

Tomasz PRACZYK<sup>1</sup>

## **EKSTRAKCJA PUNKTÓW CHARAKTERYSTYCZNYCH Z OBRAZU RADAROWEGO**

*Artykuł przedstawia koncepcję automatycznego systemu nawigacji radarowej, skupiając się na elemencie systemu odpowiedzialnym za ekstrakcję punktów charakterystycznych występujących na obrazie radarowym. Zaprezentowano algorytm ekstrakcji punktów a także przedstawiono rezultaty eksperymentów mających na celu weryfikację jego skuteczności.*

## **EXTRACTING CHARACTERISTIC POINTS FROM RADAR IMAGE**

*The paper presents the concept of automatic radar navigational system particularly focusing on the element of the system responsible for extraction of characteristic points from radar image. Moreover, the detailed algorithm for point extraction and results of the research whose goal was to test effectiveness of the algorithm were included in the paper.*

### **1. WSTĘP**

W ostatnich latach pozycjonowanie w nawigacji zostało zdominowane przez systemy satelitarne, w tym szczególnie GPS. Systemy te są wykorzystywane zarówno na morzu (nawigacja morska), w powietrzu (nawigacja lotnicza), jak i na ziemi (nawigacja lądowa). Opieranie się wyłącznie na systemach satelitarnych niesie jednak zagrożenie nagłej utraty informacji nawigacyjnej w wypadku awarii takiego systemu, jego wyłączenia, ewentualnie zakłócenia lub zakodowania sygnału docierającego do użytkownika. Wynika stąd konieczność dysponowania jeszcze innym, autonomicznym (niezależnym od zewnętrznych źródeł informacji) systemem umożliwiającym określenie pozycji w sposób automatyczny. Potrzeba ta dotyczy szczególnie okrętów Marynarki Wojennej, które powinny być w stanie spełniać powierzone im zadania nawet w sytuacji braku dostępu do informacji nawigacyjnej w normalnych warunkach pozyskiwanej z systemu GPS lub innych systemów radionawigacyjnych o charakterze globalnym.

W artykule zaprezentowano koncepcje Automatycznego Systemu Nawigacji Radarowej (ASNR) który może stanowić alternatywę dla systemu GPS w przypadku kiedy wykorzystanie tego ostatniego jest z jakiś względów niemożliwe. Oprócz koncepcji całego systemu przedstawiono również szczegółowy algorytm działania jednego z podsystemów

---

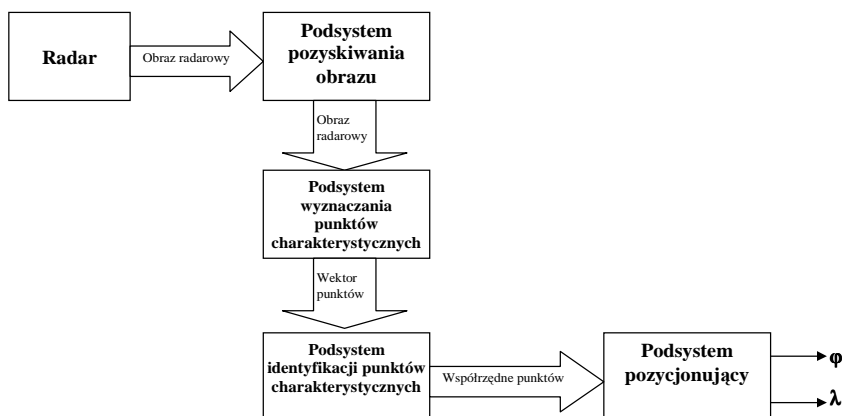
<sup>1</sup>Instytut Uzbrojenia Okrętowego, Akademia Marynarki Wojennej, t.praczyk@amw.gdynia.pl

ASNR: podsystemu ekstrakcji punktów charakterystycznych. Skuteczność algorytmu została sprawdzona eksperymentalnie a wyniki testów przedstawiono w końcowym fragmencie artykułu.

## 2. KONCEPCJA AUTOMATYCZNEGO SYSTEMU NAWIGACJI RADAROWEJ

Schemat ASNR przedstawiony został na Rys.1. System składa się z radaru, podsystemu pozyskiwania obrazu, podsystemu wyznaczania punktów charakterystycznych, podsystemu identyfikacji punktów charakterystycznych oraz podsystemu pozycjonującego.

Zadaniem podsystemu pozyskiwania obrazu jest odczytanie obrazu radarowego z radaru oraz przekazanie go dalej w postaci cyfrowej. Dodatkową funkcją tego podsystemu jest usunięcie z obrazu niewielkich ech pochodzących od poruszających się jednostek. W tym celu podsystem ten powinien śledzić na bieżąco nadchodzące z radaru obrazy tak aby był w stanie odróżnić obiekty stałe od obiektów w ruchu.



Rys.1. Schemat ASNR

Jedną z możliwych technik, którą można zastosować w celu usunięcia z obrazu niepotrzebnych ech poruszających się jednostek jest sumowanie wielu obrazów radarowych z tej samej pozycji (zarejestrowanych w niewielkich odstępach czasu, nasza jednostka musi wtedy pozostawać w miejscu lub poruszać się bardzo powoli) [1][3][4]. Dodanie obrazów do siebie spowoduje, że obraz wynikowy zawierał będzie całą trasę każdej jednostki zmieniającej położenie. Jasność pikseli odpowiadających poruszającej się jednostce będzie jednak mniejsza niż jasność pikseli reprezentujących stałe elementy akwenu obecne na obrazie – pławy, łód, jednostki stojące w miejscu. Słabe echa możemy następnie usunąć poprzez zastosowanie prostego filtra „progowego” [1][3], który „zgaasi” wszystkie piksele o jasności mniejszej od zadanego progu. Niestety odnosi się to zarówno do pikseli odpowiadających echom, których chcemy się pozbyć jak również pikseli pochodzących od stałych elementów akwenu dających słabo echo radarowe. Eliminujemy w ten sposób być może fragmenty obrazu istotne z punktu widzenia dalszego przetwarzania.

Pierwszym zadaniem podsystemu ekstrakcji punktów charakterystycznych jest przygotowanie pewnej liczby egzemplarzy zarejestrowanego obrazu radarowego eksponujących inne elementy obrazu. Powinny to być np. obrazy zawierające tylko najjaskrawsze punkty oryginalnego obrazu, obrazy zawierające wyłącznie linię brzegową lub obrazy pozbawione tej linii a zawierające tylko echa małych nie poruszających się obiektów takich jak np. pławy. Celem takiej operacji jest z jednej strony uproszczenie obliczeń w kolejnej fazie przetwarzania tj. w fazie identyfikacji punktów charakterystycznych, a także zwiększenie wiarygodności działania systemu. Zakłada się, że każdy z wygenerowanych obrazów będzie zawierał mniejszą liczbę punktów charakterystycznych niż oryginalny obraz uzyskany z podsystemu pozyskiwania obrazu. Mniejsza liczba punktów przyjętych w obliczeniach w oczywisty sposób ułatwi zadanie podsystemowi identyfikacji punktów charakterystycznych. Ponadto identyfikacja punktów dla obrazów zawierających inne elementy może przebiegać oddzielnie i być realizowana przez oddzielne systemy identyfikacji. To z kolei da możliwość obliczeń równoległych ograniczających czas obliczeń w fazie identyfikacji.

Istotna jest również poprawa wiarygodności pozycji wyznaczonej przez system w przypadku pozycjonowania w oparciu o różne obrazy radarowe. Wyznaczenie bliskich sobie pozycji dla większego zestawu obrazów oznaczałoby poprawną identyfikację punktów i dużą pewność uniknięcia błędów grubego pozycji. Duże różnice w pozycji oznaczałyby natomiast małą wiarygodność otrzymanych wyników.

Kolejnym krokiem w procesie wyznaczenia pozycji jest ekstrakcja punktów charakterystycznych znajdujących się na każdym z przygotowanych obrazów. Czynność ta wykonywana również przez podsystem ekstrakcji punktów charakterystycznych jest opisana dokładnie w dalszej części artykułu.

Wyznaczone punkty stanowią daną wejściową do podsystemu identyfikacji punktów charakterystycznych. Zadaniem tego podsystemu jest identyfikacja punktów charakterystycznych, czyli przyporządkowanie każdemu z nich dokładnej pozycji.

Ostatnim etapem obliczeń jest użycie tradycyjnych metod nawigacyjnych w celu określenia przybliżonej pozycji jednostki. Funkcja ta spełniana jest przez podsystem pozycjonujący.

### 3. GŁÓWNY NAGŁÓWEK

Wyznaczenie punktów charakterystycznych występujących na obrazie radarowym wymaga wykonania szeregu czynności. Pierwszą z nich jest przedstawienie rozważanego obrazu radarowego w postaci tzw. inwariantu „konturowego” – w odwróconym układzie biegunowym współrzędnych [1][2]. Dokładne przedstawienie algorytmu ekstrakcji punktów charakterystycznych z obrazu radarowego wymaga starannego zdefiniowania tegoż inwariantu. Aby tego dokonać należy najpierw zdefiniować sam obraz. Przyjmijmy, że obrazem analogowym monochromatycznym będziemy nazywać następującą funkcję  $L^a(x,y)[1]$ :

$$L^a : O^a \rightarrow R$$

gdzie  $O^a$  jest zbiorem punktów  $P^a(x,y)$  takim że:

$$O^a = \{(x, y) \in R^2 : x \in \langle 0, N \rangle, y \in \langle 0, M \rangle\}$$

$N, M \in \mathbb{N}$  określają wielkość obrazu.

Obraz cyfrowy możemy zdefiniować jako funkcję  $L^c(n, m)$ :

$$L^c : O^c \rightarrow \mathbb{N}$$

gdzie  $O^c \subset O^a$  jest zbiorem punktów  $P_i^c(n, m)$  takim że  $i = 0, 1, \dots, N \cdot M - 1$  oraz

$$O^c = \{(n, m) \in \mathbb{N}^2 : n \in \langle 0, N \rangle, m \in \langle 0, M \rangle\}$$

Założmy dodatkowo, że liczby określające wielkość obrazu  $N$  i  $M$  przyjmują wartości nieparzyste a więc dla każdego obrazu możemy określić punkt centralny  $P^o(n_o, m_o)$  taki, że:

$$n_o = \frac{N-1}{2}, m_o = \frac{M-1}{2}$$

Zarówno obraz analogowy jak i obraz cyfrowy możemy przedstawić w biegunowym układzie współrzędnych, dla którego każdy punkt obrazu  $P(x, y)$  jest określony przez namiar  $NR$  (kąt pomiędzy kierunkiem północnym zgodnym z osią  $OY$  kartezjańskiego układu współrzędnych a półosią poprowadzoną ze środka obrazu tj. z punktu  $P^o$ , do rozważanego punktu  $P(x, y)$ ) oraz odległość  $d = |P^o P|$ .

Istnieje możliwość przechodzenia z reprezentacji biegunowej obrazu do kartezjańskiego układu współrzędnych. Pomijając zbędne szczegóły możemy w tym miejscu przyjąć następujące funkcje przejścia z układu kartezjańskiego do układu biegunowego i w drugą stronę.

$$NR = f_{NR}(x, y), d = f_d(x, y)$$

$$x = f_x^a(NR, d), y = f_y^a(NR, d) \quad , x, y \in O^a \text{ - dla obrazu analogowego}$$

Aby określić funkcję przejścia pomiędzy układem biegunowym a układem kartezjańskim dla obrazu cyfrowego potrzebne jest zdefiniowanie funkcji przyporządkowującej każdemu punktowi obrazu analogowego odpowiadający mu punktowi obrazu cyfrowego.

$$f_{Pc} : O^a \rightarrow O^c$$

$$f_{Pc}(P^a) = \arg \min_{P^c \in O^c} |P^c P^a|$$

Ostatecznie otrzymujemy funkcję przejścia pomiędzy układem biegunowym a układem kartezjańskim dla obrazu cyfrowego:

$$(n, m) = f_{P^c}(f_x^a(NR, d), f_y^a(NR, d))$$

Kontynuując definiowanie inwariantu „konturowego” należy określić dla każdego z obrazów zbiór punktów tychże obrazów leżących na namiarze  $NR$ , czyli  $D^a(NR) \subset O^a$  oraz  $D^c(NR) \subset O^c$ .

$$D^a(NR) = \{(x, y) \in O^a : f_{NR}(x, y) = NR\}$$

$$D^c(NR) = \{(n, m) \in O^c : (n, m) = f_{P^c}(P^a), P^a \in D^a(NR)\}$$

Następnie zdefiniujemy zbiór  $D_W^c(NR) \subseteq D^c(NR)$  widocznych punktów obrazu cyfrowego leżących na namiarze  $NR$ .

$$D_W^c(NR) = \{P^c \in D^c(NR) : L^c(P^c) > 0\}$$

Ostatecznie inwariant „konturowy”  $d = g_{inv}(NR)$  może zostać zdefiniowany w następujący sposób:

$$g_{inv}(NR) = \begin{cases} A & \text{if } D_W^c(NR) = \emptyset \\ \min_{P^c \in D_W^c(NR)} |P^o P^c| & \text{w innym przypadku} \end{cases} \quad (1)$$

Dla uproszczenia możemy go również zapisać w następujący sposób:

$$g_{inv}^b(k) = \begin{cases} A & \text{if } D_W^c(NR_k) = \emptyset \\ \min_{P^c \in D_W^c(NR_k)} |P^o P^c| & \text{w innym przypadku} \end{cases} \quad k = 0, 1, \dots, 2(N + M) - 4 \quad (2)$$

gdzie  $NR_k = f_{NR}(P_{b,k}^c)$  jest namiarem na  $k$ -ty punkt brzegowy obrazu  $P_{b,k}^c \in D_b^c = \{(n, m) : n = N \vee m = M\}$  a  $k$  oznacza indeks punktu brzegowego w uporządkowanym ciągu punktów brzegowych. Uporządkowanie punktów brzegowych definiuje funkcja porządkująca, która określa pierwszy punkt ciągu punktów brzegowych oraz każdemu punktowi brzegowemu obrazu  $P_{b,k}^c$  przyporządkowuje następnik tego punktu -  $P_{b,k+1}^c$ . Funkcja ta może wyglądać np. w następujący sposób:

$$P_{b,k+1}^c = f_b(P_{b,k}^c) = \begin{cases} (n_k, m_k + 1) & \text{dla } k = 0, 1, \dots, M - 1 \\ (n_k + 1, m_k) & \text{dla } k = M, \dots, M + N - 2 \\ (n_k, m_k - 1) & \text{dla } k = M + N - 1, \dots, 2M + N - 3 \\ (n_k - 1, m_k) & \text{dla } k = 2M + N - 2, \dots, 2(M + N) - 4 \end{cases} \quad n_0 = 0, m_0 = 0$$

Dla funkcji (2) określającej inwariant „konturowy” dla obrazu cyfrowego możemy z kolei zdefiniować funkcję  $g_{inw}^I(x)$  określoną nie na indeksach uporządkowanych punktów brzegowych ale na zbiorze  $I \subset R, I = \{x : x \in <0, 2(N+M)-4>, x \in R\}$ , taką że  $g_{inw}^I(x) = g_{inw}^b(k)$  dla  $x = k$ . Funkcja ta definiuje inwariant „konturowy” dla obrazu analogowego.

Proponowana metoda ekstrakcji punktów charakterystycznych z obrazu radarowego polega na analizie drugiej pochodnej funkcji  $\hat{g}_{inw}^I(x, \sigma)$  zdefiniowanej poniżej:

$$\hat{g}_{inw}^I(x, \sigma) = \frac{\sum_{k=0}^{2(N+M)-1} g_{inw}^b(k) \varphi_k(x, \sigma)}{\sum_{k=0}^{2(N+M)-1} \varphi_k(x, \sigma)} \quad (3)$$

$$\varphi_k(x, \sigma) = e^{-\frac{(x-k)^2}{2\sigma^2}}$$

Druga pochodna funkcji (3) przy wprowadzeniu dodatkowych oznaczeń ułatwiających jej zapis wygląda następująco:

$$r(x, \sigma) = \sum_{k=0}^{2(N+M)-1} g_{inw}^b(k) \varphi_k(x, \sigma)$$

$$e(x, \sigma) = \sum_{k=0}^{2(N+M)-1} \varphi_k(x, \sigma)$$

$$p(x, \sigma) = \frac{dr(x, \sigma)}{dx} = \sum_{k=0}^{2(N+M)-1} \left[ g_{inw}^b(k) \varphi_k(x, \sigma) \left( \frac{k-x}{\sigma^2} \right) \right]$$

$$h(x, \sigma) = \frac{de(x, \sigma)}{dx} = \sum_{k=0}^{2(N+M)-1} \left[ \varphi_k(x, \sigma) \left( \frac{k-x}{\sigma^2} \right) \right]$$

$$m(x, \sigma) = \frac{d^2 r(x, \sigma)}{dx^2} = \sum_{k=0}^{2(N+M)-1} \left[ g_{inw}^b(k) \varphi_k(x, \sigma) \left( \left( \frac{k-x}{\sigma^2} \right)^2 - \frac{1}{\sigma^2} \right) \right]$$

$$n(x, \sigma) = \frac{d^2 e(x, \sigma)}{dx^2} = \sum_{k=0}^{2(N+M)-1} \left[ \varphi_k(x, \sigma) \left( \left( \frac{k-x}{\sigma^2} \right)^2 - \frac{1}{\sigma^2} \right) \right]$$

$$z(x, \sigma) = \frac{d^2 \hat{g}_{inw}^I}{dx^2} = \frac{(me - rn)e^2 - 2(pe - rh)eh}{e^4}$$

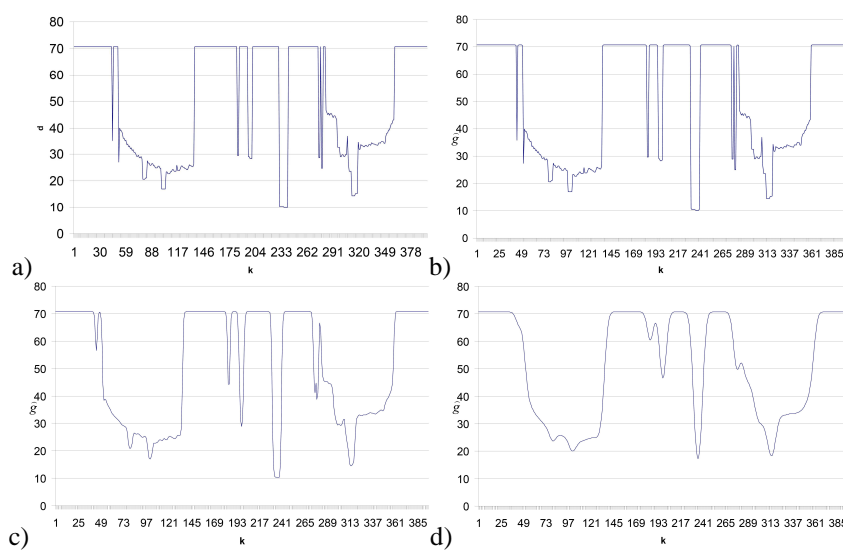
Działanie algorytmu polega na wyznaczeniu  $z(x, \sigma) = \frac{d^2 \hat{g}_{inw}^I}{dx^2}$  dla ustalonego  $\sigma$  w punktach  $k = 0, 1, \dots, 2(N+M) - 4$  a następnie odszukanie takich  $k$ , dla których:

$$z(k) > \lambda \wedge z(k) > z(k-1) \wedge z(k) \geq z(k+1) \wedge g_{inv}^b(k) \neq A \quad (4)$$

gdzie  $\lambda$  jest parametrem algorytmu pozwalającym na segregowanie całego zbioru potencjalnych punktów charakterystycznych na grupę punktów „wyrazistych” (dobrze widocznych) czyli takich dla których  $z(k) > \lambda$  oraz słabo wyróżnialnych dla których  $z(k) \leq \lambda$ . Innym parametrem algorytmu jest współczynnik  $\sigma$  umożliwiający eliminację z  $\hat{g}_{inv}^l(x, \sigma)$  niewielkich pośladowań funkcji mogących generować niepotrzebnie dużą liczbę punktów charakterystycznych. Zatem parametr  $\lambda$  usuwa z listy punktów charakterystycznych punkty mało „wyraziste” natomiast współczynnik  $\sigma$  zapobiega ich generowaniu. Ostatecznie jeśli zbiór punktów brzegowych spełniających warunek (4) oznaczymy przez  $K$  to punkty:

$$(n, m) = f_{pc} \left( f_x^a \left( NR_k, g_{inv}^k(k) \right), f_y^a \left( NR_k, g_{inv}^k(k) \right) \right), \quad k \in K$$

są punktami charakterystycznymi obrazu.

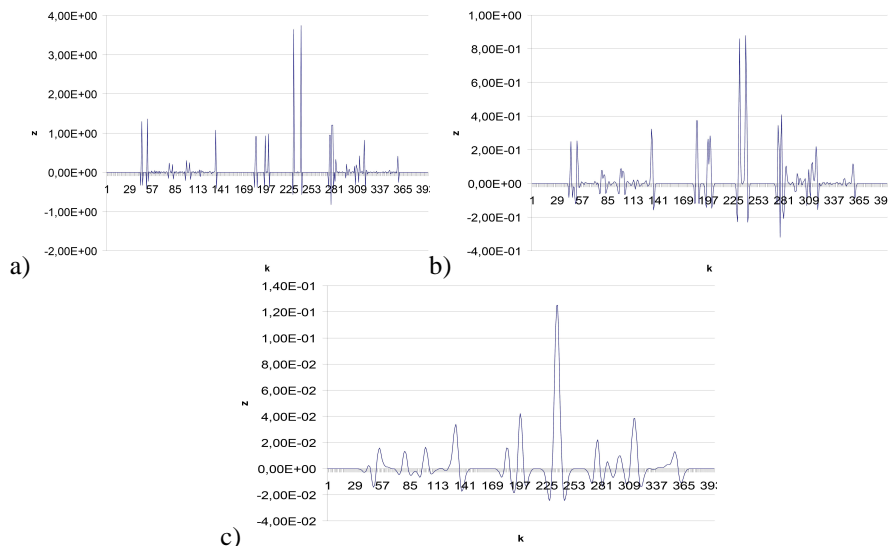


Rys.2. Inwariant konturowy obrazu radarowego oraz jego odpowiedniki wyznaczone zgodnie z (3): (a) inwariant konturowy, (b)  $\hat{g}_{inv}^l$  dla  $\sigma=0.1$ , (c)  $\hat{g}_{inv}^l$  dla  $\sigma=1$ , (d)  $\hat{g}_{inv}^l$  dla  $\sigma=10$

#### 4. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Metoda ekstrakcji punktów charakterystycznych zaprezentowana powyżej przetestowana została w oparciu o przykładowy obraz radarowy pochodzący z rejonu Zatoki Gdańskiej. Na rysunkach 2, 3 i 4 przedstawiono uzyskane wyniki.

W wyniku przeprowadzonych testów stwierdzono, że kluczowym elementem metody jest odpowiedni dobór wartości parametrów  $\sigma$  oraz  $\lambda$ . Zauważono, że przy zbyt dużych wartościach  $\sigma$  praktycznie przy  $\sigma > 1$ , metoda ma tendencję do łączenia bliskich sobie punktów charakterystycznych w jeden punkt oraz przesuwania punktów występujących na łądzie. Z tego względu uznano, że najlepszym rozwiązaniem jest zamrożenie wartości parametru  $\sigma$  na niskim poziomie oscylującym wokół wartości 0.1 a zadanie ostatecznego wyboru punktów charakterystycznych pozostawienie użytkownikowi poprzez regulację współczynnika  $\lambda$ .

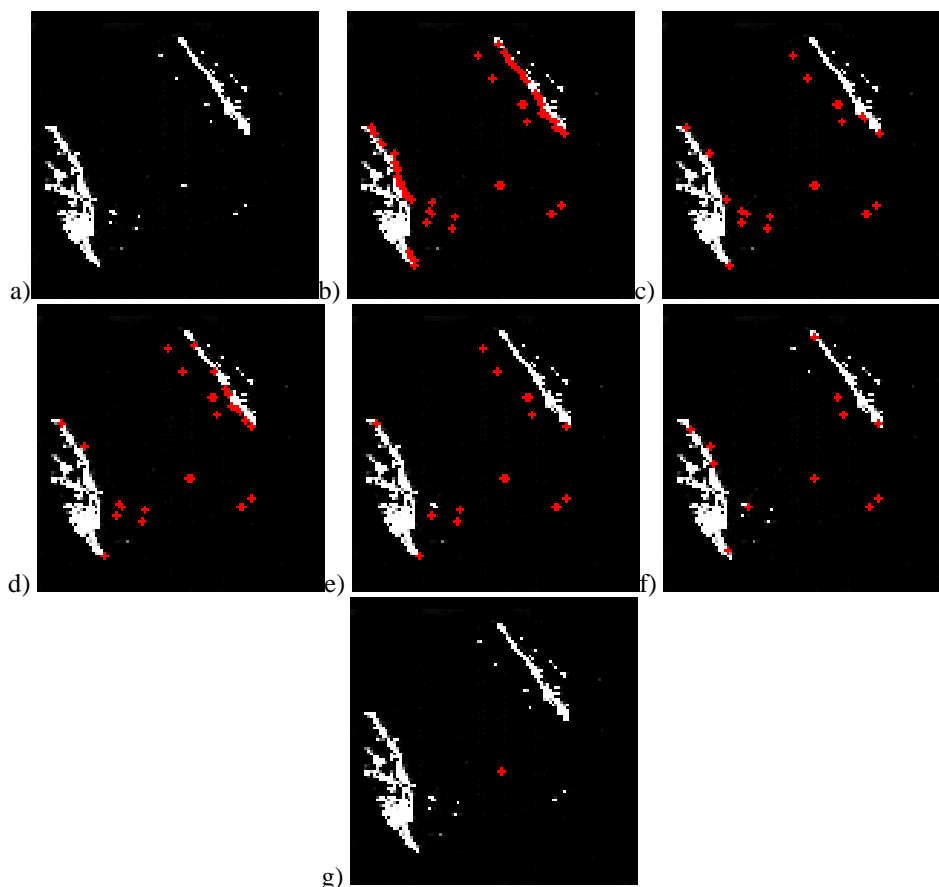


Rys.3. Drugie pochodne inwariantów konturowych: (a)  $z(k)$  dla  $\sigma=0.1$ , (b)  $z(k)$  dla  $\sigma=1$ , (c)  $z(k)$  dla  $\sigma=10$

Podsystem ekstrakcji punktów charakterystycznych funkcjonujący zgodnie z zaprezentowaną metodą może wyznaczać punkty charakterystyczne samodzielnie lub być tylko elementem wspomagającym operatora, który po wyznaczeniu punktów przez podsystem dokonywałby ostatecznej korekty położenia punktów. Dotyczy to sytuacji, kiedy niewielki obiekt może posiadać większe od punktowego echo radarowe. W takim przypadku algorytm zinterpretuje to echo jako obiekt o większych rozmiarach i przyporządkuje mu większą liczbę punktów charakterystycznych. W takich właśnie sytuacjach może być potrzebna ingerencja użytkownika systemu. Innym elementem, który mógłby spełniać kontrolującą rolę jest system identyfikacji punktów charakterystycznych, który z grupy punktów musi wybrać te najbardziej pasujące do punktów wzorcowych



umieszczonych w bazie wiedzy a następnie przekazać te punkty do podsystemu wyznaczenia pozycji.



Rys.4. Wyniki eksperymentów: (a) Oryginalny obraz radarowy, (b-g) Obrazy z punktami charakterystycznymi wyznaczonymi dla (b)  $\sigma=0.1$ ,  $\lambda=0.01$ , (c)  $\sigma=0.1$ ,  $\lambda=0.5$ , (d)  $\sigma=1$ ,  $\lambda=0.1$ , (e)  $\sigma=1$ ,  $\lambda=0.5$ , (f)  $\sigma=10$ ,  $\lambda=0.01$ , (g)  $\sigma=10$ ,  $\lambda=0.5$

## 5. PODSUMOWANIE

Artykuł przedstawia koncepcję ASNR skupiając się na elemencie systemu odpowiedzialnym za ekstrakcję punktów charakterystycznych z obrazu radarowego. W artykule zaprezentowano szczegółowy algorytm ekstrakcji punktów charakterystycznych a także wyniki badań mających na celu ocenę jego skuteczności. Badania pokazały że przy odpowiednim doborze parametrów, algorytm potrafi w sposób całkowicie bezbłędny wyróżnić z obrazu radarowego echa użyteczne dla procesu wyznaczenia pozycji okrętu.

**6. BIBLIOGRAFIA**

- [1] Kuchariew G., *Przetwarzanie i analiza obrazów cyfrowych*, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1999.
- [2] Stateczny A., *Nawigacja porównawcza*, Gdańskie Towarzystwo naukowe, Gdańsk 2001.
- [3] Stateczny A., Praczyk T., *Sztuczne sieci neuronowe w rozpoznawaniu obiektów morskich*. Gdańskie Towarzystwo Naukowe 2002.
- [4] Wai W., *A computational model for detecting image changes*, <http://citeseer.ist.psu.edu>