zasięgową typu cosecans kwadrat. W charakterystyce widoczne jest też zniekształcenie dla wyższych kątów w elewacji, co jest charakterystyczne dla praktycznych realizacji przyjętej funkcji cosecans kwadrat.

## Metody histogramowe i ich zastosowanie do wykrywania cykli PRI

Metody histogramowe są praktyczną realizacją funkcji autokorelacji. Jeśli przez  $t_n$  oznaczyć TOA n-tego impulsu, to odebrany ciąg impulsów opisuje funkcja:

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

gdzie:  $\delta(t)$  - jest funkcją delta Diraca,  $n=0, 1, 2, \dots, N-1$  - nr impulsu

Autokorelacja funkcji  $f(t)$  jest określana [1,2,4] wyrażeniem:

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

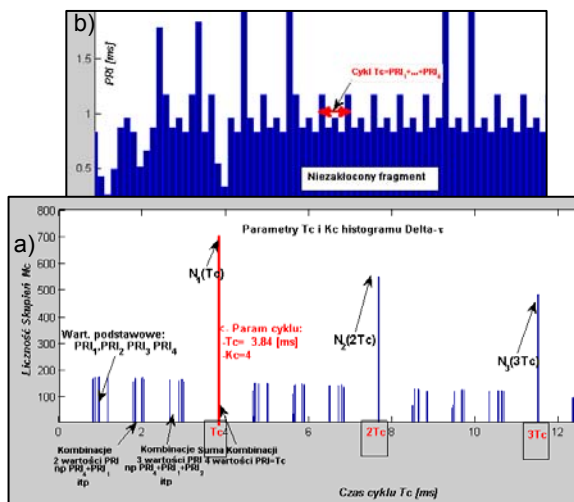
Całka funkcji autokorelacji w przedziale jednostkowym jest określona przez wyrażenie:

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

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

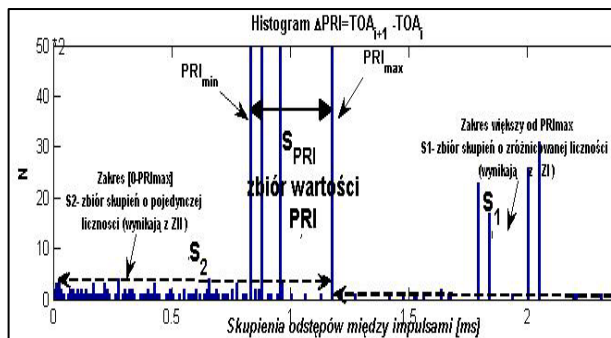
$$(7) \quad \tau_1 < t_n - t_k < \tau_2$$

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- $\tau$  [2]. Na rys. 9a przedstawiono skupienia rozkładu odstępów  $\Delta TOA$  (6) w postaci histogramu Delta- $\tau$  dla rzeczywistego ciągu impulsów o zmianach PRI typu stagger z czterema różnymi wartościami PRI, którego fragment pokazano na rys. 9b. W sygnale występowały niewielkie zakłócenia ZI i ZII (są one widoczne na rys. 9b). Histogram na rys. 9a nie pokazuje skupień małych liczb, zawierających wartości wynikające z zakłóceń.



Rys. 9 a) Histogramu Delta- $\tau$  dla 4 elementowego ciągu stagger b) Fragment ciągu dla którego przedstawiono histogram

W histogramie na rys. 9a najwyższy prążek identyfikuje cykl PRI i umożliwia precyzyjne określenie deskryptora  $D_{PRI}$  (2). Ideę algorytmu wykorzystanego do identyfikacji zakłóceń i określenia zbioru podstawowych wartości PRI deskryptora  $D_{PRI}$  (3) przedstawiono na rys. 10. Przedstawia on skupienia odstępów,  $TOA_{i+1} - TOA_i$  ( $i=1-650$ ) sygnału o identycznych parametrach PRI jak na rys. 9b, ale z dużym poziomem zakłóceń ZI i ZII. Widoczne są 4 dominujące skupienia o zbliżonej liczności (po ok. 100 wartości), oznaczone, jako  $S_{PRI}$ . Jest to również widoczne na rys. 9 i świadczy o zmianach PRI typu stagger 4 pozycyjny.



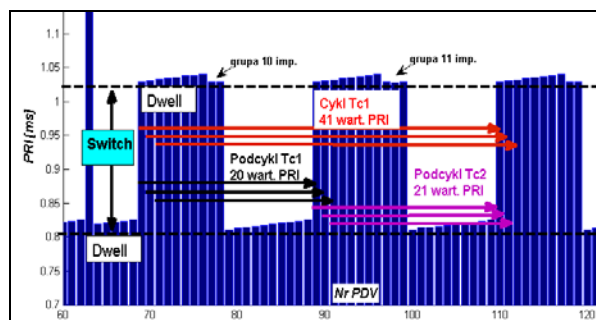
Rys. 10. Interpretacja skupiania różnic TOA kolejnych impulsów

Przy braku zakłóceń histogram będzie zawierał tylko skupienia  $S_{PRI}$ . Natomiast przy występowaniu tylko zakłóceń ZII będzie on zawierał skupienia  $S_2$  i  $S_{PRI}$ . Analogicznie przy zakłóceniach ZI, będzie on zawierał skupienia  $S_{PRI}$  oraz  $S_1$ .

## Propozycja algorytmu i wyniki jego zastosowania

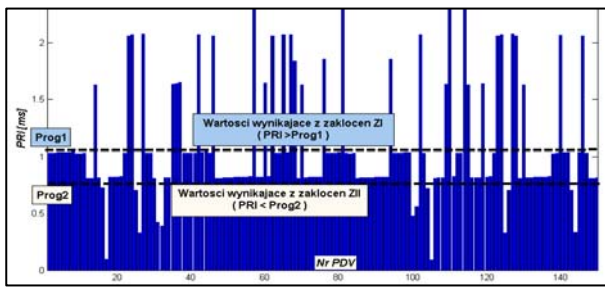
Algorytm wykrywania czasu cyklu  $T_c$  wymagają potwierdzenia wykryciem prążka  $2T_c$ . Ta zasada podana w pracy [2] została przedstawiona na rys. 9a dla sygnału stagger. Niestety, jej stosowanie jest ograniczone, gdy:

- Występują długie cykle  $T_c$ , a odbierane są paczki o czasie trwania krótszym do  $2T_c$ . Wówczas brak prążka  $2T_c$  uniemożliwia potwierdzenie cyklu  $T_c$ .
- W cyklu PRI występują podcykle (rys. 11), co ma miejsce w sygnałach ze zmianami typu Dwell and Switch (utrzymuj (Dwell) grupę PRI i przełącz (switch) na inną). Wówczas, przy zakłóceniach i odbiorze krótkich paczek mogą dominować prążki podcykli.



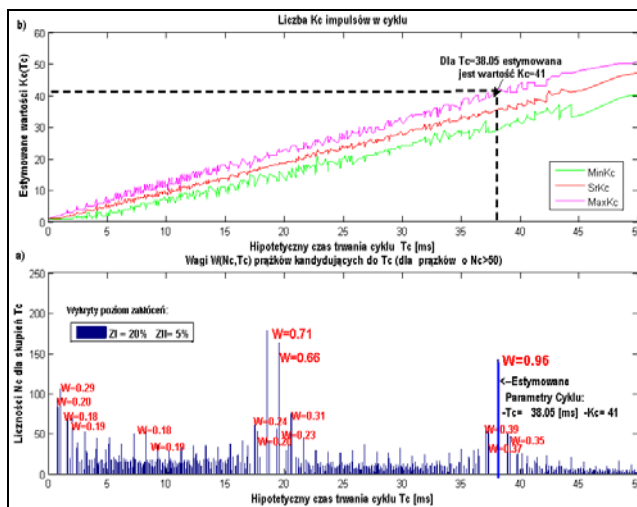
Rys. 11. Przykład cyklu PRI ze zmianami typu Dwell and Switch

Dalej, przedstawiłem propozycję algorytmu, który wykorzystuje histogram, tworzony sukcesywnie z napływem impulsów (histogram kumulacyjny). Operacje w punkcie 6 algorytmu zapewniają, że oprócz odstępu czasu  $\Delta t_{r,s}$  między impulsami „r” oraz „s” aktualizowana jest też wartość  $k=r-s$ , wyrażająca liczbę PRI tworzących odstęp  $\Delta t_{r,s}$ . Ta informacja w połączeniu z informacją o czasie trwania paczki pozwala wartościować prążki histogramu (punkt 9) wagami  $W$  z zakresu (0,1]. W efekcie, aby wykryć czas trwania  $T_c$  cyklu PRI, nie jest już niezbędna obecność prążka  $2T_c$ . Rys. 13a przedstawia przykład estymacji parametru  $T_c$  metodą funkcji autokorelacji dla sygnału silnie zakłóconego o strukturze cyklu PRI jak na rys. 11. Fragment sygnału pokazuje rys. 12. Z histogramu rys. 13a widoczne, że podcykle  $T_{c1}$  i  $T_{c2}$  generują prążki bardziej liczne niż  $T_c$ . Jednocześnie żaden z dominujących prążków np.  $T_c$  nie ma w histogramie potwierdzenia w postaci prążka  $2T_c$ . Mimo braku dominacji ilościowej, największą wagę 0.96 uzyskał prążek reprezentujący właściwą wartość cyklu  $T_c$ .



Rys. 12. Fragment badanego ciągu z zakłóceniami cyklu PRI

Rys. 13b pokazuje estymację wartości  $K_c$  dla prążka  $T_c=38.05$  z rys. 13a, który uzyskał najwyższą wagę  $W=0.96$ . Uwzględniając wykrytą dominację zakłóceń ZI, z rys. 13b wynika, że cykl tworzy  $K_c=41$  wartości PRI.



Rys. 13 a) Wagi prążków histogramu funkcji autokorelacji, b) Wyznaczanie dla  $T_c$  z rys. 13a liczby  $K_c$  wartości PRI w cyklu

#### ALGORYTM

- Nadanie wartości początkowych:  
 $N=0, K_{max}, ZI=0, ZII=0, T_{cmax}, P_w, CYKL=0,$   
 $MinKs=inf, MaxKs=0, SrKs=0$
- Oczekiwanie na odbiór ciągu PDV.
- Buforowanie PDV kolejnej paczki impulsów.  
 Gdy przed odbiorem paczki realizowano punkty 4-10, to po buforowaniu danych następuje powrót do poprzednich obliczeń.
- Przetwarzanie PDV kolejnej  $k$ -tej paczki o  $n_k$  impulsach

$$T_k^{n_k} = \{t_i\}_{i=1}^{i=n_k} \quad \text{gdzie: } t_i - \text{czas przyjscia TOA } i\text{-tego impulsu}$$

Jeżeli  $N > N_{max}$  to przejść do punktu 11.

Jeżeli brak danych do przetwarzania to punkt 2.

- Obliczenie czasu trwania paczki  $C_k = t_{n_k} - t_1$   
 i łącznej liczby uwzględnionych już impulsów  $N=N+ n_k$
- Dla  $k=1,2,\dots, K_{max}$  realizowane są działania:
  - Obliczanie odstępów  $\Delta T_{r,s}$  między impulsami odległymi o „ $k$ ”  
 gdzie:  $k= r-s, s=1,2,\dots,n_k-k, r=s+k, \dots,n_k$
  - Aktualizacja histogramu kumulacyjnego obejmująca:
    - Wyznaczenie odstępu  $j \approx \Delta T_{r,s}$  w całkowitej liczbie  $\mu s$ .
    - Jeżeli odstęp  $j > T_{cmax}$  to punkt 6, jeśli nie to wykonanie:  
 Aktualizacji liczby odstępów podobnych w  $j$ -tym skupieniu  
 $H(j)=H(j)+1$   
 Aktualizacji liczby  $r-s$  impulsów do obliczania średniego  $K_c$   
 $SrKs(j)=SrKs(j) +(r-s)$   
 Wykrycie dla  $\Delta T_{r,s}$  minimalnej i maksymalnej liczby PRI:  
 $MinKs(j)= MinKs(j) - \text{jeśli } MinKs(j) < r-s$   
 $MinKs(j) = r-s \quad - \text{jeśli } MinKs(j) > r-s$   
 $MaxKs(j)= MaxKs(j) - \text{jeśli } MaxKs(j) >= r-s$   
 $MaxKs(j) = r-s \quad - \text{jeśli } MaxKs(j) < r-s$

- Jeśli  $k=1$  to na podstawie elementów „ $j$ ” histogramu o wartościach  $K_c = \text{round}(Ks(j)/H(j)) \neq 1$  należy:
  - Wyznaczyć zbiór potencjalnych wartości PRI.
  - Ustalić występowanie i intensywność zakłóceń ZI oraz ZII.
 Kontynuacja od Punktu 6.  
 Istotę realizacji tego punktu pokazuje rys. 10, a efekt rys. 13a.
- Wykrywanie prążków, które są wielokrotnościami  $T_c$ .  
 Jeśli w elemencie „ $j$ ” histogramu występuje prążek o znaczącej liczbie potwierżeń tzn.  $H(j) > Pr(N)$  (gdzie:  $Pr$ -próg) i jest też prążek „ $m$ ” ( $m < j$ ) spełniający:  $2m=j$  &  $H(m) > H(j)$  wówczas prążek „ $j$ ” jest krotnościami prążka „ $m$ ” i jest eliminowany.  
 $T_c=m, K_c=H(m), CYKL=1, \text{ Punkt } 11.$
- Obliczenie wag kolejnego, dominującego  $j$ -tego prążka:
  - Dla  $T_c=j$  wyznaczyć liczbę PRI hipotetycznego cyklu:  
 $K_c = \text{round}(Ks(j)/H(j));$
  - obliczyć hipotetyczną liczbę wystąpień cyklu  $T_c$  w paczce:  
 $L_p = C_k / T_c;$
  - obliczyć teoretyczną ilość wystąpień cyklu o parametrach ( $T_c, K_c$ ):  
 $L(T_c, K_c) = L_p * K_c - K_c + 1$
  - Obliczyć wagę  $j$ -tego prążka:  
 $W(T_c, K_c) = H(j) / L(T_c, K_c)$  gdzie:  $(0 < W(T_c, K_c) \leq 1)$
  - Jeśli  $W(T_c, K_c) \geq P_w$  to  $CYKL=1, (T_c, K_c)$  są parametrami cyklu  
 gdzie:  $P_w$  – założona wartość progu wykrycia cyklu (0.8–1.0)
- Jeśli  $CYKL=0$  &  $k < K_{max}$  to kontynuacja od punktu 6.  
 Jeśli  $CYKL=0$  &  $k = K_{max}$  to kontynuacja od Punktu 4.
- Jeśli  $CYKL=1$  to jest pełna informacja o ( $T_c, K_c$ ) i PRI.  
 Ewentualna korekta  $K_c$ , jeśli są ZI, ZII (Istotę pokazuje rys. 13b).  
 Jeśli  $CYKL=0$  to brak ( $T_c, K_c$ ). Jest informacja o wartościach PRI.  
**KONIEC ALGORYTMU**

#### Wnioski

W artykule przedstawiono algorytm przetwarzania pomiarów TOA w kanale wąskopasmowym UR. Przedstawiono istotę cyklu PRI w rozpoznawanych sygnałach radarowych, a szczególnie w sygnałach typu Dwell end Switch. Omówiono zakłócenia utrudniające estymację parametrów. Pokazano jak zastosować histogram funkcji autokorelacji do identyfikacji rodzaju zakłóceń, oceny ich intensywności oraz estymacji zbioru wartości PRI. Zaproponowano algorytm, który posiada zdolność wykrycia cyklu PRI w warunkach gdy zawodzi klasyczna metoda wykorzystująca funkcję autokorelacji. Algorytm wykorzystywany w czasie rzeczywistym tworzy i aktualizuje histogram kumulacyjny w miarę napływu impulsów, nadaje wagi prążkom i bada czy już istnieją warunki pozwalające na wykrycie cyklu PRI, i kończy działanie, jeśli nastąpiło wykrycie. Wykorzystanie wag sprawia, że do wykrycia cyklu algorytm potrzebuje ok. 50 % mniej impulsów niż algorytm wykorzystujący tylko funkcję autokorelacji. Dlatego algorytm może być skuteczny przy odbiorze słabych sygnałów (jest mniej impulsów). Algorytm jest odporny na duże zakłócenia, co pokazuje zamieszczony przykład wyników badań.

**Autor:** dr inż. Kazimierz Banasiak, Instytut Radioelektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: [kazimierz.banasiak@wat.edu](mailto:kazimierz.banasiak@wat.edu)

#### LITERATURA

- Adamy D.A First Course in Electronic Warfare, Boston, Artech House, 2001.
- Mardia H.K.: New techniques for deinterleaving of repetitive sequences, IEE Proceedings, Vol.136, No.4, August 1989.
- 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.
- Banasiak K.: Automatyzacja przetwarzania pomiarów w rozpoznawaniu sygnałów impulsowych, Przegląd Elektrotechniczny, R87 Nr 9a/2011, pp. 12-19.