



## Zastosowanie promieniowania pozapasmowego w specyficznym identyfikacji źródeł emisji

JANUSZ DUDCZYK\*, MARIAN WNUK, GRZEGORZ RÓŻAŃSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2  
\*JW. 4159 Skierniewice

**Streszczenie.** Jedną z podstawowych funkcji nowoczesnego systemu ESM/ELINT jest zdobywanie i gromadzenie informacji o rozpoznawanym źródle emisji oraz ich analiza. W ostatnich latach w państwach NATO obserwuje się szybki rozwój urządzeń i systemów walki radioelektronicznej (WRE). Znaczącą rolę zaczyna odgrywać rozpoznawanie sygnowane MASINT (ang. *Measurement and Signature Intelligence*), które wykorzystuje niezamierzone emisje uboczne obiektów, tzw. „ślady” spektralne, chemiczne lub częstotliwościowe. Proces specyficznego identyfikacji emiterów SEI (ang. *Specific Emitter Identification*), bazujący na wykorzystaniu cech dystyngtywnych (ekstrahowanych z promieniowania pozapasmowego), został zaprezentowany w niniejszym artykule. Szczególnie istotnym elementem jest zastosowanie bazy danych podczas procesu identyfikacji źródeł emisji elektromagnetycznej [4].

**Słowa kluczowe:** radiolokacja, kompatybilność elektromagnetyczna, rozpoznawanie

**Symbole UKD:** 621.396.96

### 1. Wprowadzenie

Doświadczenia z lokalnych konfliktów zbrojnych wskazują, że powodzenie działań wojennych uzależnione jest w dużym stopniu od następujących wymagań [6]:

- wykrywanie, identyfikacja, lokalizacja i ciągłe monitorowanie wszystkich istotnych elementów ugrupowania bojowego przeciwnika w obszarze zainteresowania dowódców poszczególnych szczebli dowodzenia,
- obieg informacji napływającej z różnych systemów rozpoznania i WRE w czasie rzeczywistym,

- natychmiastowy dostęp i możliwości przetwarzania wszystkich uzyskanych informacji,
- informowanie (w tym natychmiastowe na żądanie) dowództw i sztabów o aktualnej sytuacji bojowej,
- optymalizacja procesów dowodzenia wojskami i kierowania środkami walki,
- rozwiązywanie zadań bojowych na podstawie danych przechowywanych w pamięci systemu,
- przesyłanie utajnionych informacji do wszystkich szczebli dowodzenia,
- znaczne przyspieszenie przesyłania informacji w porównaniu z systemami klasycznymi.

Dostępne źródła informacji podejmują temat promieniowania pozapasmowego w kontekście kompatybilności elektromagnetycznej EMC (ang. *ElectroMagnetic Compatibility*) [8, 11]. Jej zadaniem jest zapewnienie harmonijnego współistnienia urządzeń i systemów w środowisku elektromagnetycznym poprzez osiągnięcie stanu, w którym rozpatrywany emiter w znikomym stopniu będzie oddziaływał na otaczające środowisko i jednocześnie będzie mało podatny na oddziaływanie tego środowiska. *Promieniowanie pozapasmowe* rozumiane jest jako emisja nieintencjonalna promieniowana do otoczenia, będąca pasożytniczym efektem pracy urządzeń radioelektronicznych.

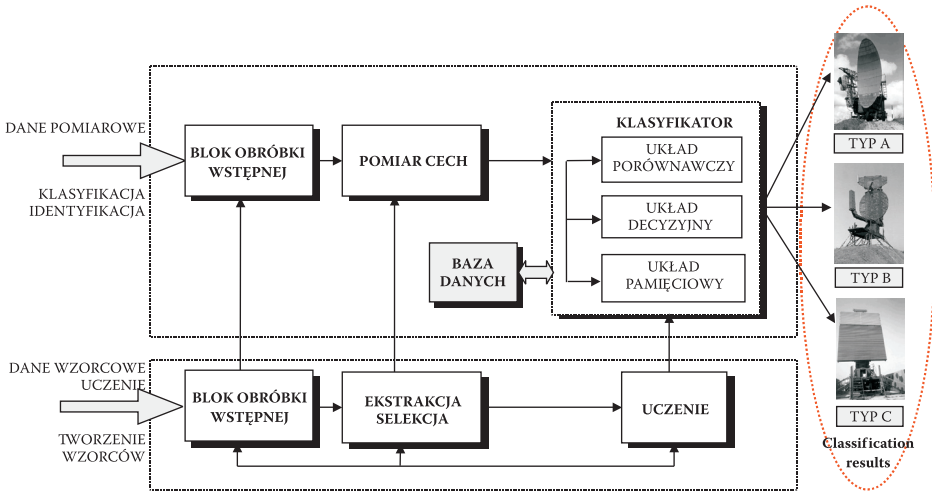
Informacja dla systemu RRE może pochodzić z różnych dziedzin zdobywania informacji rozpoznawczej, tj.: SIGINT (ang. *Signals Intelligence*), IMINT (ang. *Imagery Intelligence*), HUMINT (ang. *Human Intelligence*) oraz MASINT [1, 5, 6, 2]. Charakterystyka środowiska elektromagnetycznego na współczesnym polu walki oraz proces pozyskiwania, analizy i przetwarzania informacji rozpoznawczej dla celów identyfikacji urządzeń radioelektronicznych wskazują, że jednoznaczne rozróżnienie źródła emisji (egzemplarza) na podstawie mierzalnych parametrów podstawowych sygnału radarowego w wielu przypadkach jest niemożliwe. Wykorzystanie specyficznych właściwości pracy urządzeń radioelektronicznych, np. promieniowania pozapasmowego, może powodować wzrost prawdopodobieństwa poprawnej identyfikacji.

## 2. Klasyczny model identyfikacji źródeł emisji radarowej

W rozpoznawaniu sygnałów radarowych znaczącą rolę odgrywa proces analizy i podejmowania decyzji w czasie rzeczywistym. Wysoce specjalizowane i wyrafinowane systemy komputerowe muszą dokonywać analizy danych rozpoznawczych, selekcji, redukcji oraz ekstrakcji cech dystynktywnych pochodzących od nieznanymi źródeł emisji.

Identyfikacja sygnałów wykorzystująca techniki klasyczne (metody klasycznej identyfikacji), bazujące na analizie statystycznej podstawowych parametrów mie-

rzalnych sygnału, takich jak: częstotliwość nośna RF (ang. *Radio Frequency*), amplituda A (ang. *Amplitude*), czas trwania impulsu PW (ang. *Pulse Width*) czy okres powtarzania impulsów PRI (ang. *Pulse Repetition Interval*), jest dla problemów SEI niewystarczająca. Dlatego coraz częściej dla procesu rozpoznania adaptuje się metody, np. wykorzystania promieniowania pozapasmowego, które zwiększają jednoznaczność otrzymywanych wyników w procesie identyfikacji egzemplarzy ZE. Rysunek 2.1 ilustruje przykładową strukturę procesu klasyfikacji typów radarów.



Rys. 2.1. Klasyczny schemat strukturalny systemu identyfikacji radarów (co do typu)

Abstrahując od konkretnej treści rozpoznawanego obiektu (radaru), należy przyjąć, że można go zawsze opisać za pomocą pewnego zbioru cech. W wyniku procedury pomiarowej sygnału sondującego źródła emisji radarowej, można każdą z analizowanych jej  $N$  cech związać wartością liczbową. Wobec tego formalnym opisem tego radaru będzie zbiór  $N$  liczb  $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ , zwany *obrazem obiektu*. Zgodnie z dostępną literaturą, która podejmuje niniejszy temat, „wzorzec źródła emisji” powinien zawierać w swojej strukturze (sygnaturze), oprócz informacji mierzalnych, również informację (cechę radaru) niemierzalną, tj. taką, która może być wyrażona za pomocą łańcucha wyrazów (słów) czy wyrażenia logicznego. Sklasyfikowana w ten sposób informacja powinna być zawarta w projektowanej bazie danych systemu rozpoznania i WRE [4].

Do *informacji zmiennych w sposób ciągły* zalicza się takie, które mogą przyjmować dowolne wartości z zadanego przedziału osi liczb rzeczywistych.

Grupa *informacji dyskretnych pierwszego rodzaju* zawiera takie ich własności, które przyjmują wartości dyskretne 0/1 (tak/nie). Są to cechy o charakterze jakościowym, typu występowania lub braku pewnych własności.

Informacje drugiej grupy, zwane *informacjami dyskretnymi drugiego rodzaju*, charakteryzują nie pochodne elementy struktury obiektu za pomocą wyrazu, zdań lub łańcucha znaków umownych.

Przedstawiony powyżej sposób klasyfikacji informacji umożliwia poprawne zaprojektowanie metryki radaru w BD, a w dalszej części pozwoli zaimplementować BD w środowisku programowania, pozbawiając ją cech redundancji przy jednoczesnym zaadaptowaniu systemu eksperckiego (SE) wspomagającego końcową fazę procesu identyfikacji radarów. Szczególnie istotny jest fakt klasycznej identyfikacji (właściwie klasyfikacji), polegającej na rozróżnianiu źródła emisji radarowej w odniesieniu „co do typu”. Proces rozróżniania źródła emisji radiolokacyjnej w rozumieniu „co do egzemplarza” stanowi właściwą identyfikację źródła emisji elektromagnetycznej. Wobec powyższego wykorzystanie promieniowania pozapasmowego jest jedną z metod specyficznej identyfikacji emiterów SEI, umożliwiającą ich jednoznaczny identyfikację.

### 3. Metoda identyfikacji źródła emisji radarowej wykorzystująca jego promieniowanie pozapasmowe

Zaproponowana metoda identyfikacji źródeł emisji elektromagnetycznej (egzemplarzy radarów) polega na ekstrakcji dystynktywnych cech identyfikujących ZE w oparciu o wykorzystanie promieniowania pozapasmowego emitowanego przez rozpoznawane radary. Kolejne wartości częstotliwości, na których dokonano rejestracji sygnałów radarowych, odpowiadają poszczególnym punktom pomiarowym odzwierciedlającym poziom promieniowania pozapasmowego. Ilość punktów pomiarowych (w przestrzeni pomiarowej) została wybrana doświadczalnie i stanowi podwójną wartość maksymalnej szerokości filtra pośredniej częstotliwości odbiornika superheterodynowego, który został użyty w procedurze pomiarowej, tj. 40 MHz. Z tego założenia wynika graniczna pierwotna liczba punktów pomiarowych  $N = M = 80$ . Uzyskany zbiór punktów pomiarowych  $P$  Autorzy pracy przyporządkowali w formie wektorów pomiarowych prawostronnych  $\mathbf{p}^p$  i lewostronnych  $\mathbf{p}^l$  o początku w wybranym punkcie odniesienia  $f_0$ , takich, że:

$$\mathbf{p}^p = [p_1^p, p_2^p, \dots, p_N^p]^T \quad (3.1)$$

$$\mathbf{p}^l = [p_1^l, p_2^l, \dots, p_M^l]^T, \quad (3.2)$$

gdzie:

$$p_n^p = f_n^p - f_0 \quad \text{dla } n = 1, 2, \dots, N; \quad (3.3)$$

$$p_m^l = f_0 - f_m^l \quad \text{dla } m = 1, 2, \dots, M; \quad (3.4)$$

$f_n^p, f_m^l$  — pomiarowe wartości częstotliwości sygnału radarowego wyznaczające wektory punktów pomiarowych prawostronnych i lewostronnych.

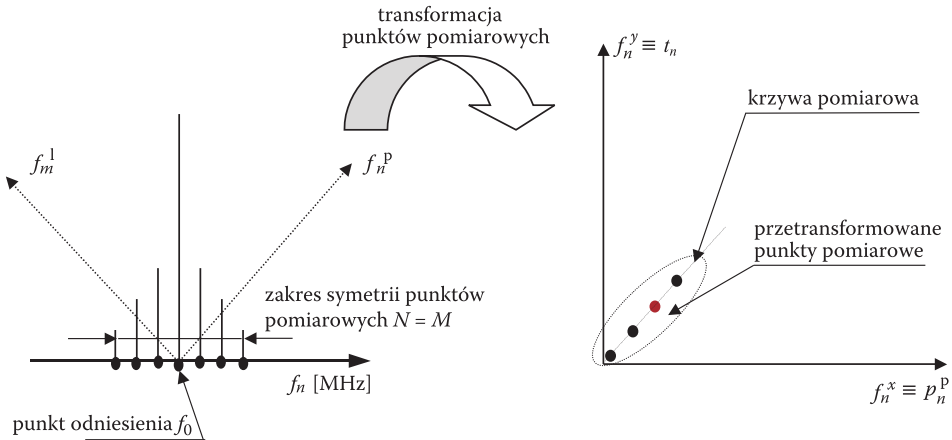
W celu wyznaczenia pożądanych cech selekcji dla procesu identyfikacji zastosowano następującą transformację:

$$\mathbf{t} = T(\mathbf{p}^p, \mathbf{A}), \tag{3.5}$$

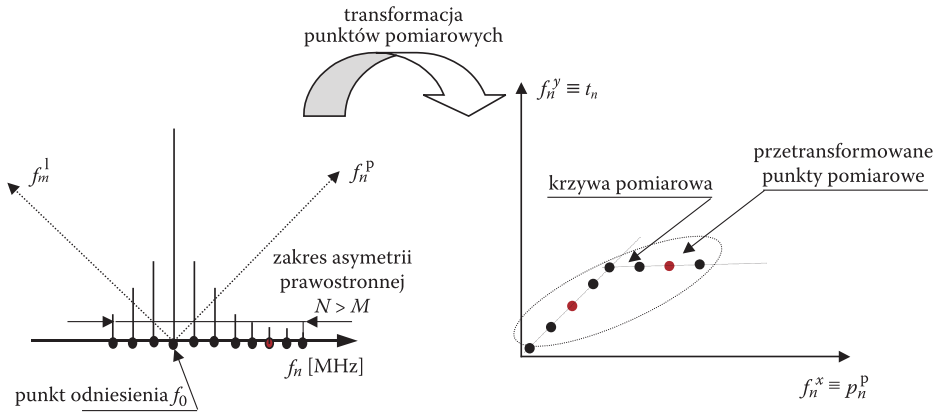
gdzie  $\mathbf{A}$  jest macierzą zadanej transformacji.

Analiza wyników pomiarowych została przeprowadzona w dwóch przypadkach, tj.:

- a)  $N \geq M$ , liczba punktów pomiarowych prawostronnych jest większa lub równa liczbie punktów pomiarowych lewostronnych. Analizowany przypadek został określony jako:
  - zakres symetrii punktów pomiarowych dla  $N = M$  (rys. 3.1),
  - zakres asymetrii prawostronnej punktów pomiarowych dla  $N > M$  (rys. 3.2).



Rys. 3.1. Zobrazowanie transformacji punktów pomiarowych w dwuwymiarową przestrzeń euklidesową  $E^2$  dla  $N = M$ , tj. zakresu symetrii punktów pomiarowych



Rys. 3.2. Zobrazowanie transformacji punktów pomiarowych w dwuwymiarową przestrzeń euklidesową  $E^2$  dla  $N > M$ , tj. zakresu asymetrii prawostronnej punktów pomiarowych

W tym przypadku odwzorowanie jest jednoznaczne i daje się przedstawić w formie macierzy blokowej

$$\begin{bmatrix} a_{11} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0_{1,N} \\ 0 & a_{22} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & a_{M,M} & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & b_{M+1,M} & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & b_{M+2,M} & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & b_{N,M} & \dots & \dots & \dots & 0_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1^p \\ p_2^p \\ \dots \\ p_M^p \\ p_{M+1}^p \\ p_{M+2}^p \\ \dots \\ p_N^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \dots \\ t_M \\ t_{M+1} \\ t_{M+2} \\ \dots \\ t_N \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

gdzie:  $a_{m,m} = 1$  dla  $m = 1, 2, \dots, M$ ;

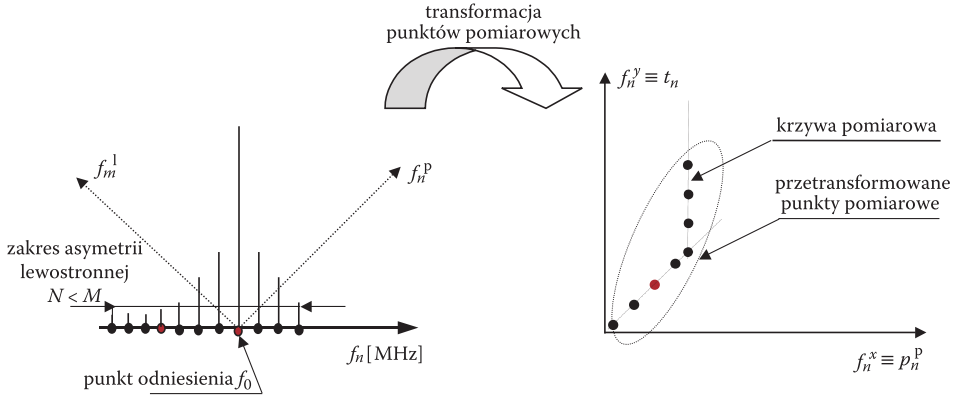
$b_{n,M} = 1$  dla  $n = M + 1, M + 2, \dots, N$ .

- b)  $N < M$ , liczba punktów pomiarowych prawostronnych jest mniejsza od liczby punktów pomiarowych lewostronnych. Analizowany przypadek został określony jako:

— zakres asymetrii lewostronnej punktów pomiarowych dla  $N < M$ .

W tym przypadku odwzorowanie (rys. 3.3) nie jest jednoznaczne i nie można go przedstawić w postaci jednej macierzy. Rozpatrując odwzorowanie odwrotne, takie że:

$\mathbf{p}^P = \mathbf{B} \mathbf{t}$ , otrzymano jednoznaczność transformacji, dla której  $\mathbf{B} = -\mathbf{A}$ . W ten sposób utworzono zapis graficzny odwzorowania dla przypadku  $N < M$  (rys. 3.3).



Rys. 3.3. Zobrazowanie transformacji punktów pomiarowych w dwuwymiarową przestrzeń euklidesową  $E^2$  dla  $N < M$ , tj. zakresu asymetrii lewostronnej punktów pomiarowych

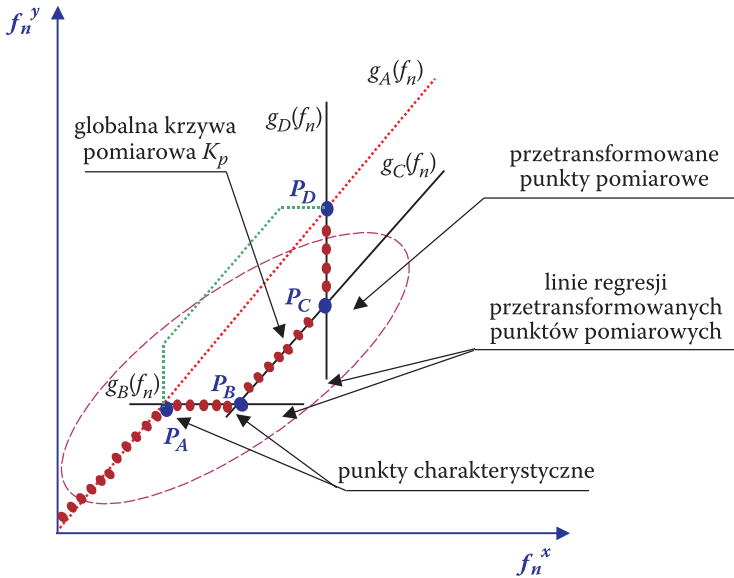
#### 4. Wyznaczenie globalnej funkcji pomiarowej zadanej punktami charakterystycznymi

W zależności od uzyskanej symetrii bądź asymetrii (lewo-/prawostronnej) punktów pomiarowych (uzyskanych z pomiaru zgodnie z procedurą pomiarową), ułożą się one, tworząc trzy różne punktowe wykresy rozrzutu (rys. 4.1). Przetransformowane oraz zobrazowane łącznie punkty pomiarowe tworzą tzw. globalną krzywą pomiarową  $K_p$ . W oparciu o utworzone wyrażenie smugi można wysunąć hipotezę, że funkcje  $g_A(f_n)$ ,  $g_B(f_n)$ ,  $g_C(f_n)$ ,  $g_D(f_n)$  należą do klasy funkcji liniowych, gdzie  $g_A(f_n)$ ,  $g_B(f_n)$ ,  $g_C(f_n)$ ,  $g_D(f_n)$  będą liniami regresji drugiego rodzaju dla smug utworzonych przez punkty pomiarowe.

Rysunek 4.2 ilustruje kształt globalnej krzywej pomiarowej. Zastosowanie regresji liniowej drugiego stopnia umożliwi wyznaczenie punktów charakterystycznych, np.  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$  i  $P_D$ , co zobrazowano na rysunku 4.1. Uogólnienie metody rozróżnialności (identyfikacji) źródła emisji radarowej bazującej na wykorzystaniu emisji nieintencjonalnej tego źródła polega na wyznaczeniu uogólnionej funkcji pomiarowej  $\hat{K}(f_n)$  przechodzącej przez zadane punkty charakterystyczne  $P_n$ , gdzie  $n = 0, 1, \dots, k_{gr}$ . Funkcja pomiarowa  $\hat{K}(f_n)$  w postaci wielomianu stopnia  $k$  zadana  $k + 1$  punktami charakterystycznymi, wyznaczona wzorem interpolacyjnym Lagrange'a, została wyrażona wzorem:

$$\hat{K}(f_n) = a_k f_n^k + a_{k-1} f_n^{k-1} + a_{k-2} f_n^{k-2} + \dots + a_0, \quad (4.1)$$

gdzie:  $a_k, a_{k-1}, \dots, a_0$  — parametry charakterystyczne uogólnionej funkcji pomiarowej.



Rys. 4.1. Wykres rozrzutu punktów pomiarowych po transformacji w dwuwymiarową przestrzeń euklidesową  $E^2$  w zobrazowaniu łącznym

Cecha  $\hat{S}$  określająca wartość pola powierzchni domkniętego obszaru płaskiego rozciągającego się od wykresu uogólnionej funkcji pomiarowej  $\hat{K}(f_n)$  w przedziale  $\langle f_n^{\min}, f_n^{\max} \rangle$  do osi  $Of_n^x$ , będzie wyrażona zależnością:

$$\hat{S} = \int_{f_n^{\min}}^{f_n^{\max}} \hat{K}(f_n) df_n = \int_{f_n^{\min}}^{f_n^{\max}} (a_k f_n^k + a_{k-1} f_n^{k-1} + a_{k-2} f_n^{k-2} + \dots + a_0) df_n. \quad (4.2)$$

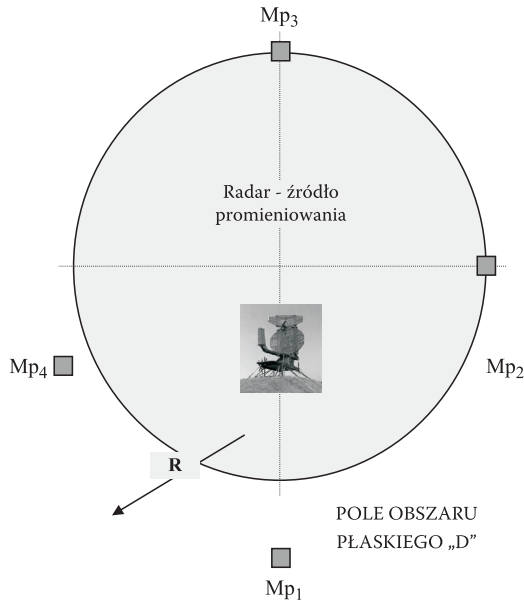
Jednocześnie długość łuku uogólnionej funkcji pomiarowej  $\hat{K}(f_n)$ , jako cecha rozróżnialności źródła emisji radarowej, będzie wyrażona poprzez długość łuku  $\hat{L}$  funkcji  $\hat{K}(f_n)$  w przedziale  $\langle f_n^{\min}, f_n^{\max} \rangle$ , zgodnie z poniższą zależnością:

$$\begin{aligned} \hat{L} &= \int_{f_n^{\min}}^{f_n^{\max}} \left[ 1 + \left( \frac{\partial \hat{K}(f_n)}{\partial f_n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} df_n = \\ &= \int_{f_n^{\min}}^{f_n^{\max}} \left[ 1 + (ka_k f_n^{k-1} + (k-1)a_{k-1} f_n^{k-2} + \dots + a_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} df_n. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Analizy wielkości pola pod funkcją pomiarową  $\hat{K}(f_n)$  oraz obliczenie długości jej łuku w zadanym przedziale  $\langle f_n^{\min}, f_n^{\max} \rangle$  wprowadza do opisu egzemplarza radaru (wektora cech podstawowych) cechy dodatkowe, które modyfikują wektor







Rys. 5.1. Schemat pomiaru emisyjności źródła promieniowania radiolokacyjnego

2. Pomiaru emisji pozapasmowej każdego egzemplarza radaru dokonano w czterech miejscach pomiarowych (oznaczonych  $M_{p_u}$ ;  $u = 1, 2, \dots, U$ ) z zachowaniem stałej odległości  $R = 2$  km od źródła emisji radarowej, gdzie:  $u$  — numer miejsca pomiarowego, w którym dokonano rejestracji;  $U$  — liczba miejsc pomiarowych dla danego egzemplarza radaru ( $U = 4$ ).
3. Wyboru trzech egzemplarzy do szczegółowej weryfikacji tego samego typu radaru dokonano w sposób, w którym ich dyslokacja zapewniała porównywalne (we wszystkich trzech przypadkach) ukształtowanie terenu w obszarze D ograniczonym okręgiem o promieniu  $R$ .
4. Dla przeprowadzonych pomiarów zachowano stałe wartości progów detekcji oraz stałe wartości czułości odbiornika ustalone podczas pomiaru na częstotliwości nośnej (podstawowej) analizowanego źródła emisji.
5. Dyskretność każdego pomiaru przy oddalaniu się od częstotliwości nośnej była uwarunkowana szerokością filtru p.cz. odbiornika pomiarowego.

### 5.1. Struktura wektora pomiarowego $V_{PDW}$

W czasie procedury pomiarowej uzyskano rejestracje sygnałów radarowych w postaci wektorów pomiarowych  $V_{PDW}$  (ang. *Pulse Description World*). Uzyskany wektor pomiarowy stanowi sformalizowaną strukturę danych typu rekordowego, gdzie poszczególne pola zawierają parametry częstotliwościowe i czasowe sygnału radiolokacyjnego zgodnie z poniższym opisem:

$$\mathbf{V}_{\text{PDW}} = \begin{bmatrix} T_p(1) & t_i(1) & f_n(1) \\ T_p(2) & t_i(2) & f_n(2) \\ \dots & \dots & \dots \\ T_p(k) & t_i(k) & f_n(k) \\ \dots & \dots & \dots \\ T_p(n) & t_i(n) & f_n(n) \end{bmatrix}, \quad (5.1)$$

gdzie:  $T_p(k)$  — okres powtarzania  $k$ -tego impulsu (odstęp do następnego);  
 $t_i(k)$  — czas trwania  $k$ -tego impulsu;  
 $f_n(k)$  — częstotliwość nośna  $k$ -tego impulsu;  
 $n$  — liczba impulsów w rejestracji zakwalifikowanych do analizy;  
 $k$  — numer impulsu w rejestracji.

### 5.2. Struktura wektorów cech podstawowych $\mathbf{V}_B$ , $\mathbf{V}_E$ oraz rozszerzonych testowych wektorów cech $\mathbf{V}_{TB}$ , $\mathbf{V}_{TE}$

W celu wyznaczenia wektorów cech, tj. wektora cech podstawowych  $\mathbf{V}_B$ , rozszerzonego wektora cech  $\mathbf{V}_E$  i wektorów testowych  $\mathbf{V}_{TB}$ ,  $\mathbf{V}_{TE}$  wykorzystano metodę odkładania  $M_H$  (ang. *holdout*). Metoda ta dzieli dostępny zbiór danych pomiarowych na dwa rozłączne zbiory, tj. na zbiór używany do uczenia klasyfikatora oraz zbiór służący do testowania klasyfikatora. Zazwyczaj stosuje się następujący podział dostępnego zbioru danych: 2/3 dostępnych danych tworzy zbiór uczący, a 1/3 — zbiór testowy. Na podstawie zarejestrowanego wektora pomiarowego  $\mathbf{V}_{\text{PDW}}$ , w procesie ekstrakcji przy użyciu metody odkładania  $M_H$ , zostały określone: wektor cech podstawowych  $\mathbf{V}_B$ , rozszerzony wektory cech  $\mathbf{V}_E$ , wektor testowy cech podstawowych  $\mathbf{V}_{TB}$  oraz rozszerzony wektor testowy cech  $\mathbf{V}_{TE}$ , zgodnie z poniższymi zależnościami:

$$\mathbf{V}_B = [\bar{f}_n^{M_H}, \bar{t}_i^{M_H}, \bar{T}_{p1}^{M_H}, \bar{T}_{p2}^{M_H}, \bar{T}_{p3}^{M_H}, \bar{T}_{p4}^{M_H}, \bar{T}_{p5}^{M_H}, \bar{T}_{p6}^{M_H}, \bar{T}_{p7}^{M_H}] \quad (5.2.)$$

$$\mathbf{V}_E = [\bar{f}_n^{M_H}, \bar{t}_i^{M_H}, \bar{T}_{p1}^{M_H}, \bar{T}_{p2}^{M_H}, \bar{T}_{p3}^{M_H}, \bar{T}_{p4}^{M_H}, \bar{T}_{p5}^{M_H}, \bar{T}_{p6}^{M_H}, \bar{T}_{p7}^{M_H}, \hat{S}, \hat{L}] \quad (5.3)$$

$$\mathbf{V}_{TB} = [\bar{f}_n^{\text{TM}_H}, \bar{t}_i^{\text{TM}_H}, \bar{T}_{p1}^{\text{TM}_H}, \bar{T}_{p2}^{\text{TM}_H}, \bar{T}_{p3}^{\text{TM}_H}, \bar{T}_{p4}^{\text{TM}_H}, \bar{T}_{p5}^{\text{TM}_H}, \bar{T}_{p6}^{\text{TM}_H}, \bar{T}_{p7}^{\text{TM}_H}] \quad (5.4)$$

$$\mathbf{V}_{TE} = [\bar{f}_n^{\text{TM}_H}, \bar{t}_i^{\text{TM}_H}, \bar{T}_{p1}^{\text{TM}_H}, \bar{T}_{p2}^{\text{TM}_H}, \bar{T}_{p3}^{\text{TM}_H}, \bar{T}_{p4}^{\text{TM}_H}, \bar{T}_{p5}^{\text{TM}_H}, \bar{T}_{p6}^{\text{TM}_H}, \bar{T}_{p7}^{\text{TM}_H}, \hat{S}, \hat{L}], \quad (5.5)$$

gdzie:  $\bar{f}_n^{M_H}$  — wzorcowa wartość średnia częstotliwości nośnej dla zastosowanej metody odkładania  $M_H$ ;

- $\bar{f}_n^{\text{TM}_H}$  — testowa wartość średnia częstotliwości nośnej dla zastosowanej metody odkładania  $M_H$ ;  
 $\bar{t}_i^{\text{M}_H}$  — wzorcowa wartość średnia czasu trwania impulsu dla zastosowanej metody odkładania  $M_H$ ;  
 $\bar{t}_i^{\text{TM}_H}$  — testowa wartość średnia czasu trwania impulsu dla zastosowanej metody odkładania  $M_H$ ;  
 $\bar{T}_{p1}^{\text{M}_H} \div \bar{T}_{p7}^{\text{M}_H}$  — wzorcowe wartości średnie okresu powtarzania impulsu dla zastosowanej metody odkładania  $M_H$ ;  
 $\bar{T}_{p1}^{\text{TM}_H} \div \bar{T}_{p7}^{\text{TM}_H}$  — testowe wartości średnie okresu powtarzania impulsu dla zastosowanej metody odkładania  $M_H$ ;  
 $\hat{S}$  — wartość pola powierzchni pod uogólnioną funkcją pomiarową  $\hat{K}(f_n)$ ;  
 $\hat{L}$  — długość łuku uogólnionej funkcji pomiarowej  $\hat{K}(f_n)$ .

Poszczególne cechy składowe wektorów cech zostały wyznaczone według następujących zależności:

$$\bar{f}_n^{\text{M}_H} = \frac{1}{n_{w(t)}} \sum_{i=1}^{n_{w(t)}} f_n(i) \quad (5.6)$$

$$\bar{t}_i^{\text{M}_H} = \frac{1}{n_{w(t)}} \sum_{i=1}^{n_{w(t)}} t_i(i) \quad (5.7)$$

$$T_{ps_{w(t)}}^l \text{M}_H = \bar{T}_{pl}^{\text{M}_H} = \frac{1}{s_{w(t)l}} \sum_{j=1}^{s_{w(t)l}} T_{pj}^l, \quad (5.8)$$

- gdzie:  $n_w$  — wzorcowa liczba impulsów w rejestracji zakwalifikowanych do analizy w procesie tworzenia wektora cech  $V_B$  i  $V_E$  dla zastosowanej metody odkładania  $M_H$ ;  
 $n_t$  — testowa liczba impulsów w rejestracji zakwalifikowanych do analizy w procesie tworzenia wektorów testowych cech  $V_{TB}$  i  $V_{TE}$ , wynikająca z zastosowanej metody odkładania  $M_H$ ;  
 $l$  — numer klasy szeregu rozdzielczego (histogramu);  
 $s_w$  — liczebność wzorcowa w danej klasie szeregu rozdzielczego (histogramu), wynikająca z zastosowanej metody dokładania  $M_H$ ;  
 $s_t$  — liczebność testowa w danej klasie szeregu rozdzielczego (histogramu), wynikająca z zastosowanej metody odkładania  $M_H$ .

### 5.3. Rezultaty analizy sygnałów radarowych — procedura identyfikacji egzemplarzy radarów

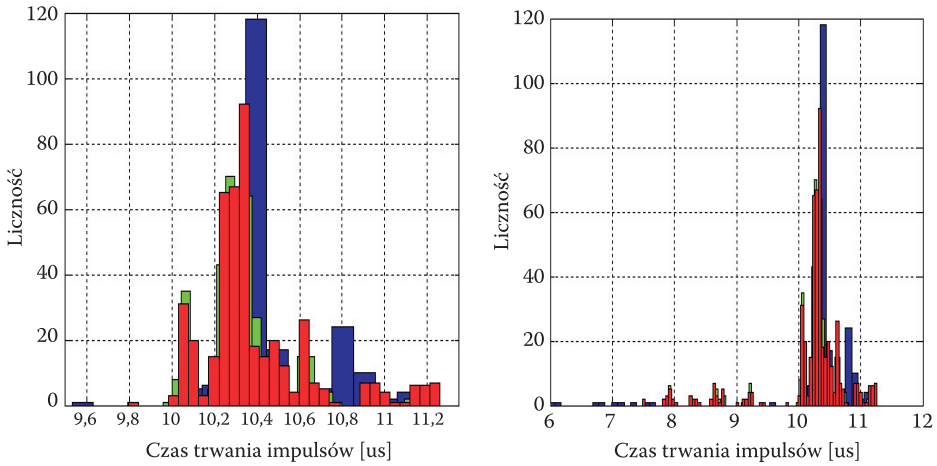
Wyniki analizy uzyskanych pomiarów zostały przeprowadzone według następującego schematu:

- dokonano wyselekcjonowania trzech egzemplarzy źródeł emisji, dla których podstawowe parametry mierzone sygnału radarowego najbardziej się przenikały;
- na podstawie zarejestrowanych wektorów pomiarowych  $\mathbf{V}_{PDW}$  przy wykorzystaniu metody odkładania  $M_H$  utworzone zostały wzorce klas radarów oraz wektory testowe, tj.:
  - wektor cech podstawowych  $\mathbf{V}_B$ ,
  - rozszerzony wektor cech  $\mathbf{V}_E$  (o cechy postaci  $\hat{S}$  i  $\hat{L}$  uzyskane z wykorzystania promieniowania pozapasmowego pochodzącego od badanych źródeł emisji — egzemplarzy radarów),
  - wektor testowy cech podstawowych  $\mathbf{V}_{TB}$ ,
  - rozszerzony wektor testowy cech  $\mathbf{V}_{TE}$  (o cechy postaci  $\hat{S}$  i  $\hat{L}$  uzyskane z wykorzystania promieniowania pozapasmowego pochodzącego od badanych źródeł emisji — egzemplarzy radarów);
- proces identyfikacji zrealizowano w oparciu o:
  - pomiar odległości i pomiar podobieństwa,
  - podjęcie decyzji przy zastosowaniu kryterium klasyfikacji minimalno-odległościowej;
- funkcjonalem oceny zgodności próby testowej z określoną klasą była odległość Mahalanobisa, Euklidesa, Hamminga oraz cosinusowa miara podobieństwa;
- jako kryterium klasyfikacji zostało zastosowane jedno z podstawowych kryteriów progowych, tj. kryterium „najbliższego sąsiada”;
- w celu oceny jakości procesu klasyfikacji/identyfikacji wyznaczono wskaźnik poprawnej klasyfikacji.

W trakcie procedury pomiarowej dokonano rejestracji sygnałów radarowych emitowanych przez osiem urządzeń radarowych ( $V = 8$ ) tego samego typu, pracujących na posterunkach radiolokacyjnych. Uzyskane zbiory rejestracji zostały przedstawione w różnych zobrazowaniach graficznych. Jako reprezentatywną próbę do dalszych badań umożliwiających potwierdzenie zasadności wykorzystania promieniowania pozapasmowego (w celu identyfikacji egzemplarzy ZE), dokonano wyselekcjonowania trzech posterunków radiolokacyjnych, tj.  $v = 5$ ,  $v = 6$  i  $v = 7$ , których podstawowe parametry mierzone sygnałów radarowych pochodzących od owych źródeł przenikają się w największym stopniu.

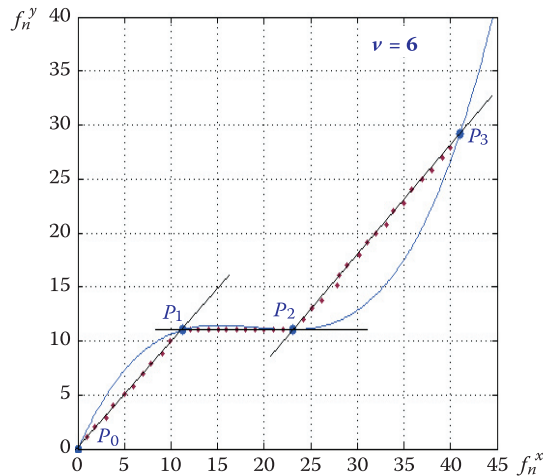
Przedstawienie naturalnego rozkładu wartości częstotliwości nośnej, czasu trwania impulsów oraz okresu powtarzania impulsów zrealizowano przy użyciu metody histogramowej oraz techniki hierarchicznego grupowania danych wykorzystującej algorytm hierarchicznego podziału i grupowania „z dołu do góry”. Przykładowe zobrazowania graficzne zostały zaprezentowane na rysunku 5.2.

W oparciu o zaprezentowaną wcześniej metodę transformacji, uzyskane wektory pomiarowe zostały przetransformowane w dwuwymiarową przestrzeń euklidesową. Zastosowanie regresji liniowej pozwoliło na wyznaczenie współrzędnych punktów



Rys. 5.2. Histogram częstotliwości nośnej dla trzech wybranych egzemplarzy ( $\nu = 5, 6, 7$ ) źródeł emisji radarowych tego samego typu zobrazowanych łącznie

charakterystycznych, poprzez które przeprowadzono globalną funkcję pomiarową  $\hat{K}(f_n)$  w postaci wielomianu aproksymującego Lagrange'a stopnia  $k$ . Wyznaczenie funkcji  $\hat{K}(f_n)$  umożliwia ekstrakcję cech dystyngtywnych w postaci  $\hat{S}$  i  $\hat{L}$ , które modyfikują strukturę wektora cech podstawowych  $\mathbf{V}_B$ . Przykładowy rezultat zaimplementowanych procedur numeryczno-graficznych dla analizowanych egzemplarzy radarów został zaprezentowany na rysunku 5.3.



Rys. 5.3. Zobrazowanie punktów pomiarowych po ich transformacji w dwuwymiarową przestrzeń euklidesową  $E^2$  oraz wykres uogólnionej funkcji pomiarowej  $\hat{K}(f_n)$  zadanej wyznaczonymi punktami charakterystycznymi  $P_0, P_1, P_2, P_3$  dla  $\nu = 6$

TABELA 5.1

Zestawienie obliczeń wartości cech wynikających z pomiaru promieniowania pozapasmowego egzemplarzy radarów  $\nu = 5, \nu = 6$  i  $\nu = 7$

			$\hat{S}$	$\hat{L}$
Copy of radar $\nu = 5$	number of measuring place	$u = 1$	827,934	65,064
		$u = 2$	831,854	65,368
		$u = 3$	829,892	65,214
		$u = 4$	828,954	65,14
Copy of radar $\nu = 6$	number of measuring place	$u = 1$	412,083	53,538
		$u = 2$	410,544	53,333
		$u = 3$	413,029	53,655
		$u = 4$	411,164	53,413
Copy of radar $\nu = 7$	number of measuring place	$u = 1$	1456,623	69,268
		$u = 2$	1453,947	69,1
		$u = 3$	1460,533	69,413
		$u = 4$	1455,754	69,186

TABELA 5.2

Wyniki analizy numerycznej dla odległości Hamminga ( $d_H$ )

$d_H$		$V_{Bt}^r$											
		$t=1$ $r=5$	$t=2$ $r=5$	$t=3$ $r=5$	$t=4$ $r=5$	$t=1$ $r=6$	$t=2$ $r=6$	$t=3$ $r=6$	$t=4$ $r=6$	$t=1$ $r=7$	$t=2$ $r=7$	$t=3$ $r=7$	$t=4$ $r=7$
$V_{TB}^j$	$i=1$ $j=5$	0,243	0,243	0,24	0,242	0,221	0,218	0,22	0,221	0,202	0,209	0,188	0,197
	$i=2$ $j=5$	0,25	0,25	0,242	0,249	0,228	0,22	0,226	0,228	0,175	0,215	0,194	0,183
	$i=3$ $j=5$	0,232	0,232	0,224	0,231	0,210	0,202	0,209	0,21	0,213	0,198	0,192	0,212
	$i=4$ $j=5$	0,225	0,225	0,217	0,224	0,203	0,195	0,202	0,203	0,204	0,197	0,183	0,203
	$i=1$ $j=6$	0,042	0,027	0,036	0,046	0,005	0,023	0,026	0,02	0,067	0,037	0,045	0,05
	$i=2$ $j=6$	0,066	0,061	0,059	0,042	0,039	0,043	0,02	0,044	0,088	0,031	0,066	0,081
	$i=3$ $j=6$	0,054	0,046	0,032	0,053	0,024	0,01	0,03	0,032	0,052	0,033	0,045	0,057
	$i=4$ $j=6$	0,041	0,043	0,05	0,056	0,026	0,042	0,041	0,018	0,086	0,052	0,047	0,07
$i=1$ $j=7$	0,125	0,117	0,112	0,102	0,095	0,092	0,08	0,103	0,136	0,086	0,121	0,133	

cd. tabeli 5.2

$i = 2$ $j = 7$	0,132	0,116	0,1	0,126	0,094	0,077	0,104	0,11	0,122	0,109	0,125	0,13
$i = 3$ $j = 7$	0,125	0,105	0,11	0,126	0,083	0,088	0,104	0,103	0,13	0,106	0,116	0,116
$i = 4$ $j = 7$	0,114	0,116	0,117	0,125	0,094	0,095	0,103	0,092	0,135	0,103	0,103	0,125

TABELA 5.3

Wyniki analizy numerycznej dla odległości Hamminga ( $d_H$ )

$d_H$		$V_{Et}^r$											
		$t = 1$ $r = 5$	$t = 2$ $r = 5$	$t = 3$ $r = 5$	$t = 4$ $r = 5$	$t = 1$ $r = 6$	$t = 2$ $r = 6$	$t = 3$ $r = 6$	$t = 4$ $r = 6$	$t = 1$ $r = 7$	$t = 2$ $r = 7$	$t = 3$ $r = 7$	$t = 4$ $r = 7$
$V_{TE}^j$	$i = 1$ $j = 5$	0,199	0,522	0,355	0,279	14,248	14,461	14,131	14,381	50,546	50,236	50,758	50,374
	$i = 2$ $j = 5$	0,527	0,204	0,362	0,445	14,577	14,795	14,459	14,709	50,201	49,918	50,44	50,033
	$i = 3$ $j = 5$	0,349	0,354	0,183	0,267	14,398	14,607	14,281	14,531	50,396	50,067	50,603	50,227
	$i = 4$ $j = 5$	0,265	0,426	0,256	0,183	14,314	14,523	14,197	14,447	50,467	50,14	50,673	50,298
	$i = 1$ $j = 6$	14,102	14,413	14,256	14,186	0,004	0,234	0,137	0,149	64,503	64,162	64,709	64,321
	$i = 2$ $j = 6$	14,337	14,656	14,49	14,398	0,242	0,035	0,348	0,119	64,735	64,373	64,942	64,562
	$i = 3$ $j = 6$	13,995	14,311	14,137	14,075	0,136	0,34	0,025	0,275	64,375	64,042	64,593	64,21
	$i = 4$ $j = 6$	14,233	14,558	14,4	14,327	0,153	0,117	0,282	0,015	64,651	64,307	64,843	64,47
	$i = 1$ $j = 7$	50,483	50,154	50,313	50,382	64,525	64,739	64,396	64,665	0,111	0,387	0,322	0,277
	$i = 2$ $j = 7$	50,173	49,837	49,987	50,087	64,209	64,411	64,101	64,355	0,416	0,089	0,642	0,254
	$i = 3$ $j = 7$	50,707	50,368	50,536	50,627	64,74	64,959	64,64	64,889	0,33	0,627	0,095	0,487
	$i = 4$ $j = 7$	50,306	49,985	50,149	50,343	64,357	64,572	64,248	64,411	0,279	0,233	0,477	0,102

Metoda ekstrakcji cech wykorzystująca promieniowanie pozapasmowe umożliwiła obliczenia numeryczne cech postaci  $\hat{S}$ ,  $\hat{L}$  dzięki wykorzystaniu zależności (4.2) oraz (4.3). Uzyskane wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 5.1.

Przykładowe rezultaty obliczeń numerycznych poszczególnych miar odległości zostały zamieszczone w tabelach 5.2 i 5.3. Odpowiednio skrzyżowane kolumny i wiersze każdego z wektorów testowych cech podstawowych  $V_{TB}$  oraz wzorców radarów w postaci wektorów cech podstawowych  $V_B$  przedstawiają stopień ich podo-



bieństwa. Dla funkcji odległości mniejsza wartość oznacza większe podobieństwo wektora testowego cech podstawowych  $V_{TB}$  do wektora cech podstawowych  $V_B$ .

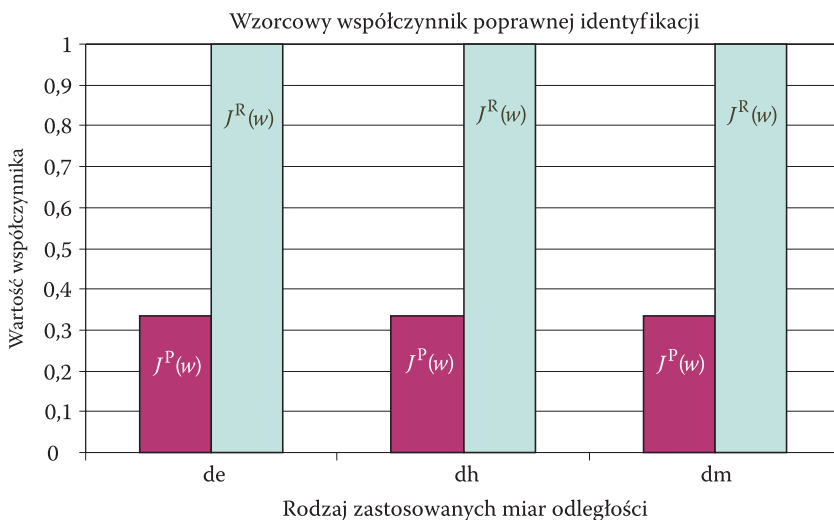
Aby porównać zastosowaną w pracy metodę identyfikacji egzemplarzy radarów, wykorzystującą promieniowanie pozapasmowe, z metodą klasyczną rozpoznania, wyznaczono wartości współczynników poprawnej identyfikacji, które zostały przedstawione w tabelach 5.4 i 5.5 oraz zilustrowane na rysunku 5.4.

TABELA 5.4  
Wartości współczynników poprawnej identyfikacji dla klasycznej metody identyfikacji

$V_{TB} - V_B$	Applied distance function		
	$d_E$	$d_H$	$d_M$
$J^P(k)$	0,167	0,167	0,167
$J^P(w)$	0,334	0,334	0,334

TABELA 5.5  
Wartości współczynników poprawnej identyfikacji dla metody wykorzystującej promieniowanie pozapasmowe

$V_{TE} - V_E$	Applied distance function		
	$d_E$	$d_H$	$d_M$
$J^R(k)$	1	1	0,916
$J^R(w)$	1	1	1



Rys. 5.4. Wykres wartości współczynników poprawnej identyfikacji

## 6. Wnioski

Analiza wielkości pola pod funkcją pomiarową  $K(f_n)$  oraz obliczenie długości jej łuku w zadanym przedziale  $\langle f_n^{\min}, f_n^{\max} \rangle$  wprowadzają do opisu egzemplarza radaru (wektora cech podstawowych) cechy dodatkowe, które modyfikują wektor podstawowych parametrów mierzalnych sygnału radarowego. Cechy postaci  $\hat{L}$  i  $\hat{S}$  wynikają bezpośrednio z pomiaru i analizy promieniowania pozapasmowego źródła emisji radarowej i stanowią informację dystynktywną będącą dobrą miarą separacji w celu jednoznacznego rozróżnienia egzemplarza źródła emisji. Nowoczesny system rozpoznania radioelektronicznego powinien wykorzystywać niezamierzone emisje uboczne promieniowane przez urządzenia radioelektroniczne. W związku z szeroko pojętym zagadnieniem dotyczącym tzw. gospodarki widmem elektromagnetycznym, wykorzystanie niezamierzonej emisji pozapasmowej promieniowanej przez urządzenia radioelektroniczne staje się ważne nie tylko ze względu na cele kompatybilności elektromagnetycznej, ale również ze względu na rozpoznanie i identyfikację źródeł emisji elektromagnetycznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 19.07.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 9.10.2006 r.

### LITERATURA

- [1] C21, *The Intelligence Community in the 21<sup>st</sup> Century. MASINT: Measurement and Signatures Intelligence*, [http://www.fas.org/irp/congress/1966\\_rpt/ic21/ic21007.htm](http://www.fas.org/irp/congress/1966_rpt/ic21/ic21007.htm).
- [2] CISPR Publication 11, *Limits and methods of measurement of electromagnetic disturbance characteristic of industrial, scientific and medical, radio-frequency equipment*, 1990.
- [3] M. L. CRAWFORD, J. L. WORKMAN, *Using a TEM Cell for EMC Measurements of Electronic Equipment*, NBS Technical Note 1013, US Department of Commerce, Washington, 1981.
- [4] J. DUDCZYK, J. MATUSZEWSKI, M. WNUK, *The relational modelling approach to designing the emitter database*, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference and Exposition, *Complementarity of Ladar and Radar*, Prague, Czech Republic, 22-23 April 2002.
- [5] L. FRANCAERT, *Mastering Information*, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International EW Conference and Exposition, May 21-24, 2000, Zurich, Switzerland.
- [6] Intelligence Collection, <http://lga-inc.com/products/dali/example.htm>.
- [7] PN-89/E-06251, *Industrial Radio-electrical disturbances. Technical information science equipments. Limited level disturbances. Requirements and analysis*.
- [8] W. ROTKIEWICZ, *Electromagnetic Compatibility in Radio-technique*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1978.
- [9] L. SREENIVASIAH, D. C. CHANG, T. M. MA, *Emission Characteristics of Electrically Small Radiating Sources from Tests Inside a TEM Cell*, IEEE Transactions on EMC, vol. EMC-23, no. 3, August 1981, 113-121.
- [10] T. W. WIĘCKOWSKI, D. J. BEM, Z. M. JÓSKIEWICZ, *GTEM Cell in the Emission Tests for Electronic Equipment*, Proceedings of the International Symposium on EMC, St. Petersburg, 1995.

- [11] T. WIĘCKOWSKI, *The Radiation Measurement of Electric and Electronic Equipment*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997.
- [12] L. ZACHARY, *The Measure of MASINT*, [http://www.fas.org/MASINT\\_JED.htm](http://www.fas.org/MASINT_JED.htm).

J. DUDCZYK, M. WNUK, G. RÓŻAŃSKI

### **Radiated emission approach to specific emitter identification**

**Abstract.** One of the most principal functions of the ESM/ELINT system is gathering basic information from the entire electromagnetic spectrum and its analysis. A significant role plays Measurement and Signature Intelligence (MASINT) based on non-intentional emission (called - radiated emission). This emission is a source of knowledge about an analysed emitter due to its incidental “chemical”, “spectral” traces, and non-communication emitter’s characteristics. The process of Specific Emitter Identification (SEI) based on extraction of distinctive radiated emission features is presented here. Especially important is utilization of a database (DB) in the process of identifying a detectable radar emission (Ref. 4).

**Keywords:** radar, electromagnetic compatibility, recognition

**Universal Decimal Classification:** 621.396.96

