



BIULETYN WAT
VOL. LV, NR 2, 2006

Testowanie funkcji decyzyjnej algorytmu ropoznawania źródeł emisji

JAN MATUSZEWSKI, TOMASZ KRASZEWSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Radioelektroniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Współczesna „arena działań wojennych”, obserwowana w kilku ostatnich konfliktach zbrojnych, wskazuje na ogromne znaczenie urządzeń radioelektronicznych jako podstawowych źródeł zdobywania informacji o przeciwniku, jego aktywności, zamiarach oraz obszarze działań. Rozpoznawanie pracujących źródeł emisji (ZE) odbywa się na podstawie przechwyconych sygnałów sondujących i pomiarze ich parametrów. Źródłem informacji o ZE jest zestaw parametrów zapisanych w bazie danych (BD) systemu rozpoznania elektronicznego, opisujących rozpoznawany obiekt (radar lub nadajnik zakłóceń) i rodzaj jego pracy. Poprawne rozpoznanie emitera, z założonym stopniem podobieństwa, wiąże się z opracowaniem odpowiednich funkcji decyzyjnych, procedur i algorytmów rozpoznawania emisji radarowych. Celem artykułu jest zaprezentowanie jednej z metod możliwych do wykorzystania w procesie weryfikacji poprawności działania funkcji decyzyjnych algorytmu rozpoznawania źródeł emisji.

Słowa kluczowe: rozpoznanie elektroniczne, funkcje decyzyjne, radiolokacja

Symbole UKD: 621.396.96

1. Wstęp

Rozpatrując funkcje decyzyjne algorytmów rozpoznawania w procesie identyfikacji wzorców w bazie danych, należy na wstępie wspomnieć o parametrach charakteryzujących dane wzorce (źródła emisji, radary) [1, 7, 8]. Parametry sygnału, które charakteryzują poszczególne rodzaje źródeł emisji (radarów impulsowych) to m.in.:

- częstotliwość nośna,
- okres powtarzania (częstotliwość powtarzania) impulsów,
- czas trwania (szerokość) i kształt impulsu,

- kąt przybycia (odbioru) sygnału,
- moc sygnału,
- polaryzacja sygnału,
- szerokość wiązki antenowej i poziom listków bocznych,
- rodzaj i szybkość skanowania (przeszukiwania przestrzeni wiązką antenową).

Do podstawowych parametrów źródeł emisji sygnałów radarowych należy zaliczyć [6, 9]:

- częstotliwość nośną, która jest jednym z najważniejszych parametrów technicznych, należących do zbioru cech rozpoznawczych wszystkich urządzeń radiolokacyjnych promieniujących energię. Współczesne radary emitują energię elektromagnetyczną w paśmie $0,3 \div 40$ GHz na jednej lub wielu częstotliwościach nośnych,
- okres powtarzania impulsów, określający jednoznaczny zasięg radaru i zakres jednoznacznego pomiaru prędkości obiektu,
- czas trwania impulsu, mający wpływ zarówno na rozdzielność radaru w odległości, jak i na jego zasięg.

W procesie rozpoznawania emiterów w pierwszej kolejności wykorzystuje się wymienione powyżej parametry podstawowe, czyli częstotliwość nośną, czas trwania impulsu i okres powtarzania impulsów, a ściślej — zakres zmian wartości tych parametrów [3, 4].

2. Wektory sygnałowe

Do pomiaru parametrów sygnału radarowego, wykorzystywanych w proponowanym procesie rozpoznawania, służy akustooptyczny analizator widma. Dla każdego z sygnałów wykrytych we wskazanym paśmie miernik zapewnia pomiar:

- czasu odbioru sygnału,
- czasu trwania impulsu,
- amplitudy średniej impulsów,
- częstotliwości nośnej sygnału.

Miernik ten zapewnia gromadzenie wektorów pomiarowych zarówno dla każdego z impulsów z osobna, jak również dla wszystkich impulsów łącznie, odebranych w czasie tzw. „okna czasowego”.

Każdy wektor sygnałowy składa się z wektora podstawowego oraz wektorów uzupełniających (dodatkowych), które opisują wybrane, w zależności od rodzaju zmian częstotliwości nośnej i okresu powtarzania impulsów, parametry wtórne sygnału.

Przy konstrukcji wektora sygnałowego korzysta się z rekordów, których pola opisujące parametry sygnału odpowiadają wektorom podstawowym i wektorom dodatkowym wzorca sygnałowego. Wektor sygnałowy zawiera ponadto szereg dodatkowych informacji niewykorzystywanych w procesie rozpoznawania źródeł emisji.

Wektor sygnałowy podstawowy jest więc strukturą danych zawierającą istotne parametry emitera, do których należą m.in. następujące wielkości [4]:

- czas wykrycia sygnału,
- rodzaj sygnału,
- rodzaj modulacji (zmian) międzyimpulsowych częstotliwości nośnej,
- rodzaj modulacji częstotliwości w czasie trwania impulsu,
- rodzaj modulacji (zmian) międzyimpulsowych okresu powtarzania impulsów,
- rodzaj modulacji czasu trwania impulsu,
- minimalna i maksymalna wartość częstotliwości nośnej, okresu powtarzania impulsów i czasu trwania impulsu,
- wartość kierunku na ZE (namiar ZE),
- dokładność pomiaru częstotliwości nośnej, okresu powtarzania impulsów i czasu trwania impulsu,
- wektory uzupełniające informacje o częstotliwości nośnej i okresie powtarzania impulsów, np.: rodzaj modulacji i zakres zmian parametrów modulujących.

3. Procedura rozpoznawania

Wektory sygnałowe poddawane są działaniu procedury rozpoznawania sygnałów i źródeł emisji (procedury klasyfikacji i identyfikacji), która jest realizowana według następującego algorytmu [3]:

- wstępna procedura rozpoznawania — każdy wektor sygnałowy jest porównywany ze wzorcem z bazy danych:
 - jeżeli istnieje podobieństwo do określonego wzorca w bazie danych (na określonym poziomie zgodności), to następuje wpisanie do tego wektora sygnałowego danych podstawowych i uzupełniających o wszystkich znanych modach tego sygnału w bazie danych;
 - jeżeli nie istnieje podobieństwo do żadnego wzorca, to jest podejmowany proces analizy i procedura zasadniczego rozpoznawania;
- zasadnicza procedura rozpoznawania — wektor sygnałowy jest porównywany do stałych i zmiennych wzorców:
 - jeżeli istnieje podobieństwo do określonego wzorca, to następuje wpisanie do tego wektora sygnałowego opisu sygnału zawartego w skojarzonym wzorcu sygnału;

- jeżeli nie istnieje podobieństwo do żadnego wzorca, wówczas rozpoznawana jest procedura zakładania nowego wzorca w bazie danych.

4. Wskaźnik stopnia przenikania klas

W artykule zaproponowano zastosowanie tzw. wskaźnika oceny stopnia przenikania klas W_{OSP} [2], (wykorzystywanego do analizy jakości procedur rozpoznawania sygnałów radarowych) do opracowania algorytmu weryfikacji poprawności działania procedur rozpoznawania. Wskaźnik W_{OSP} , obliczany niezależnie dla każdego parametru sygnału radarowego, oznacza średnią niejednoznaczność decyzji o rozpoznawanym sygnale.

4.1. Opis metody [2]

W metodzie tej dokonuje się oceny stopnia przenikania (zachodzenia na siebie) przedziałów zmian wartości podstawowych parametrów pomiarowych sygnału radarowego (częstotliwości nośnej RF, okresu powtarzania impulsów PRI i czasu trwania impulsu PW) z odpowiednimi ich reprezentantami w bazie danych wzorców radarów.

Uogólniając problem, należy dokonać oceny porównawczej parametrów sygnału x_l i x_s , $l, s = 1, \dots, N$, tzn. należy określić, który z tych parametrów charakteryzuje się lepszymi właściwościami rozdzielczymi [5]. Oceny porównawczej stopnia przenikania klas dokonuje się oddzielnie dla każdego parametru sygnału.

W dalszej części artykułu będziemy korzystać z następujących oznaczeń (rys. 1):

ω_i — i -ta klasa w bazie danych wzorców radarów, $i = 1, \dots, L$;

x_j — j -ty parametr sygnału, $j = 1, \dots, N$;

$f_i(x_j)$ — warunkowa funkcja gęstości rozkładu j -tego parametru i -tej klasy;

$P(\omega_i)$ — prawdopodobieństwo a priori wystąpienia sygnału z i -tej klasy;

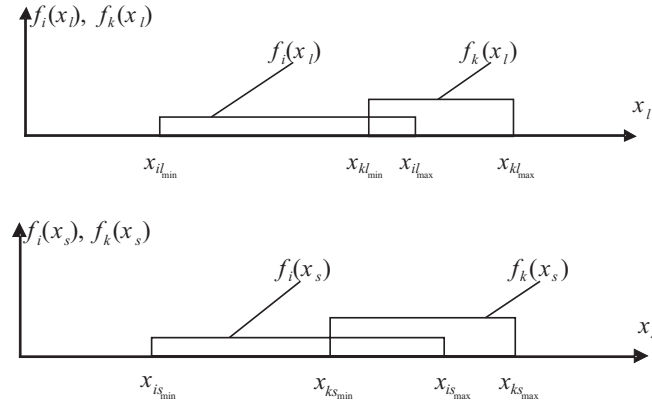
L — liczba klas (radarów) w bazie wzorców;

N — liczba porównywanych parametrów (w naszym przypadku $N = 3$);

$x_{i_s \min}$ — dolna (minimalna) wartość s -tego parametru i -tej klasy ($i, k \in \overline{1, L}$, $l, s \in \overline{1, N}$);

$x_{i_s \max}$ — górna (maksymalna) wartość s -tego parametru i -tej klasy ($i, k \in \overline{1, L}$, $l, s \in \overline{1, N}$).

Dzielimy zakres zmian parametru x_l na przedziały: $\Delta_i^{(1)}(x_l)$, $\Delta_i^{(2)}(x_l)$, ..., $\Delta_i^{(L)}(x_l)$, w których różne od zera są odpowiednio: jedna funkcja $f_i(x_l)$, dwie funkcje $f_i(x_l)$, ..., L funkcji $f_i(x_l)$. Analogicznie postępujemy z parametrem x_s , tj. określamy przedziały: $\Delta_i^{(1)}(x_s)$, $\Delta_i^{(2)}(x_s)$, ..., $\Delta_i^{(L)}(x_s)$.


 Rys. 1. Ilustracja do wyznaczania W_{OSP} dwóch parametrów x_l i x_s

Obliczamy prawdopodobieństwo otrzymania jednoznacznej decyzji:

$$P_1 = \sum_{i=1}^L P(\omega_i) P[x_l \in \Delta_i^{(1)}(x_l / i)] = \sum_{i=1}^L P(\omega_i) \int_{\Delta_i^{(1)}(x_l)} f_i(x_l) dx_l. \quad (1)$$

Prawdopodobieństwo otrzymania dwuznacznej decyzji w postaci „klasa k lub klasa m ”, $k, m \in \overline{1, L}$, jest równe:

$$P_2 = \sum_{i=1}^L P(\omega_i) P[x_l \in \Delta_i^{(2)}(x_l / i)] = \sum_{i=1}^L P(\omega_i) \int_{\Delta_i^{(2)}(x_l)} f_i(x_l) dx_l, \quad (2)$$

gdzie: $\Delta_i^{(2)}(x_l)$ — zbiór przedziałów, w których różne od zera są dowolne dwie funkcje ze zbioru funkcji $f_i(x_l)$.

Prawdopodobieństwo otrzymania L — znacznej decyzji w postaci „klasa 1 lub klasa 2, ... , lub klasa L ” jest równe:

$$P_L = \sum_{i=1}^L P(\omega_i) P[x_l \in \Delta_i^{(L)}(x_l / i)] = \sum_{i=1}^L P(\omega_i) \int_{\Delta_i^{(L)}(x_l)} f_i(x_l) dx_l, \quad (3)$$

gdzie: $\Delta_i^{(L)}(x_l)$ — zbiór przedziałów, w których różne od zera są wszystkie L funkcje $f_i(x_l)$, $i = 1, \dots, L$.

Oznaczmy przez $M(\xi)$ wartość oczekiwaną losowej wielkości ξ , która może przyjmować wartości $\xi = 1, 2, \dots, L$ z prawdopodobieństwami P_i , $i = 1, 2, \dots, L$

$$M(\xi) = \sum_{i=1}^L iP_i. \quad (4)$$

Obliczamy wartość oczekiwaną dla pierwszego i drugiego parametru, tj. $M_{x_l}(\xi)$ i $M_{x_s}(\xi)$. Jeśli $M_{x_l}(\xi) > M_{x_s}(\xi)$, to parametr x_s posiada lepsze właściwości rozdzielcze, natomiast jeśli $M_{x_s}(\xi) > M_{x_l}(\xi)$, to parametr x_l charakteryzuje się lepszymi właściwościami rozdzielczymi. Oznacza to, że w pierwszym przypadku lepszą jakość ma parametr x_s , a w drugim przypadku — parametr x_l .

Wzór (4) jest podstawą do zdefiniowania wskaźnika oceny stopnia przenikania klas, przydatnego w procedurach weryfikacji poprawności funkcji decyzyjnej na poszczególnych etapach algorytmu rozpoznawania. Wartość tę można określić jako średnią wartość oczekiwaną uzyskania niejednoznacznej decyzji dla s -tego parametru sygnału radarowego:

$$W_{OSP_s}(\xi) = \sum_{i=1}^L iP_i \quad s = 1, \dots, N. \quad (5)$$

W przypadku sprawdzania podobieństwa wektora sygnałowego z wzorcami radarów w bazie danych sytuacja jest odwrotna niż w przypadku rozdzielczości parametrów, tzn. im stopień przenikania się przedziałów odpowiednich parametrów sygnału z ich odpowiednikami w bazie wzorców jest większy, tym to podobieństwo jest większe [8]. Wynika to z tego, że jesteśmy zainteresowani tym, by wartość oczekiwana niejednoznacznej decyzji była jak największa, w ogólnym przypadku $W_{OSP_s}(\xi) = L$, co oznacza, że L przedziałów s -tego parametru pokrywa się. Oznacza to, że jeśli przedział zmian wartości parametru wektora sygnałowego zawiera się całkowicie w przedziale wzorca radaru w bazie danych, to wartość tego wskaźnika powinna być równa jedności. Jeśli natomiast te przedziały są całkowicie rozłączne, to wartość tego wskaźnika powinna być równa zeru, a przy ich częściowym przenikaniu będzie przyjmować wartości większe od zera i mniejsze od jedności.

Przy porównywaniu wektora sygnałowego z odpowiednimi wektorami radarów w bazie wzorców, będziemy mieli do czynienia zawsze jedynie z dwiema klasami, czyli w tym przypadku $L = 2$. Obliczać będziemy tylko prawdopodobieństwo otrzymania jednoznacznej i dwuznacznej decyzji P_1 i P_2 , gdyż w rozpatrywanym przypadku w każdej chwili porównywany jest wektor sygnałowy tylko z jednym wzorcem, a w związku z tym decyzja może być tylko jedno- lub dwuznaczna, tzn., że w danym przedziale zmian wartości parametru różna od zera jest jedna funkcja $f_i(x_j)$ (wektora sygnałowego lub wzorca) lub dwie funkcje $f_i(x_j)$ (wektora sygnałowego i wzorca) (rys. 2-6).

Trudno byłoby oszacować również prawdopodobieństwa a priori przechwylenia sygnałów z poszczególnych klas, więc do dalszych obliczeń przyjmujemy: $P(\omega_1) = P(\omega_2) = 0,5$.

Po uwzględnieniu powyższych założeń wzory (1) i (2) przyjmą następującą postać:

$$P_1 = 0,5 \sum_{i=1}^2 P[x_l \in \Delta_i^{(1)}(x_l / i)] = 0,5 \sum_{i=1}^2 \int_{\Delta_i^{(1)}(x_l)} f_i(x_l) dx_l \quad (6)$$

$$P_2 = 0,5 \sum_{i=1}^2 P[x_l \in \Delta_i^{(2)}(x_l / i)] = 0,5 \sum_{i=1}^2 \int_{\Delta_i^{(2)}(x_l)} f_i(x_l) dx_l. \quad (7)$$

Unormowany do zakresu $\langle 0, 1 \rangle$ wskaźnik oceny stopnia przenikania się przedziałów parametrów x_l , $l = 1, 2, 3$, wektora sygnałowego z ich odpowiednikami w bazie wzorców ma zaś następującą postać:

$$W_{OSP}(x_l) = P_1 + 2P_2 - 1. \quad (8)$$

Jeśli $W_{OSP}(x_l) = 0$, to przedziały są rozłączne (brak podobieństwa wektora sygnałowego z badanym wektorem emitera w bazie wzorców), jeśli $W_{OSP}(x_l) = 1$, to jest pełne podobieństwo (przedział parametru wektora sygnałowego całkowicie zawiera się w przedziale odpowiedniego parametru radaru w bazie wzorców), a jeśli $0 < W_{OSP}(x_l) < 1$, to te przedziały przenikają się częściowo.

4.2. Algorytm wyznaczania stopnia przenikania klas

Kolejnym etapem jest opisanie algorytmu zastosowanego przy określaniu wskaźnika stopnia przenikania klas.

Oznaczenia:

- $x_{i_{s_{\min}}}, x_{i_{s_{\max}}}$ — odpowiednio: dolna (minimalna) i górna (maksymalna) wartość s -tego parametru i -tego wzorca klasy, $i \in \overline{1, L}$;
- $x_{s_{\min}}, x_{s_{\max}}$ — odpowiednio: dolna (minimalna) i górna (maksymalna) wartość s -tego parametru wektora sygnałowego, $s = 1, \dots, N$;
- l_{wr} — liczba wzorców radarów z bazy danych, których parametry są zgodne z parametrami wektora sygnałowego (przenikają się częściowo);
- δ_p — wartość graniczna oceny stopnia przenikania się klas, dla której wektory wzorców radarów z bazy danych brane są do dalszej analizy w procedurze rozpoznawania wektorów sygnałowych;
- $W_{OSP}(x_s)$ — wskaźnik oceny stopnia przenikania się przedziałów s -tego parametru;
- $W_{OSP}(i)$ — wskaźnik oceny stopnia przenikania się przedziałów wszystkich parametrów wektora sygnałowego oraz i -tego wzorca radarów w bazie danych;

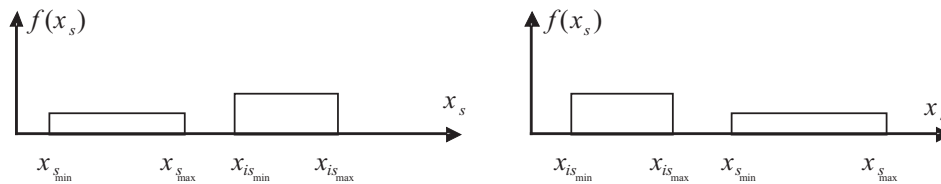
- i — i -ta klasa emitera;
 s — s -ty analizowany parametr emitera.

Algorytm postępowania ma następujący przebieg:

1. $i: = 0; s: = 0; l_{wp}: = 0$
2. $i: = i + 1$
3. $s: = s + 1$
4. Obliczenie wskaźnika $W_{OSP}(x_s)$ oceny stopnia przenikania się przedziałów dla s -tego parametru wektora sygnałowego oraz i -tego wzorca w bazie danych. Mogą tu wystąpić następujące sytuacje:
 - a) Przedziały te są całkowicie rozłączne (rys. 2).

Jeśli $x_{s_{\max}} \leq x_{i_{\min}} \vee x_{s_{\min}} \geq x_{i_{\max}}$, to $W_{OSP}(i) = W_{OSP}(x_s) = 0$.

Przejdźcie do pkt. 8.

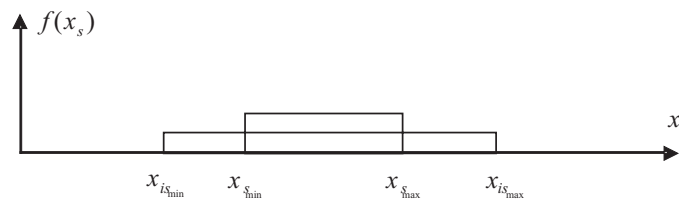


Rys. 2. Przypadek rozłącznych przedziałów zmian wartości parametrów

- b) Przedział zmian s -tego parametru wektora sygnałowego zawiera się całkowicie w przedziale s -tego parametru i -tego wzorca w bazie danych (rys. 3).

Jeśli $x_{i_{\min}} \leq x_{s_{\min}} < x_{i_{\max}} \wedge x_{i_{\min}} < x_{s_{\max}} \leq x_{i_{\max}}$, to $W_{OSP}(x_s) = 1$.

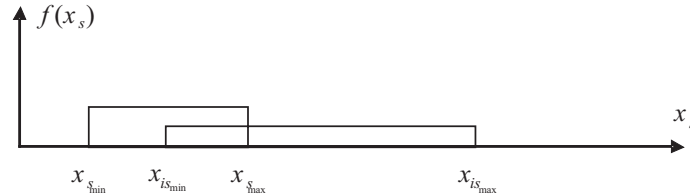
Przejdźcie do pkt. 5.



Rys. 3. Przypadek zawierania się przedziału zmian wartości parametru wektora sygnałowego w przedziale zmian wartości parametru wzorca

- c) Przedział zmian s -tego parametru wektora sygnałowego zawiera się częściowo (lewostronnie) w przedziale s -tego parametru i -tego wzorca w bazie danych (rys. 4).

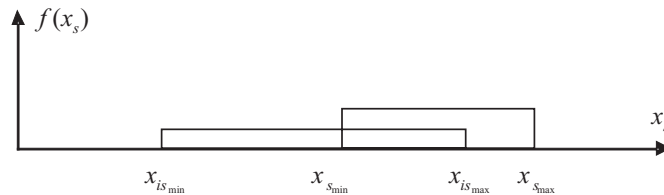
Jeśli $x_{s_{\min}} < x_{i_{s_{\min}}} \wedge x_{i_{s_{\min}}} < x_{s_{\max}} \leq x_{i_{s_{\max}}}$, to wskaźnik oceny stopnia przenikania $W_{OSP}(x_s)$ obliczamy zgodnie ze wzorem (8). W tym przypadku: $0 < W_{OSP}(x_s) < 1$. Przejście do pkt. 5.



Rys. 4. Przypadek lewostronnego częściowego zawierania się przedziału zmian wartości parametru wektora sygnałowego w przedziale zmian wartości parametru wzorca

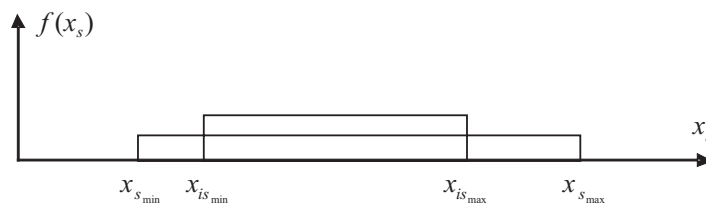
d) Przedział zmian s -tego parametru wektora sygnałowego zawiera się częściowo (prawostronnie) w przedziale s -tego parametru i -tego wzorca w bazie danych (rys. 5).

Jeśli $x_{i_{s_{\min}}} \leq x_{s_{\min}} < x_{i_{s_{\max}}} \wedge x_{s_{\max}} > x_{i_{s_{\max}}}$, to wskaźnik oceny stopnia przenikania $W_{OSP}(x_s)$ obliczamy zgodnie ze wzorem (8). W tym przypadku: $0 < W_{OSP}(x_s) < 1$. Przejście do pkt. 5.



Rys. 5. Przypadek prawostronnego częściowego zawierania się przedziału zmian wartości parametru wektora sygnałowego w przedziale zmian wartości parametru wzorca

e) Przedział s -tego parametru i -tego wzorca w bazie danych zawiera się całkowicie w przedziale s -tego parametru wektora sygnałowego (rys. 6).



Rys. 6. Przypadek zawierania się przedziału zmian wartości parametru wzorca w przedziale zmian wartości parametru wektora sygnałowego

Jeśli $x_{s_{\min}} < x_{i_{\min}} \wedge x_{s_{\max}} > x_{i_{\max}}$, to wskaźnik oceny stopnia przenikania $W_{OSP}(x_s)$ obliczamy zgodnie ze wzorem (8). W tym przypadku: $0 < W_{OSP}(x_s) < 1$. Przejście do pkt. 5.

5. Sprawdzamy, czy czynność 4 została wykonana dla wszystkich parametrów pomiarowych wektora sygnałowego. Jeśli $s < N$, to przejście do pkt. 3, w przeciwnym wypadku — przejście do pkt. 6.
6. Obliczenie uogólnionego wskaźnika oceny stopnia przenikania się przedziałów dla wszystkich parametrów

$$W_{OSP}(i) = \prod_{s=1}^N W_{OSP}(x_s). \quad (9)$$

7. Jeśli $W_{OSP}(i) \geq \delta_p$, to i -ty wzorzec radaru z bazy danych przechodzi do dalszej analizy

$$l_{wr} := l_{wr} + 1. \quad (10)$$

8. Sprawdzenie, czy dla wszystkich wzorców radarów z bazy danych został obliczony wskaźnik $W_{OSP}(i)$. Jeśli $i < L$, to przejście do pkt. 2, w przeciwnym wypadku do pkt. 9.
9. Koniec procedury obliczania stopnia przenikania się przedziałów parametrów wektora sygnałowego z wzorcami radarów w bazie danych.

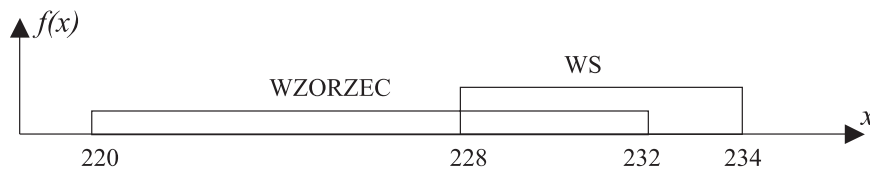
Jeśli $l_{wr} = 0$, to koniec algorytmu klasyfikacji wektora sygnałowego. Jeśli $l_{wr} \geq 1$, to przejście z wybranymi tutaj wektorami do kolejnego etapu procedury rozpoznawania.

Poniżej przedstawione zostały przykładowe wyliczenia liczbowe W_{OSP} dla pojedynczego parametru w zależności od sposobu zawierania się przedziału zmian wartości parametru wektora sygnałowego w przedziale zmian wartości wzorca.

Dane (rys. 7):

$\langle x_{i_{\min}} = 220, x_{i_{\max}} = 232 \rangle$ – przedział wzorca i -tej klasy;

$\langle x_{s_{\min}} = 228, x_{s_{\max}} = 234 \rangle$ – przedział wektora sygnałowego.



Rys. 7. Przepadek prawostronnego częściowego zawierania się przedziału zmian wartości parametru wektora sygnałowego w przedziale zmian wartości parametru wzorca

Obliczenia:

$$f_i(x) = 1/(232 - 220) = 0,083$$

$$f_s(x) = 1/(234 - 228) = 0,167$$

$$P_1(x) = 0,5 * [(228 - 220) * 0,083 + (234 - 232) * 0,167] = 0,5$$

$$P_2(x) = 0,5 * [232 - 228] * 0,083 + (232 - 228) * 0,167] = 0,5$$

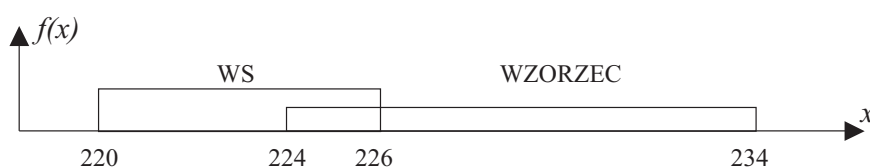
$$W_{OSP}(x) = P_1(x) + 2 P_2(x) - 1 = 0,5 + 2 * 0,5 - 1 = 0,5$$

Dane (rys. 8):

$\langle x_{i_{\min}} = 224, x_{i_{\max}} = 234 \rangle$ – przedział wzorca i -tej klasy

$\langle x_{s_{\min}} = 220, x_{s_{\max}} = 226 \rangle$ – przedział wektora sygnałowego WS

$$W_{OSP}(x) = 0,27$$



Rys. 8. Przypadek lewostronnego częściowego zawierania się przedziału zmian wartości parametru wektora sygnałowego w przedziale zmian wartości parametru wzorca

Obliczony wskaźnik stopnia przenikania klas $W_{OSP}(x)$ dla przykładu przedstawionego na rysunku 7 ma większą wartość w porównaniu z przykładem na rysunku 8, co oznacza, że ten wektor sygnałowy jest bardziej zgodny ze wzorcem w bazie danych.

5. Funkcja decyzyjna procedury rozpoznawania

Procedurę rozpoznawania wektorów sygnałowych realizuje się wg określonych reguł funkcji decyzyjnej po każdej realizacji funkcji podstawowych: wykrywaniu i analizie. Funkcja decyzyjna procedury rozpoznawania, zawierająca zasady porównywania wektorów sygnałowych i wzorców realizowana jest w trzech etapach [3].

Etap 1:

Realizacja procedury określania zgodności przedziałów wartości:

- częstotliwości nośnej sygnału,
- okresu powtarzania impulsów,
- czasu trwania impulsu wektora sygnałowego z wzorcami w bazie danych.

Podstawowym celem tego etapu jest wyszukanie w zasobach BD tych wzorców, których przedziały wartości ww. parametrów są zgodne (tzn. przenikają się w całości lub częściowo) z odpowiadającymi im przedziałami wartości tych parametrów zapisanymi w danym wektorze sygnałowym (zapisanymi w wektorze podstawowym).

Określanie zgodności realizowane jest oddzielnie dla każdego z parametrów i polega na wyznaczeniu wskaźnika oceny stopnia przenikania przedziałów danego parametru, które są zapisane w wektorze sygnałowym i porównywanym wzorcu.

Jeżeli:

- jeden z tych z przedziałów zawiera się w pełni w drugim, wówczas wartość wskaźnika oceny stopnia przenikania wynosi 1 ($W_{OSP} = 1$);
- przedziały są rozłączne, wówczas wartość wskaźnika oceny stopnia przenikania wynosi 0 ($W_{OSP} = 0$);
- przedziały przenikają się częściowo, wówczas wartość wskaźnika oceny stopnia przenikania zawiera się w przedziale niedomkniętym od 0 do 1 ($0 < W_{OSP} < 1$).

Końcowa wartość wskaźnika oceny stopnia przenikania (dla etapu I) jest iloczynem wartości wskaźnika W_{OSP} uzyskanych dla trzech parametrów sygnału (wzór 9).

Do etapu II procedury rozpoznawania klasyfikują się tylko te wzorce wybrane z BD, dla których końcowa wartość wskaźnika oceny stopnia przenikania jest większa od zadanej wartości progowej.

Jeżeli, w wyniku realizacji procedury określania zgodności przedziałów wartości parametrów, wartość wskaźnika oceny stopnia przenikania nie przekroczyła wartości progowej dla żadnego wzorca, wówczas procedura rozpoznawania dla danego wektora sygnałowego zostaje przerwana i dla danego sygnału należy wykonać dodatkową analizę wektora sygnałowego lub założyć nowy wzorec, jeśli taka procedura była już wykonana.

Etap 2:

Realizacja procedury sprawdzenia zgodności cech sygnału, które są opisane w sposób dyskretny.

Stwierdzenie zgodności ww. cech sygnału polega na ustaleniu, czy cechy te zapisane w wektorze i w każdym z zakwalifikowanych w etapie 1 wzorców są w pełni zbieżne (są takie same). Do etapu 3 procedury rozpoznawania klasyfikują się te wzorce, dla których została stwierdzona pełna zbieżność cech sygnału z wektorem.

Jeżeli, w wyniku realizacji procedury sprawdzenia zgodności cech sygnału nie została stwierdzona pełna zbieżność cech sygnału zapisanych w wektorze z cechami sygnałów zapisanych we wzorcach (zakwalifikowanych w etapie 1), wówczas procedura rozpoznawania dla danego wektora sygnałowego zostaje prze-

rwana i dla danego sygnału należy wykonać dodatkową analizę wektora sygnałowego lub dokonać edycji wzorca sygnałowego.

Etap 3:

Realizacja procedury sprawdzenia zgodności określonych parametrów zapisanych we wskazanych wektorach dodatkowych danego wektora z zakwalifikowanymi do etapu 3 wzorcami.

Krok 1

Następuje określenie zgodności parametrów dodatkowych, związanych z modulacją częstotliwości nośnej sygnału. W zależności od rodzaju modulacji międzyimpulsowej tego parametru, należy dokonać sprawdzenia i/lub porównania parametrów zapisanych w wektorach dodatkowych (uzupełniających) częstotliwości nośnej wektora i każdego z zakwalifikowanych do *etapu 3* wzorców. Dla każdego z rodzajów zmian należy dokonać sprawdzenia i/lub porównania parametrów dodatkowych.

Wynik pozytywny realizowanych sprawdzeń parametrów dyskretnych jest wówczas, gdy następuje pełna zgodność danych parametrów zapisanych w wektorze sygnałowym i danym wzorcem.

Wynik pozytywny realizowanych porównań przedziałowych jest wówczas, gdy wartość wskaźnika oceny stopnia przenikania (W_{OSP}) jest większa od zadanej wartości progowej.

Do *kroku 2* w *etapie 3* procedury rozpoznawania klasyfikują się te wzorce, których łączny wynik realizowanych sprawdzeń i porównań jest pozytywny. Dla tych wzorców należy określić wartość wskaźnika W_{OSP} , będącą iloczynem wartości tego wskaźnika, uzyskanego w *etapie 1* i w *kroku 1 etapu 3*.

Jeżeli wynik realizacji procedury w *kroku 1* jest negatywny dla wszystkich wzorców, to procedura rozpoznawania dla danego wektora sygnałowego zostaje przerwana i dla danego sygnału należy wykonać dodatkową analizę wektora sygnałowego lub dokonać edycji wzorca sygnałowego, jeśli taka procedura była już wykonana.

Krok 2

Następuje określenie zgodności parametrów dodatkowych, związanych z modulacją okresu powtarzania impulsów. W kroku tym postępowanie jest identyczne jak w *kroku 1*, z tą różnicą, że wartość wskaźnika W_{OSP} jest iloczynem wartości tego wskaźnika uzyskanego w *kroku 1 etapu 3* i w *kroku 2 w etapie 3*.

Krok 3

Następuje określenie zgodności parametrów dodatkowych, związanych z czasem trwania impulsu. Należy dokonać sprawdzenia i/lub porównania paramet-

trów zapisanych w wektorach dodatkowych (uzupełniających) czasu trwania impulsu wektora sygnałowego i każdego z zakwalifikowanych do *kroku 3* w *etapie 3* wzorców.

W pierwszej kolejności należy sprawdzić zgodność liczby wyestymowanych wartości czasu trwania impulsu, a gdy wynik sprawdzenia jest pozytywny, należy porównać przedziałowo wartość (wartości) czasu trwania impulsu.

Wynik pozytywny realizowanych porównań przedziałowych jest wówczas, gdy wartość wskaźnika oceny stopnia przenikania (W_{OSP}) jest większa od zadanej wartości progowej.

Jeżeli wynik realizacji w *kroku 3* jest negatywny dla wszystkich wzorców, wówczas procedura rozpoznawania dla danego wektora sygnałowego zostaje przerwana i dla danego sygnału należy wykonać dodatkową analizę wektora sygnałowego lub dokonać edycji wzorca sygnałowego, jeśli taka procedura była już wykonana.

Łączny wynik pozytywny uzyskują te wzorce, które uzyskały pozytywne wyniki wszystkich sprawdzeń (realizowanych w *etapie 2* i *3*) oraz wartości wskaźnika oceny stopnia przenikania (W_{OSP}) dla wszystkich porównań przedziałowych (realizowanych w *etapie 1* i *3*) były większe od wartości progowych.

Łączna wartość wskaźnika oceny stopnia przenikania (W_{OSP}) jest iloczynem wartości tego wskaźnika, uzyskanych w *etapie 1* oraz w *kroku 1, 2* i *3 etapu 3*.

Odpowiednikiem danego wektora sygnałowego w bazie danych jest wzorzec (ze zbioru wzorców z pozytywnym wynikiem procedury rozpoznawania), który charakteryzuje się największą ze wszystkich wartością wypadkowego wskaźnika oceny stopnia przenikania (W_{OSP}).

6. Testowanie funkcji decyzyjnej

Realizacja procedury wyznaczania wskaźnika stopnia przenikania klas W_{OSP} była dokonywana w *etapie 1* oddzielnie dla każdego parametru:

- częstotliwości nośnej sygnału,
- okresu powtarzania impulsów,
- czasu trwania impulsu.

W przypadku każdego z powyższych parametrów dokonywano zmiany:

- szerokości przedziałów zmian wartości podstawowych parametrów pomiarowych sygnału radarowego przy założeniu stałego położenia przedziału tych zmian w stosunku do wzorca,
- położenia przedziałów zmian wartości podstawowych parametrów pomiarowych sygnału radarowego przy założeniu stałej szerokości przedziału tych zmian.

Powyższe zmiany dokonywane były w sposób skokowy jako procent zakresu zmian wartości podstawowych parametrów pomiarowych sygnału radarowego

w przedziale od -100% (całkowita rozłączność przedziałów) przez 0% (pokrywanie się zakresów) do 100% (ponownie całkowita rozłączność).

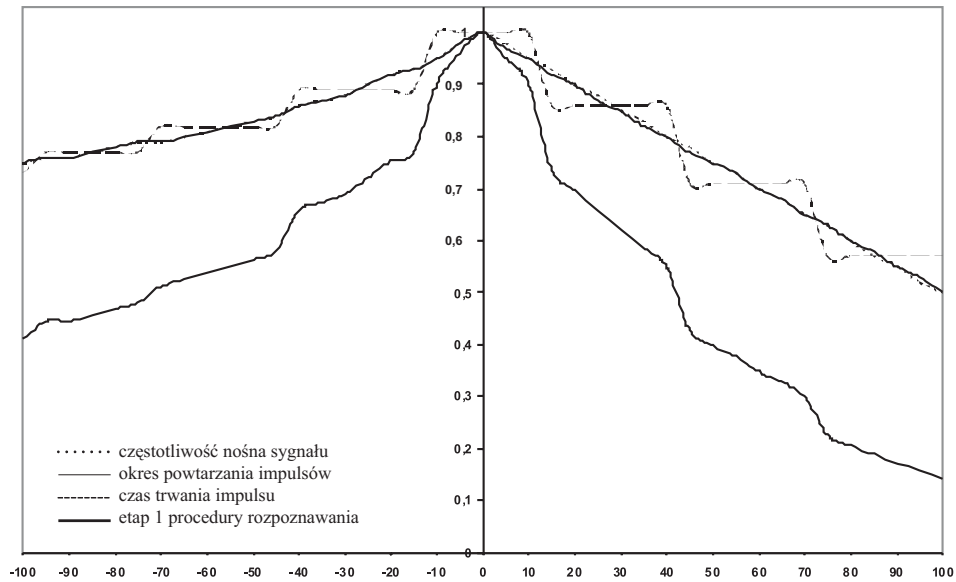
Jeżeli zaś chodzi o końcową wartość wskaźnika oceny stopnia przenikania klas to jest ona iloczynem wartości wskaźnika W_{OSP} , uzyskanych dla trzech ww. parametrów z etapu 1 oraz wskaźnika stopnia przenikania klas wyliczonego dla kroku 1, 2, 3 w etapie 3 procedury rozpoznawania.

Do testowania procedury rozpoznawania wykorzystano wzorce sygnałów radarowych, otrzymane w wyniku wielokrotnych pomiarów parametrów sygnałów radarowych wykonanych przez pracowników Instytutu Radioelektroniki WEL WAT. Badaniom poddano 20 wzorców wybranych losowo ze zbioru około 100 wektorów sygnałowych, znajdujących się w bazie danych. W artykule przedstawiono kilka z nich w celu zaprezentowania wyników. Na każdym wykresie oddzielnie przedstawione są wyniki obliczeń W_{OSP} dla wybranych wektorów. Poza tym, na każdym wykresie oddzielnie przedstawione są wyniki obliczeń dla poszczególnych parametrów (częstotliwość nośna sygnału, okres powtarzania impulsów, czas trwania impulsu) z etapu 1 oraz wartość wskaźników dla poszczególnych etapów realizacji procedury rozpoznawania.

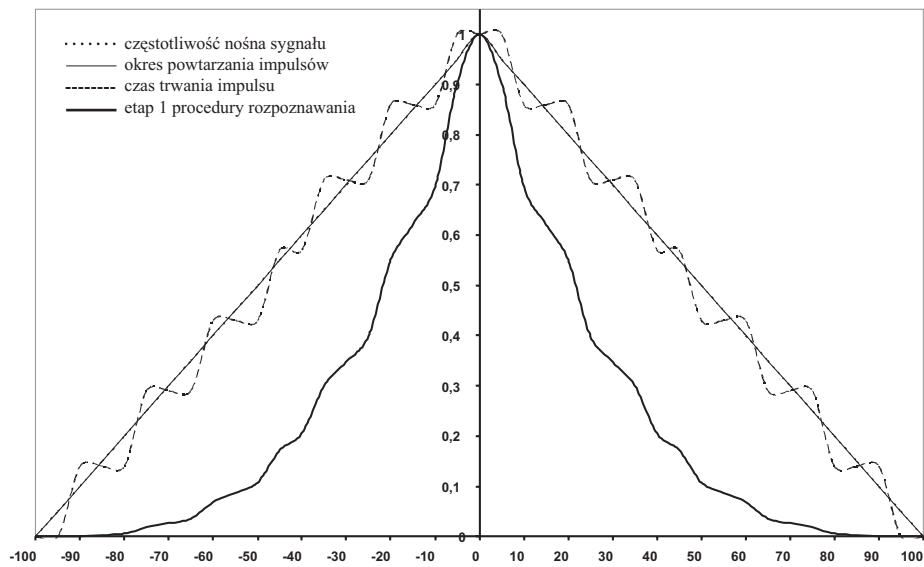
Wyniki obliczeń wskaźnika W_{OSP} dla poszczególnych etapów procedury rozpoznawania przedstawione zostały na rysunkach 9-16.

Osie opisane są następująco:

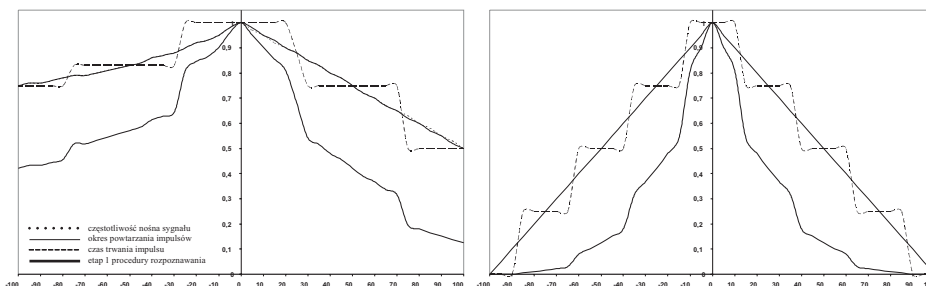
- 0X — procentowe zmiany wartości parametrów;
- 0Y — wartości wskaźnika W_{OSP} .



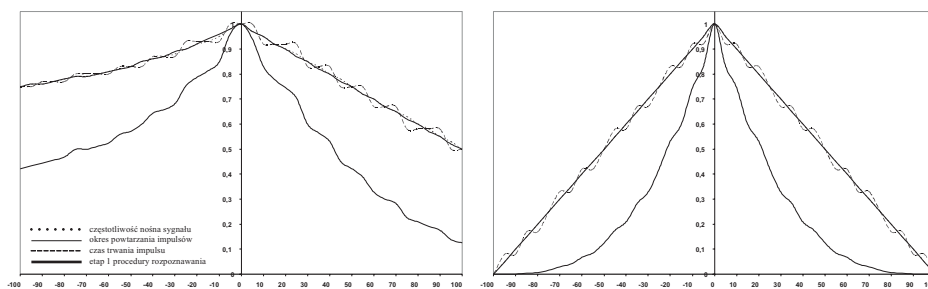
Rys. 9a. Przebieg W_{OSP} przy zmianie szerokości przedziałów zmian wartości podstawowych parametrów pomiarowych sygnału radarowego. Urządzenie 1 w BD — rekord podstawowy



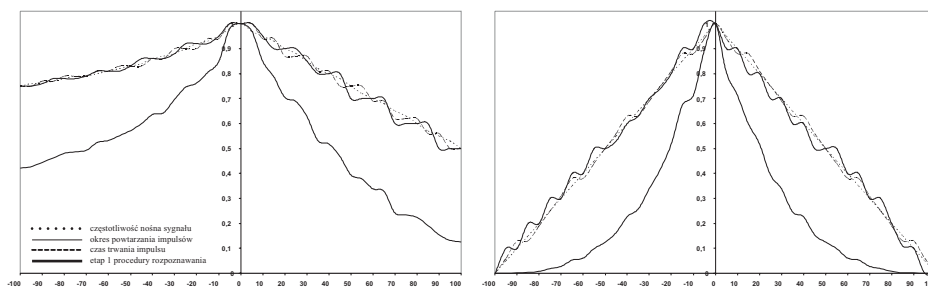
Rys. 9b. Przebieg W_{OSP} przy zmianie położenia przedziałów zmian wartości podstawowych parametrów pomiarowych sygnału radarowego. Urządzenie 1 w BD — rekord podstawowy



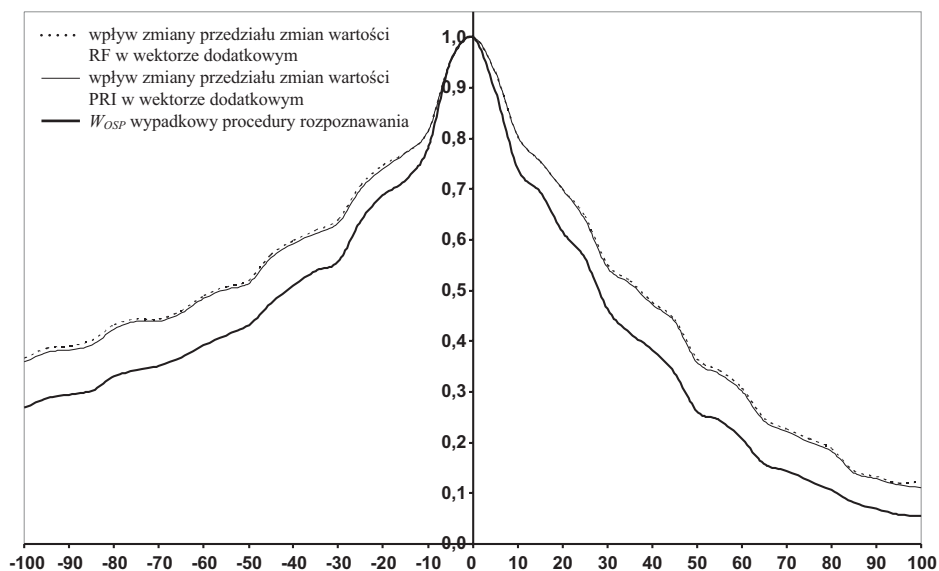
Rys. 10. Przebieg W_{OSP} przy zmianie szerokości (lewy) i położenia (prawy) przedziałów zmian wartości podstawowych parametrów pomiarowych sygnału radarowego. Urządzenie 2 w BD — rekord podstawowy



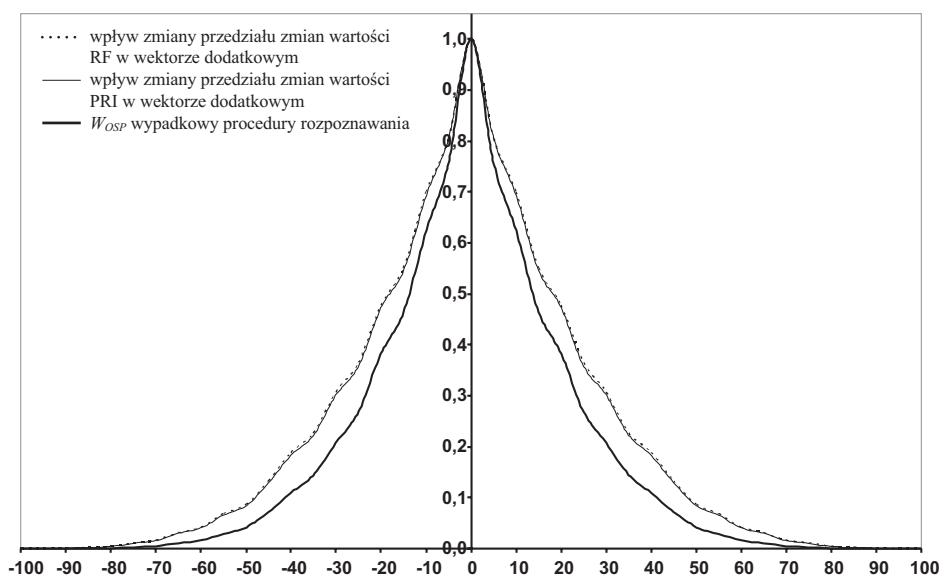
Rys. 11. Przebieg W_{OSP} przy zmianie szerokości (lewy) i położenia (prawy) przedziałów zmian wartości podstawowych parametrów pomiarowych sygnału radarowego. Urządzenie 3 w BD — rekord podstawowy



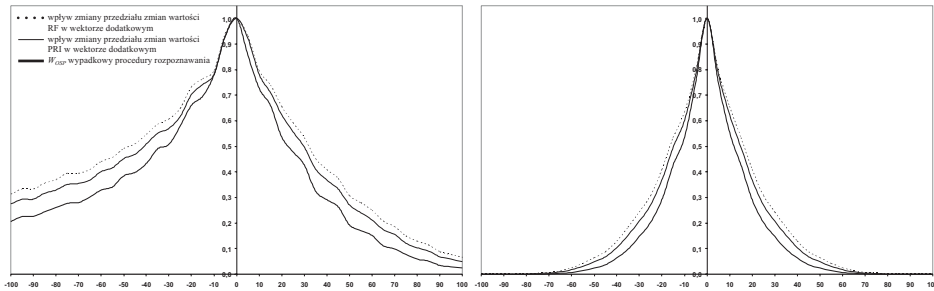
Rys. 12. Przebieg W_{OSP} przy zmianie szerokości (lewy) i położenia (prawy) przedziałów zmian wartości podstawowych parametrów pomiarowych sygnału radarowego. Urządzenie 4 w BD — rekord podstawowy



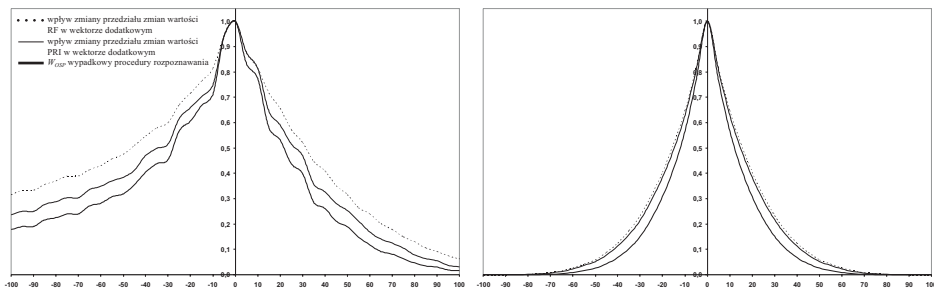
Rys. 13a. Przebieg W_{OSP} przy zmianie szerokości przedziałów zmian wartości podstawowych parametrów pomiarowych sygnału radarowego. Urządzenie 5 w BD — rekord dodatkowy (modulacja RF — sliding, modulacja PRI — nieznaną, liczba wartości PW — 1)



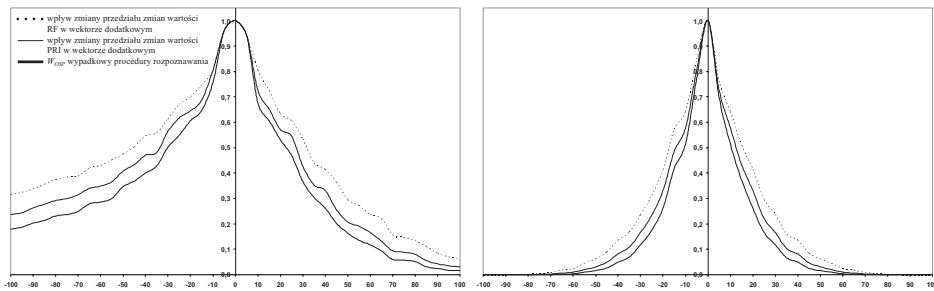
Rys. 13b. Przebieg W_{OSP} przy zmianie położenia przedziałów zmian wartości podstawowych parametrów pomiarowych sygnału radarowego. Urządzenie 5 w BD — rekord dodatkowy (modulacja RF — sliding, modulacja PRI — nieznaną, liczba wartości PW — 1)



Rys. 14. Przebieg W_{OSP} przy zmianie szerokości (lewy) i położenia (prawy) przedziałów zmian wartości podstawowych parametrów pomiarowych sygnału radarowego. Urządzenie 6 w BD — rekord dodatkowy (modulacja RF — stała, modulacja PRI — sliding, liczba wartości PW — 1)



Rys. 15. Przebieg W_{OSP} przy zmianie szerokości (lewy) i położenia (prawy) przedziałów zmian wartości podstawowych parametrów pomiarowych sygnału radarowego. Urządzenie 7 w BD — rekord dodatkowy (modulacja RF — stała, modulacja PRI — dwell, liczba wartości PW — 1)



Rys. 16. Przebieg W_{OSP} przy zmianie szerokości (lewy) i położenia (prawy) przedziałów zmian wartości podstawowych parametrów pomiarowych sygnału radarowego. Urządzenie 8 w BD — rekord dodatkowy (modulacja RF — stała, modulacja PRI — stała, liczba wartości PW — 1)

7. Wnioski końcowe

Podstawowym celem procedury rozpoznawania jest wyszukanie w zasobach BD tych wektorów wzorcowych, które są najbardziej zgodne z badanymi wektorami sygnałowymi.

Określanie zgodności realizowane jest oddzielnie dla każdego z parametrów w poszczególnych krokach algorytmu rozpoznawania i polega na wyznaczeniu wskaźnika oceny stopnia przenikania (W_{OSP}) przedziałów danego parametru, które są zapisane w wektorze sygnałowym i porównywanym wzorcu. Do kolejnego etapu procedury rozpoznawania klasyfikują się te wzorce wybrane z BD, dla których etapowa wartość W_{OSP} jest większa od zadanej wartości progowej.

Reasumując, należy zauważyć, że testowanie przeprowadzono na grupie losowo wybranych wzorców sygnałów radarowych, rekordach podstawowych i dodatkowych. W obydwu przypadkach dokonywano zmian szerokości i położenia przedziałów wartości podstawowych parametrów pomiarowych sygnału radarowego:

- częstotliwości nośnej sygnału,
- okresu powtarzania impulsów,
- czasu trwania impulsu.

Podsumowując wyniki przedstawione w powyższym artykule w postaci wykreślonych wskaźników W_{OSP} na poszczególnych etapach realizacji procedury rozpoznawania, należy stwierdzić, że w celu uzyskania wartości W_{OSP} na poziomie $0,8 \div 0,9$ w etapie 1 (rys. 9-12) zmiana szerokości przedziałów przenikania przedziałów parametrów nie powinna przekraczać $30 \div 40\%$, ale w przypadku zmiany zakresu zachodzenia przedziałów parametrów nie powinna przekraczać już $15 \div 25\%$. Natomiast, jeżeli rozpatrzymy etap 3 (rys. 13-16), to wartości te wynoszą odpowiednio dla zmiany szerokości $10 \div 15\%$, a dla zmiany położenia już tylko $5 \div 10\%$. Wykreślone wartości W_{OSP} wskazują wyraźnie, że znacznie większy wpływ na wartość W_{OSP} , a co z tym związane — poprawność rozpoznawania wektora sygnałowego, ma zdecydowanie zmiana położenia przedziału zmian wartości parametrów pomiarowych sygnału radarowego niż zmiana szerokości. W procedurze rozpoznawania sygnałów radarowych należałoby się również zastanowić nad możliwością wprowadzenia współczynników wagowych dla poszczególnych parametrów ze względu ich informatywność oraz dokładność pomiaru i estymacji.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.10.2005 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2006 r.

LITERATURA

- [1] Z. BUBNICKI, O. HRYNIEWICZ, R. KULIKOWSKI, *Badania operacyjne i systemowe wobec wyzwań XXI wieku*, t. 2: *Metody i techniki analizy informacji i wspomagania decyzji*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2004.

- [2] A. Л. ГОРЕЛИК, В. А. СКРИПКИН, *Методы распознавания*, Высшая Школа, Москва, 1977.
- [3] J. MATUSZEWSKI, M. SZTEMBERG, T. KRASZEWSKI, *Testowanie procedury rozpoznawania*, IRL WEL WAT, Warszawa 2004.
- [4] J. MATUSZEWSKI, S. WNUCZEK, *Analiza parametrów sygnałów radarowych wykorzystywanych w rozpoznaniu radioelektronicznym*, Materiały VII Konferencji Naukowej „Sterowanie i regulacja w radiolokacji i latających”, Jelenia Góra, 11-13.VI.1996.
- [5] J. MATUSZEWSKI, *Oceny informatywności parametrów sygnałów radiolokacyjnych w systemie rozpoznania i klasyfikacji źródeł promieniowania*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 1984.
- [6] D. C. SCHELHER, *Introduction to electronic warfare*, Artech House Inc., Dedham, MA, 1986.
- [7] K. STAPOR, *Automatyczna klasyfikacja obiektów*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
- [8] S. THEODORIDIS, K. KOUTROUMBAS, *Pattern recognition*, Academic Press, 1999.
- [9] R. G. WILEY, *Electronic Intelligence: The Interception of Radar Signals*, Artech House, Inc, 1985.

J. MATUSZEWSKI, T. KRASZEWSKI

Decision function testing of emission sources recognition algorithm

Abstract. The contemporary battlefield which are observed in several last armed conflicts indicate on the large meaning of electronic systems. The reconnaissance systems are the fundamental equipment to collect information about enemy, their activities, intentions and field actions.

The recognition of working emission sources performs on the basis of intercepted radar signals and measurement of their parameters. The set of parameters included in the electronic warfare emitter data base is the information source of the radar emissions. This set describes the recognized object (radar or target noise transmitter) and mod of its work. The correct emitters recognition is connected with preparing the adequate decision functions, procedures and algorithms of recognition process.

This paper presents the suitable method for the decision functions verification and their correctness of working. These functions are the components of emissions sources recognition algorithm. The described method uses the degree of infiltration assessment factor.

Keywords: electronic reconnaissance, decision functions, radiolocation

Universal Decimal Classification: 621.396.96

