

Wykorzystanie cech fraktalnych ekstrahowanych z sygnałów radarowych w procesie specyficznej identyfikacji

Streszczenie. W artykule przedstawiono procedurę rozpoznawania źródeł emisji radarowych o słabo dystyngtywnych cechach pierwotnych sygnału. Wykorzystano w tym celu cechy fraktalne ekstrahowane z sygnałów radarowych pochodzących od tych źródeł emisji. Procedura ta jest specyficznym rodzajem identyfikacji, znana jako Specific Emitter Identification. W wyniku zastosowanej procedury, możliwa jest jednoznaczna identyfikacja źródła sygnału radarowego co do jego egzemplarza.

Abstract. This article presents the procedure of radar emitter sources identification with low distinctive primary features of a signal. Fractal features extracted from incoming radar signals have been used during this method. This procedure is a specific type of recognition called Specific Emitter Identification. As a result of this procedure it is possible to identify a radar copy of the same type more precisely. (The use of fractal features extracted from radar signals in the process of specific identification).

Słowa kluczowe: rozpoznawanie wzorców, specyficzna identyfikacja emiterów, cecha fraktalna, wskaźnik poprawnej identyfikacji.

Keywords: pattern recognition, Specific Emitter Identification, fractal feature, correct Identification index.

doi:10.12915/pe.2014.11.54

Problem identyfikacji klasycznej

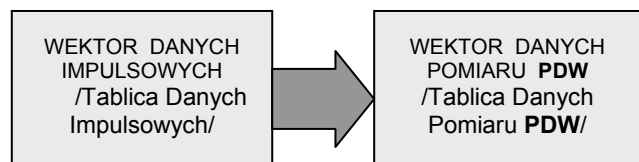
Pojęcie rozpoznawania źródeł emisji (ZE) funkcjonuje w teorii rozpoznania radioelektronicznego (RRE) w dwóch znaczeniach, tj. w szerokim i wąskim sensie [1]. Rozpoznanie ZE w szerokim sensie polega na możliwie dokładnym określeniu miejsca położenia, przeznaczenia i możliwości tego źródła na podstawie wyników analizy pomiarów parametrów wykrytych i namierzonych sygnałów tych ZE. Rozpoznanie rozumiane w wąskim sensie polega na klasyfikacji tych sygnałów. Zależnie od stopnia szczegółowości, rozpoznanie ZE rozumiane w wąskim sensie może dotyczyć klasyfikacji typów oraz identyfikacji egzemplarzy, gdzie klasyfikacja typów źródeł emisji dotyczy podziału zbioru sygnałów ZE na grupy sygnałów, odpowiadające poszczególnym rodzajom źródeł emisji. Identyfikacja egzemplarzy dotyczy podziału zbioru sygnałów na grupy, odpowiadające poszczególnym egzemplarzom należącym do tego samego typu. Rozpoznanie ZE poprzez klasyfikację pochodzących od nich sygnałów można sprowadzić do problemu rozpoznawania obiektów poprzez rozpoznawanie obrazów tych obiektów. Techniki rozpoznawania obrazów są obecnie rozwiniętymi dziedzinami nauki, jednak w wielu przypadkach nie udało się sformułować optymalnego modelu ich rozpoznawania [2].

W klasycznym systemie RRE źródłem obrazów są radary będące przedmiotem rozpoznania o cechach dyskretnych oraz zmiennych w sposób ciągły [3,4]. Cechy te, w mniejszym lub większym stopniu wykrywane są przez urządzenia rozpoznawczo-pomiarowe wydzielające informację o rozpoznawanym obiekcie [2,5]. Wyniki pomiarów są przetwarzane, a następnie poddawane selekcji i standaryzacji cech. Klasyfikator podejmuje decyzję o klasie, do której należy ZE, przy czym proces podejmowania decyzji może być dowolnie złożony. Koniecznym staje się użycie bazy danych oraz narzędzi sztucznej inteligencji AI (ang. *Artificial Intelligence*) wspomagających proces tej klasyfikacji [3,6].

Struktura podstawowych danych pomiarowych

Procedura pomiarowa urządzenia rozpoznania radioelektronicznego ELINT (ang. *Electronic Intelligence*) realizuje pozyskanie struktury danych pomiarowych, które schematycznie zostały przedstawione na rysunku 1. Tablica Danych Impulsowych zawiera informacje otrzymane przy wykorzystaniu karty procesora sygnałowego (KPS) bądź

innego wyspecjalizowanego urządzenia rejestrującego sygnał radiolokacyjny.



Rys.1. Struktura procesu pozyskiwania danych pomiarowych w postaci wektorów PDW

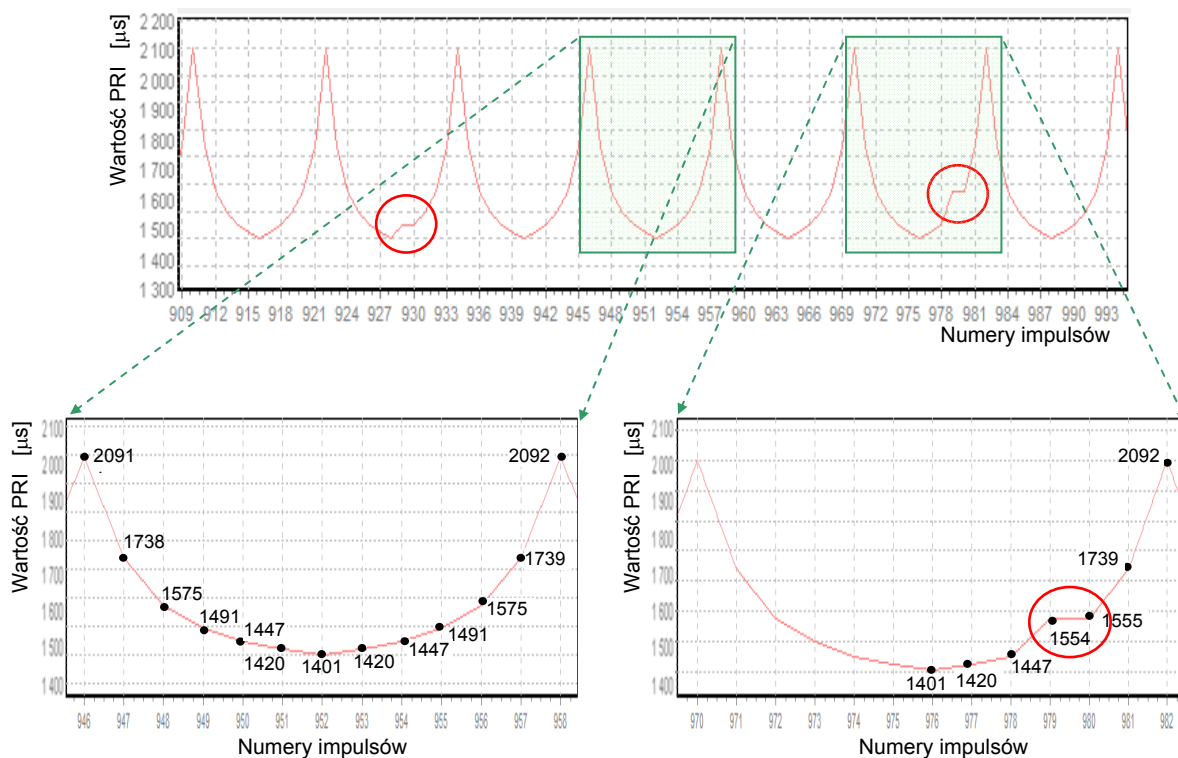
W procesie wstępnej obróbki powstaje wektor danych pomiarowych PDW (ang. *Pulse Description Word*). Wektor ten, stanowi sformalizowaną strukturą danych typu rekordowego, gdzie poszczególne pola zawierają parametry częstotliwościowe i czasowe sygnału radiolokacyjnego zgodnie ze wzorem (1), gdzie $Nr(k)$ - oznacza numer k -tego impulsu, $t_p(k)$ - oznacza czas przyścia k -tego impulsu w $[\mu s]$, $A(k)$ - oznacza amplitudę k -tego impulsu, $PW(k)$ - (ang. *Pulse Width*) oznacza czas trwania k -tego impulsu w $[\mu s]$, $PRI(k)$ - (ang. *Pulse Repetition Interval*) oznacza okres powtarzania k -tego impulsu w $[\mu s]$; $RF(k)$ - (ang. *Radio Frequency*) oznacza częstotliwość nośną k -tego impulsu w $[MHz]$, n - oznacza liczbę impulsów w rejestracji zakwalifikowanych do analizy natomiast k - oznacza numer impulsu w rejestracji. Dokładny opis PDW znajduje się w [7].

$$(1) \quad PDW = \begin{bmatrix} Nr(1) & t_p(1) & A(1) & PW(1) & PRI(1) & RF(1) \\ Nr(2) & t_p(2) & A(2) & PW(2) & PRI(2) & RF(2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Nr(k) & t_p(k) & A(k) & PW(k) & PRI(k) & RF(k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Nr(n) & t_p(n) & A(2) & PW(n) & PRI(n) & RF(n) \end{bmatrix}$$

Niejednokrotnie proces rozpoznania źródeł emisji radarowych, który bazuje na wykorzystaniu cech i właściwości podstawowych parametrów mierzalnych sygnału radarowego (PDW) umożliwia identyfikację typów. Identyfikacja co do egzemplarza jest, tym bardziej, zadaniem trudnym w realizacji. Dobrym przykładem są wyniki przedstawione na rysunku 2, na którym zobrazowano przebieg PRI w funkcji kolejnych numerów impulsów. Rysunek ten obrazuje pełen cykl zmian wartości

PRI analizowanego sygnału radiolokacyjnego. Łatwo zauważyć, iż w zarejestrowanej paczce impulsów znajdują się zakłócenia w regularności PRI, które zaznaczono czerwonym okręgiem. Zważywszy na ich nieregularność występowania w paczce, mogą one wskazywać szczególne cechy nadajnika tego ZE, a sam proces ich detekcji może stanowić o jednoznacznej identyfikacji tego źródła. Równie dobrze, powstałe „zniekształcenia PRI” mogą być spowodowane specyficznymi właściwościami toru

odbiorczego urządzenia ELINT oraz właściwościami kanału propagacyjnego, w jakim dokonywano rejestracji. Powyższe powoduje, iż nie ma silnych przesłanek, aby ww. zniekształcenia traktować jako cechę dystyngtywną tego radaru, a co za tym idzie – alokować go jako oddzielny rekord w bazie danych, określający egzemplarz danego typu radaru.



Rys.2. Zobrazowanie pełnego cyklu zmian wartości PRI analizowanego wektora PDW – przykład zaburzeń PRI

Identyfikacja sygnałów wykorzystująca techniki klasyczne (metody klasycznej identyfikacji) bazujące na analizie statystycznej podstawowych parametrów mierzalnych sygnału takich jak: RF, PW czy PRI jest dla problemów SEI niewystarczająca [7,8,9]. Dlatego, coraz częściej dokonuje się adaptacji innych metod, np. wykorzystania promieniowania pozapasmowego, lub ekstrakcji dodatkowych cech dystyngtywnych, które zwiększają jednoznaczność otrzymywanych wyników w procesie identyfikacji ZE [3, 4,6,7,10].

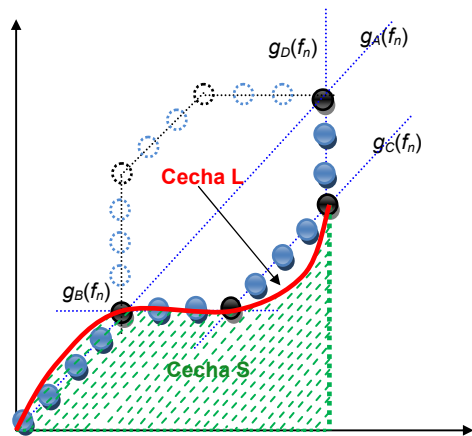
Ekstrakcja cech fraktalnych ZE oraz uzyskany atraktor przekształcenia

Słowo fraktal, wprowadzone i spopularyzowane przez Benoita Mandelbrota w książce *The Fractal Geometry of Nature* [11] obejmuje szereg obiektów geometrycznych takich jak zbiór Cantora [12], krzywa Helge'a von Kocha [13], dywan Sierpińskiego [14] oraz wiele innych. Teoria fraktali jest adoptowana przez badaczy szczególnie w obszarach przetwarzania obrazów SAR (ang. *Synthetic Aperture Radar*) [15,16], akustycznym przetwarzaniu sygnałów oraz przetwarzaniu i analizie sygnałów radarowych. Najprostszą metodą tworzenia fraktali jest wykorzystanie zbioru przekształceń afinicznych będących przekształceniami zwązającymi. Zbiór przekształceń afinicznych stanowi w tym przypadku system przekształceń iterowanych IFS (ang. *Iterated Function System*).

Jednym ze sposobów zwiększenia stopnia szczególności rozpoznania jest specyficzna metoda identyfikacji ZE, która polega na ekstrakcji cech dystyngtywnych w procesie przetwarzania sygnału pochodzących od tych ZE. Powstałe w wyniku przekształceń nowe zbiory danych będą charakteryzować się cechami fraktalnymi, dzięki którym możliwa jest jednoznaczna identyfikacja tych źródeł. W procedurze badawczej dokonano rejestracji sygnałów radarowych, gdzie kolejne wartości częstotliwości odpowiadają poszczególnym punktom pomiarowym. Uzyskany w ten sposób zbiór punktów został przyporządkowany w formie wektorów pomiarowych prawo i lewostronnych o początku w wybranym punkcie odniesienia. W celu wyznaczenia pożądaných cech selekcji zastosowano transformację, której precyzyjny opis znajduje się w [3]. Transformując zbiory punktów pomiarowych w zakresie ich symetrii otrzymano atraktor przekształcenia w postaci uogólnionej funkcji pomiarowej $K(f_n)$, [3,4]. W metodzie badawczej zastosowany został wielomian interpolacyjny Lagrange'a stopnia k , zadany $k+1$ punktami charakterystycznymi, gdzie $a_k, a_{k-1}, a_{k-2}, \dots, a_0$ stanowią parametry charakterystyczne uogólnionej funkcji pomiarowej zgodnie z równaniem (2).

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

Zapis funkcji pomiarowej $K(f_n)$ w postaci wyrażenia (2) umożliwił ekstrakcję cech dystynktywnych poprzez wyznaczenie pola powierzchni pod tą funkcją oraz długości łuku powstałej funkcji, (rys.3).



Rys.3. Atraktor przekształcenia funkcji pomiarowej

Cecha S , stanowi wartość pola powierzchni domkniętego obszaru płaskiego rozciągającego się od wykresu uogólnionej funkcji pomiarowej $K(f_n)$ w przedziale $\langle f_n^{\min}, f_n^{\max} \rangle$, zgodnie z zależnością (3). Długość łuku ww. funkcji $K(f_n)$ jako druga dystynktywna cecha ZE, została wyrażona poprzez wartość L w przedziale $\langle f_n^{\min}, f_n^{\max} \rangle$ zgodnie z równaniem (4).

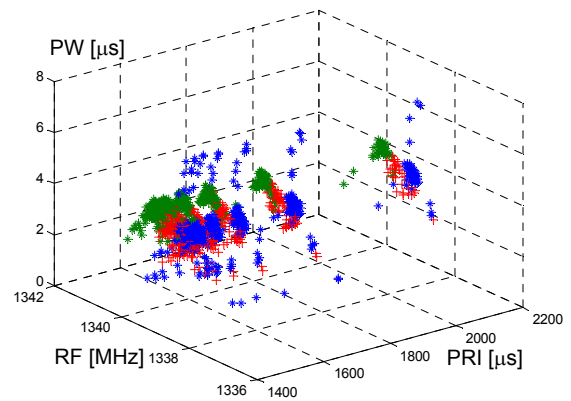
$$(3) \quad S = \int_{f_n^{\min}}^{f_n^{\max}} K(f_n) df_n = \int_{f_n^{\min}}^{f_n^{\max}} (a_k f_n^k + a_{k-1} f_n^{k-1} + a_{k-2} f_n^{k-2} + \dots + a_0) df_n$$

$$(4) \quad L = \int_{f_n^{\min}}^{f_n^{\max}} \left[1 + \left(\frac{\partial K(f_n)}{\partial f_n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} df_n = \int_{f_n^{\min}}^{f_n^{\max}} \left[1 + (k a_k f_n^{k-1} + (k-1) a_{k-1} f_n^{k-2} + \dots + a_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} df_n$$

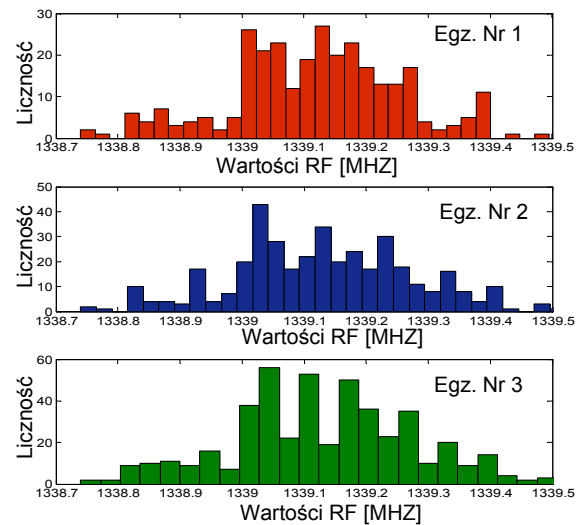
Uzyskany obraz transformacji punktów pomiarowych stanowi atraktor przekształcenia, a dalsza analiza umożliwia wyznaczenie dwóch dodatkowych cech dystynktywnych w postaci pola powierzchni pod funkcją pomiarową oraz długości jej łuku. Wyznaczone w ten sposób dwie dodatkowe cechy modyfikują wektor PDW podstawowych parametrów mierzalnych sygnału radarowego, a dalszy proces identyfikacji w oparciu o rozszerzony wektor cech, umożliwia rozpoznanie źródła emisji radarowej co do egzemplarza.

Wyniki uzyskanych obliczeń

Podczas przeprowadzonego eksperymentu dokonano łącznie analizy kilkuset emisji radarowych pochodzących od ww. kilku egzemplarzy radarów tego samego typu. Na podstawie dokonanych rejestracji do dalszego procesu identyfikacji zakwalifikowane zostały te egzemplarze, których podstawowe parametry mierzalne były najbardziej do siebie podobne, co obrazują rysunki 4÷5.



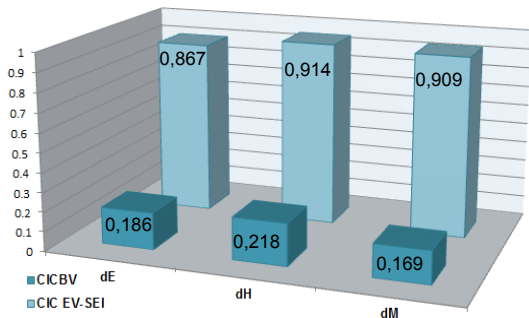
Rys.4. Zobrazowania 3D parametrów RF, PRI oraz PW dla trzech egzemplarzy radarów tego samego typu



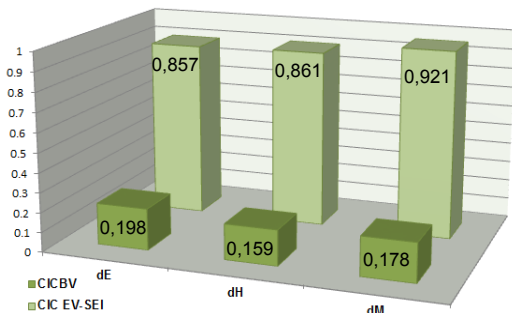
Rys.5. Histogram RF dla trzech egzemplarzy radarów tego samego typu

Na podstawie zarejestrowanych wektorów pomiarowych przy wykorzystaniu metody odkładania (ang. *holdout*) utworzone zostały wzorce klas radarów oraz wektory testowe. Funkcjonałem oceny zgodności próby testowej z określoną klasą była odległość Mahalanobisa, Euklidesa oraz Hamminga [17,18]. Jako kryterium klasyfikacji zostało zastosowane kryterium „najbliższego sąsiada”. W celu oceny jakości procesu identyfikacji wyznaczono wskaźnik poprawnej identyfikacji CIC (ang. *Correct Identification Coefficient*), będący ilorazem liczby poprawnych klasyfikacji do liczby wszystkich prób identyfikacyjnych. Proces tworzenia wektorów pomiarowych, obliczanie odległości międzyklasowych, wyznaczanie współczynnika oraz zastosowane kryteria klasyfikacji nie stanowią głównego meritum niniejszego artykułu, w związku z czym, ich dokładny opis znajduje się w pracach [3,10,19]. Obliczona wartość współczynnika poprawnej identyfikacji dla wektora cech podstawowych CIC BV wynosi odpowiednio: 0,169 dla miary Mahalanobisa, 0,218 dla miary Hamminga oraz 0,186 dla odległości Euklidesa dla egzemplarza radaru nr 1. Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że proces identyfikacji egzemplarzy tego samego typu radaru na podstawie podstawowych parametrów mierzalnych jest niemożliwy. Aby zwiększyć prawdopodobieństwo poprawnej identyfikacji, rozszerzono wektor podstawowych parametrów mierzalnych sygnału radarowego BV (ang. *Basic Vector*) o dwie dodatkowe cechy, tj.: o wartość pola

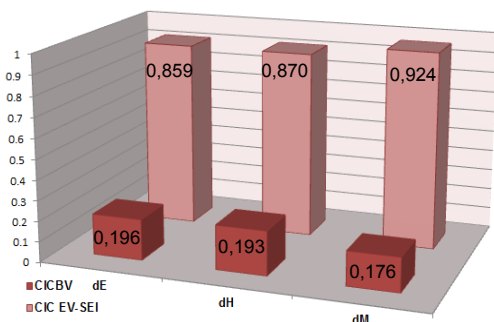
powierzchni pod funkcją pomiarową S oraz o długość jej łuku L . Powstały w ten sposób rozszerzony wektor cech EV (ang. *Extended Vector*) poddano procesowi przetwarzania, jak powyżej. W wyniku analizy uzyskano wartości współczynnika poprawnej identyfikacji CIC EV-SEI odpowiednio: 0,909 dla odległości Mahalanobisa, 0,914 dla odległości Hamminga oraz 0,867 dla odległości Euklidesa, co przedstawiono na rysunku 6. Odpowiednio rysunki 7+8 przedstawiają wartości współczynników CIC dla dwóch pozostałych, badanych egzemplarzy radarów (nr 2 i nr 3) tego samego typu.



Rys.6. Wykresy wartości współczynnika CIC dla egzemplarza radaru nr 1



Rys.7. Wykresy wartości współczynnika CIC dla egzemplarza radaru nr 2



Rys.8. Wykresy wartości współczynnika CIC dla egzemplarza radaru nr 3

Wnioski

Zaprezentowana metoda SEI umożliwiła ekstrakcję dwóch dodatkowych cech dystyngtywnych (S oraz L), które

modyfikują wektor podstawowych parametrów mierzalnych sygnału radarowego, tworząc rozszerzony wektor cech EV. Cechy te, stanowią informację dystyngtywną będącą dobrą miarą separacji w celu jednoznacznej identyfikacji egzemplarza radaru tego samego typu. Jednocześnie w wyniku zastosowanych przekształceń transformujących zbiory punktów pomiarowych otrzymano atraktor przekształcenia uogólnionej funkcji pomiarowej. Uzyskany atraktor posłuży dalszym badaniom w celu optymalizacji procedury specyficznej identyfikacji egzemplarzy radarów tego samego typu.

LITERATURA

- [1] Paradowski L., Szutkowski F., Problemy rozpoznania i przeciwdziałania radioelektronicznego, *Skrypt WAT*, Warszawa (1986)
- [2] Tadeusiewicz R., Flasiński M., Rozpoznawanie obrazów, *PWN*, Warszawa (1991)
- [3] Dudczyk J., Applying the Radiated Emission to the Radio-electronic Devices Identification - *Dissertation Thesis*, Dept. Elect., Military Univ. of Tech., Warsaw (2004)
- [4] Dudczyk J., Kawalec A., Fractal Features of Specific Emitter Identification, *Acta Physica Pol. A.*, 124 (2013) n.3, 406-409
- [5] Willey R.G., *Electronic Intelligence: The Analysis of Radar Signals*, Artech House, London (1993)
- [6] Dudczyk J., Applying the Entity-Relationship Modelling in Specific Emitter Identification in ELINT System DataBase, *Jokull Journal*, 64 (2014), n.1, 342-348
- [7] Dudczyk J., Kawalec A., Specific Emitter Identification based on graphical representation of the distribution of radar signal parameters, *Jokull Journal*, 63 (2013), n.11, 408-416
- [8] Liu M.W., Doherty J.F., Specific Emitter Identification using Nonlinear Device Estimation, *Proc. Sarnoff Symposium IEEE*, New Jersey, (2008), 1-5
- [9] Talbot K.I., Duley P.R., Hyatt M.H., Specific Emitter Identification and Verification, *Technology Review J.*, Spring/Summer, (2003), 113-133
- [10] Kawalec A., Owczarek R., Dudczyk J., Data Modeling and Simulation Applied to Radar Signal Recognition, *Molecular and Quantum Acoustics*, 26 (2005), 165-173
- [11] Mandelbrot B.B., *The Fractal Geometry of Nature*, W.H. Freeman and Comp., New York (1982)
- [12] Cantor G., Uber unen dliche, lineare Punktmannigfaltigkeiten, *V Math. Ann.*, 21 (1883), 545-591
- [13] Koch H., Sur une courbe continue sans tangente, obtenue par une construction geometrique elementaire, *Arc. Mat.* 1, (1904), 681-404
- [14] Sierpiński W., Sur une courbe cantorienne don't tout point est un point de ramification, *C.R. Acad. Paris* 160, (1915), 302
- [15] Berizzi F., Bertini G., Martorella M., Two-dimensional variation algorithm for fractal analysis of sea SAR images, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 44 (2006), n.9, 2361-2373
- [16] Germain M., BE'nie' G.B., Boucher J.M., Contribution of the fractal dimension to multiscale adaptive filtering of SAR imagery, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 41 (2003), n.8, 1765-1772
- [17] Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G., *Pattern Classification*. Second Edition. *John Wiley & Sons*, New York (2000)
- [18] Fukunaga K., *Introduction to Statistical Pattern Recognition*. Second Edition. *Academic Press*, New York (1990)
- [19] Dudczyk J., Kawalec A., Identification of emitter sources in the aspect of their fractal features, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, 61, (2013), n.3, 623-628

Autorzy: dr inż. Janusz Dudczyk, WB Electronics S.A., ul. Poznańska 129/133, 05-850 Ożarów Mazowiecki, E-mail: j.dudczyk@wb.com.pl; prof. dr hab. inż. Adam Kawalec, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Radioelektroniki, Wydział Elektroniki, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: Adam.Kawalec@wat.edu.pl.