

Mariusz WAŻ¹
Krzysztof NAUS²

ZGRYWANIE OBRAZU RADAROWEGO Z MAPĄ MORSKĄ METODĄ WYRÓWNANIA

Obraz radarowy jest źródłem wielu informacji przydatnych do prowadzenia nawigacji. W strefie przybrzeżnej informacje pozyskane z obrazu radarowego wykorzystuje się do wyznaczania pozycji, manewrowania w rejonach rozgraniczenia ruchu, na podejściach do portów itp. Na otwartym akwenu radar jest niezbędny podczas planowania manewrów zapobiegawczych oraz do prowadzenia obserwacji w celu wczesnego wykrycia niebezpieczeństw. Artykuł przedstawia problemy związane z dopasowaniem obrazu radarowego do mapy morskiej. W końcowym etapie tego zadania wykorzystuje się geodezyjne metody wyrównania w celu precyzyjnego zgrania obu obrazów. Takie dopasowanie umożliwia wyznaczenie pozycji jednostki metodą porównawczą.

USING ESTIMATION METHODS TO MATCH RADAR IMAGE TO A SEA CHART

Radar image is a source of information useful to conduct navigation. In coastal zones, information acquired from radar is used to: fix position, maneuver when approaching a harbor, etc. At open sea, radar is necessary to plan preventive maneuvers and to observe surrounding of a ship so as to quickly detect a possible danger. The paper addresses problems associated with matching a radar image to a sea chart image. To precisely match both images, geodesic methods can be used. This, in turn, makes it possible to fix a ship position by means of comparative methods

1. WSTĘP

Każdy nawigator zauważa duże podobieństwo między zobrazowaniem radarowym wybrzeża a jego odpowiednikiem na mapie. Obraz radarowy stanowi formę najbardziej wiernego odwzorowania otaczającej okręt przestrzeni wraz ze wszystkimi obiektami powierzchniowymi w niej się znajdującymi. Jest to dwuwymiarowa reprezentacja obrazowa środowiska w której znajduje się okręt. Obiekty odbijające wiązkę radarową

¹ Akademia Marynarki Wojennej, Instytut Nawigacji i Hydrografii Morskiej; 81-103 Gdynia; ul. Śmidowicza 69; m.waz@amw.gdynia.pl

² Akademia Marynarki Wojennej, Instytut Nawigacji i Hydrografii Morskiej; 81-103 Gdynia; ul. Śmidowicza 69; k.naus@amw.gdynia.pl

reprezentowane są w postaci ech na ekranie radaru i wyświetlane są w okrętowym, biegunowym układzie współrzędnych. Okrętowy układ współrzędnych rozumiany jest tu jako układ lokalny przemieszczający się wraz z poruszającą jednostką na morzu. Dokładność takiego odwzorowania zależy od technicznych parametrów radaru, warunków meteorologicznych panujących w rejonie. Należy zwrócić także uwagę na fakt występowania wielu zniekształceń charakterystycznych dla specyfiki prowadzenia obserwacji radarowej. Obserwacja prowadzona jest przez antenę radarową obracającą się ze stałą prędkością kątową. Niemniej jednak jednostka pokonuje w tym czasie pewną drogę. Następuje pewne zniekształcenie spowodowane przesunięciem zobrazowania. Inne zniekształcenie związane jest z wysokością anteny nad poziomem morza. Wiąże się z tym fakt, że wszystkie obiekty (te wyższe i niższe) widziane są z pewnej wysokości. Inne zniekształcenia wynikają z faktu przeszukiwania przestrzeni wiązką radarową, która niestety nie jest zbyt wąska. Wszystko to wpływa na rozdzielczość kątową i odległościową zobrazowania radarowego. Z prowadzonych przez autorów badań wynika, że dla pewnych zakresów obserwacji, powyższe zniekształcenia nieznacznie wpłyną na proces dopasowania obrazu radarowego do mapy morskiej. Są one pomijalnie małe, a wynikające różnice można niwelować stosując metodę wyrównania obserwacji nawigacyjnych.

2. PORÓWNANIE OBRAZU RADAROWEGO Z MAPĄ MORSKĄ

Porównując obraz radarowy z mapą morską doszukujemy się podobieństwa geometrycznego. Porównując ze sobą reprezentacje rastrowe podobieństwo to jest zauważalne. Obrazy różnią się między sobą kolorystyką i formatem. Obraz radarowy stanowi 8-mio bitową (skala szarości) lub 24 bitową (RGB) bitmapę z zarysem linii brzegowej, lądu i obiektów jednostkowych. Obraz mapy opracowany jest w technice wektorowej, z wyraźną linią brzegową, kolorystyką wyróżniającą takie elementy jak: ląd, oznakowanie nawigacyjne, akweny wodne, sektory światła nawigacyjnych, tory wodne, granice rejonów specjalnych itp. Wszystkie te elementy stanowią kolejne warstwy mapy elektronicznej, które nakładają się jedna na drugą. Oznakowanie nawigacyjne widoczne na obrazie radarowym jako echa radarowe punktów charakterystycznych wyróżnione są na mapie symbolami graficznymi charakterystycznymi dla danej grupy znaków. W tym przypadku nie można doszukiwać się podobieństwa geometrycznego obrazów. Należy natomiast odnotować fakt istnienia w tym miejscu obiektu zarówno na obrazie radarowym jak i na mapie morskiej. Tak więc obrazy w swoich reprezentacjach rastrowych, przedstawiane jako bitmapy, mogą być porównywane we wstępnej fazie określającej podobieństwo obrazów. W [3] autor porównuje obrazy etapami. W pierwszej kolejności szuka zgrania punktów charakterystycznych, najbardziej odpowiedzialnych za dokładne dopasowanie obrazów, następnie linii brzegowej a na końcu elementów lądu. Wyszczególnionym elementom obrazu przyporządkowuje wagi, które charakteryzują stopień dopasowania obrazów. Znacznie większe znaczenie dla dokładnego dopasowania obrazów ma zgranie kilku punktów charakterystycznych niż wszystkich punktów obrazu radarowego zidentyfikowanych jako ląd.

Istnieje szereg klasycznych metod, opisywanych w literaturze jako metody analityczne, które w efekcie dopasowują obrazy radarowe do obrazów mapy [2], [6], [8], [9]. W [4] podana jest klasyfikacja dostępnych metod dopasowywania obrazów radarowych do mapy. Została ona opracowana na podstawie wieloletnich badań i doświadczeń autorów. Za

wzajemne, „najlepsze”, usytuowanie obrazów odpowiadać będzie algorytm dopasowania obrazów. W wyniku jego działania wyznaczany jest współczynnik dopasowania obrazów. Jest on miarą decydującą o poprawnym zgraniu wszystkich ich elementów. Jest to efekt bezpośredni działania algorytmu. Efektem pośrednim będzie wyznaczenie pozycji obserwowanej, w której dokonano rejestracji obrazu radarowego. W konsekwencji, pozwala to na precyzyjne nałożenie obrazu radarowego na mapę w systemie ECDIS. Dobór algorytmu jest bardzo ważny i należy to do arbitralnych decyzji nawigatora (obserwatora radarowego). Należy pamiętać, że metody te, opisane w literaturze jako metody porównawcze nawigacji, są jeszcze badane i nie stanowią one elementów gotowych systemów nawigacyjnych. Badania są jednak bardzo obiecujące.

2.1 Algorytmy dopasowania obrazów

Większość znanych algorytmów działa w oparciu o metody minimalno-odległościowe. Wywodzą się one z algorytmu identyfikacji Bayesa i są najbardziej znanymi i rozpowszechnionymi metodami klasyfikacyjnymi i identyfikacyjnymi [1], [4], [6]. Większość tych metod funkcjonuje w oparciu o zastosowanie tzw. funkcji podobieństwa. Dobór tej funkcji jest rzeczą najistotniejszą w metodach minimalno-odległościowych. Od tego zależy efekt dopasowania obrazów i prędkość całego procesu wyznaczania pozycji obserwowanej okrętu. Funkcje te możemy podzielić na funkcje odległości: Euklidesowa, Hamminga, Czebyszewa, Camberra, Minkowskiego, Pearsona, Mahalanobisa i inne, oraz na funkcje bliskości: Tanimoto, cosinus kierunkowy, których miara jest odwrotnie proporcjonalna do miary odległości.

Idea działania funkcji odległości lub bliskości jest bardzo prosta. Obliczana jest sumaryczna odległość elementów obrazu radarowego od elementów obrazu mapy. Dla obrazów rastrowych obliczana jest odległość między wartościami pikseli. Dla inwariantów konturowych obliczana jest odległość między poszczególnymi dyskretnymi wartościami funkcji obrazu radarowego i mapy. Podobnie się dzieje z innymi reprezentacjami obrazów. Algorytm oparty o pomiar odległości między obrazem radarowym i obrazem mapy jest prosty i szybki w działaniu. Możliwe jest jednak popełnienie tzw. błędu grubego. Dla dwóch różnie wyglądających obrazów radarowych wyznaczona odległość do obrazu mapy może być identyczna.

Sytuacja taka spowodowana jest tym, że większość funkcji odległości bazuje na tzw. odległości Euklidesowej opisanej zależnością:

$$D_{C,R} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (C_n - R_n)^2}, \quad (1)$$

gdzie: C_n, R_n - wartości poszczególnych elementów obrazu mapy i obrazu radarowego.

Geometrię kształtu obrazu uwzględniana jest w innych algorytmach tzw. algorytmach korelacyjnych. Współczynniki korelacji obliczany jest zgodnie z zależnością:

$$\rho_{C,R} = \frac{\sum_{n=1}^N (C_n - \mu_C)(R_n - \mu_R)}{\sqrt{(\sum_{n=1}^N (C_n - \mu_C)^2)(\sum_{n=1}^N (R_n - \mu_R)^2)}} \quad (8)$$

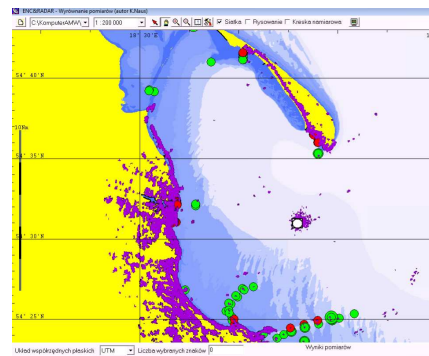
gdzie: μ_C, μ_R - średnie arytmetyczne wartości elementów obrazu mapy i obrazu radarowego

Wskazuje on na liniową zależność zmian wartości w porównywanych obrazach i dopasowuje obrazy pod względem ukształtowania linii brzegowej. Bardzo istotna cecha lecz nie uwzględnia odległości między obrazami. Obrazy o podobnych kształtach lecz oddalone od siebie dopasowują się identycznie.

Rozwiązaniem powyższego problemu jest budowanie algorytmów złożonych o rozszerzonym kryterium decyzyjnym. Np. dla obrazów najbliższych obrazowi radarowemu obliczane są współczynniki korelacji, lub odwrotnie. Zaproponowano to w [6].

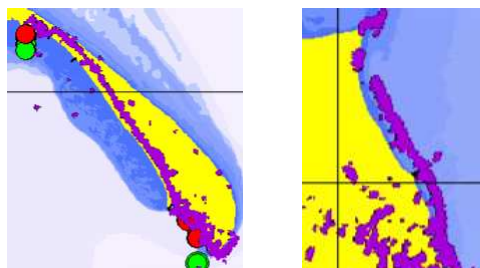
2.2 Dopasowanie rzeczywistego obrazu radarowego do mapy wektorowej

Zapisanie obrazu radarowego w postaci rastrowej możliwe jest dzięki zastosowaniu odpowiednich urządzeń zwanych Radar Scan Converter'ami. Stanowią one głównie wyspecjalizowane karty PC, które umożliwiają podłączenie wskaźnika radarowego do komputera i stworzenie radarowego stanowiska wynośnego z możliwością rejestracji pojedynczych obrazów i sekwencji wideo. Do badań wykorzystano kartę PC Radar kit firmy MARIS. Obrazy radarowe zapisywane były z rozdzielczością 1024x768 pikseli. Z obrazów pozyskiwano zobrazowanie radarowe o rozdzielczości 745x745 i zapisywano jako 24 bitowa kolorową (RGB) bitmapę. Kolor CZARNY (R=0, G=0, B=0) imitujący wodę został ustawiony jako przezroczysty. Kolor ech radarowych i lądu ustawiono na poziomie R=153, G=0, B=204 i uzyskano FIOLETOWY. Było to konieczne gdyż kolor pierwotny ech był identyczny z kolorem lądu wykreślanym na mapie elektronicznej. Korzystając z zależności opisanych wzorami (1) i (2) wyznaczano miejsce najlepszego dopasowania obrazów radarowych do mapy morskiej. W kolejnym etapie obraz nakładany był na mapę jak pokazano na rysunku poniżej.



Rys. 1. Dopasowanie obrazu radarowego do mapy morskiej

Na powyższym rysunku można zauważyć, że obrazy nie pokrywają się z dużą precyzją. Niemniej jednak pozycja ta została wyznaczona przez algorytm dopasowania jako miejsce o najmniejszej odległości i największym podobieństwie kształtów między mapą i obrazem radarowym. Pewne rozbieżności linii brzegowych zauważane są dla Półwyspu Hel i wybrzeża w pobliżu Cypla Rewskiego.



Rys. 2. Przykładowe rozbieżności w dopasowaniu linii brzegowej

Powyższe niedopasowanie może wynikać z różnic odwzorowawczych obrazów radarowych i mapy morskiej. Może też wpływać na to szereg zniekształceń wynikających ze specyfiki obserwacji radarowej. W [7] opisano wpływ tych zniekształceń na wzajemne dopasowanie obrazów. Dla zakresów obserwacji (do 12 Mm) stosowanych w żegludze przybrzeżnej błędy wynikające z zniekształceń obrazów radarowych i mapy są pomijalnie małe [7].

Z badań wynika, że polepszenie zaistniałej sytuacji można uzyskać stosując geodezyjne metody wyrównania pozycji i obserwacji nawigacyjnych.

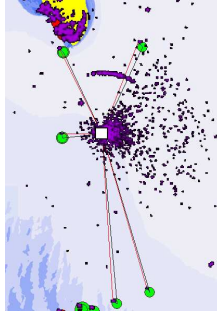
3. PRECYZYJNE DOPASOWANIE OBRAZÓW METODĄ WYRÓWNANIA

Do precyzyjnego dopasowania obrazów niezbędne jest zidentyfikowanie kilku znaków (punktów charakterystycznych) zawartych na obrazie radarowym.

Identyfikacja punktów charakterystycznych obrazu radarowego umożliwia poprawę dokładności określenia pozycji obserwowanej. Dokonujemy tego poprzez powtórne jej wyznaczenie w sposób analityczny. Zadanie tego typu należy do grupy zadań zliczenia nawigacyjnego prostego i polega na określeniu elementów trójkąta nawigacyjnego, i jest znane wszystkim nawigatorom. Do jednoznacznego ustalenia współrzędnych pozycji jednostki wystarczają dwie odległości radarowe lub odległość i namiar na jeden obiekt itp. Wykorzystując w procesie prowadzenia nawigacji więcej niż dwie obserwacje istnieje możliwość uzyskania dokładniejszych wyników. Jednak należy pamiętać o tym, że zawsze wykonane obserwacje są obciążone błędami i aby uwzględnić je należy wykorzystywać metody rachunku wyrównawczego i uzyskane wyniki estymacji należy przyjąć do dalszej nawigacji.

Do badań przyjęto obraz radarowy Zatoki Gdańskiej z zakresu 12 mil morskich. Pozycja obserwowana otrzymana w wyniku porównania obrazów wyniosła: $\varphi = 54,53465^{\circ}\text{N}$, $\lambda = 018,84403^{\circ}\text{E}$. Błąd pozycji oszacowano w granicach 3 pikseli obrazu. Dla zakresu 12 Mm i rozdzielczości obrazu 745x745, wynosi on ok. 180 m (178,98 m). Na

obrazie zidentyfikowano pięć punktów charakterystycznych. Namiary i odległości (rzeczywiste i obserwowane) do punktów charakterystycznych przyjęto do wyrównania.



Rys. 3. Przyjęcie punktów charakterystycznych do wyrównania

Formuła wyrównania została zaimplementowana w C++. Standardowy proces wyrównania z zastosowaniem metody najmniejszych kwadratów można ująć w następujących punktach [10]:

- a) Ustalenie liczby obserwacji koniecznych (r), wybór parametrów (φ, λ) i utworzenie układu równań obserwacyjnych:

$$d_k = F_k(\mathbf{X}) \quad \text{dla } k = 1, \dots, 4 \quad (3)$$

- b) Obliczenie na podstawie wyników pomiarów przybliżonych wartości parametrów, a następnie przybliżonych wartości wielkości mierzonych

- c) linearyzacja układu równań obserwacyjnych. Utworzenie macierzy współczynników oraz wyrazów wolnych:

$$\mathbf{A} = \partial_{\mathbf{x}} \mathbf{F}(\mathbf{X}^0) \in \mathfrak{R}^{n,r} \quad (4)$$

$$\mathbf{L} = \mathbf{F}(\mathbf{X}^0) - \mathbf{x} = \mathbf{x}^0 - \mathbf{x} \in \mathfrak{R}^{n,1} \quad (5)$$

Stanowiący elementy liniowego układu równań poprawek:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{d}}_x + \mathbf{L} \quad (6)$$

Okno wynikowe formuły:

```

Macierz współczynników równania poprawki do niamiaru i odległości A=
-0.00246047  0.0200514
0.0414927   0.0200016
0.0436498   -0.0197946
-0.45422    -0.0456006
-0.049965   -0.0157031
0.109006    0.994041
-0.904027   0.427476
-0.903773   -0.428013
0.99605     -0.0887912
0.956755    -0.290895

Wektor wyrazów wolnych L=
-6.26194
1.33006
2.66024
-1.20315
-0.895849
-82.6414
-416.589
-272.976
246.025
343.028

```

d) ustalenie macierzy wag poprawek:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_1 & & & \\ & p_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & p_i \end{bmatrix}, \quad \text{gdzie } p_i = \frac{c}{m_i^2} \quad (6)$$

Okno wynikowe formuły:

```

Macierz wag P=
1      0      0      0      0      0      0      0      0      0
0      1      0      0      0      0      0      0      0      0
0      0      1      0      0      0      0      0      0      0
0      0      0      1      0      0      0      0      0      0
0      0      0      0      1      0      0      0      0      0
0      0      0      0      0      0.0004 0      0      0      0
0      0      0      0      0      0      0.0004 0      0      0
0      0      0      0      0      0      0      0.0004 0      0
0      0      0      0      0      0      0      0      0.0004 0
0      0      0      0      0      0      0      0      0      0.0004
0      0      0      0      0      0      0      0      0      0.0004

```

e) rozwiązanie metodą nieoznaczoną lub oznaczoną układu równań normalnych:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \hat{\mathbf{d}}_x + \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} = 0 \quad (7)$$

f) Na podstawie wektora $\hat{\mathbf{d}}_x$ obliczenie wektora poprawek, sumy równoważnych kwadratów poprawek, wartości kontrolnej

g) wykonanie pierwszego etapu kontroli polegającego na przyrównaniu do siebie sumy równoważnych kwadratów poprawek i wartości kontrolnej. Ten etap kontroli ma na celu wykazanie błędów w ustalaniu elementów macierzy \mathbf{A} , \mathbf{L} , \mathbf{P} oraz stwierdzenia czy prawidłowo zostało rozwiązane zadanie wyrównawcze.

Okna wynikowe formuły:

```

Macierz ATPA=
0.213867    0.0213107
0.0213107    0.00409858

Macierz ATPL=
1.25299
-0.188693

Macierz ATPA-1=
9.70296    -50.4508
-50.4508    506.308

Estymator dx=
-21.6774
158.751

Wektor poprawek V=
-3.02542
3.60588
-1.4284
1.40403
-2.30563
72.8007
-329.13
-321.332
210.337
276.108

```

h) obliczenie estymatora współczynnika wariancji:

$$m_0^2 = \frac{\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}}{n - r} \quad (8)$$

Okno wynikowe formuły:

```

Estymator współczynnika wariancji m00=
4,56106138916546

```

i sformułowanie wniosków co do przyjętego sposobu wagowania

- i) Obliczenie wyrównanych wartości parametrów $\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^0 + \hat{\mathbf{d}}_x$ oraz wyrównanych wyników pomiaru $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x} + \mathbf{V}$.

Okna wynikowe formuły:

```

Wyrównane współrzędne X i Y pozycji =
6.55461e+06
6.04545e+06
Wyrównane namiary i odległości x=
266.978
336.968
21.2529
177.513
161.679
3029.4
6672.99
6948.02
12521.3
12081.7

```

- j) II etap kontroli. Powinien być spełniony układ $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\hat{\mathbf{X}})$
k) ocena dokładności na podstawie macierzy kowariancji:

$$\hat{\mathbf{C}}_{\hat{\mathbf{x}}} = m_0^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \quad (9)$$

skąd :

$$m_{\hat{x}_i} = \sqrt{[\hat{\mathbf{C}}_{\hat{\mathbf{x}}}]_{ii}} \quad (10)$$

Okno wynikowe formuły:

```

Cx=
201.853    -1049.54
-1049.54    10532.9

```

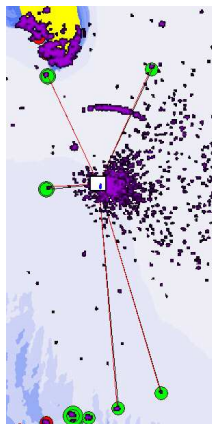
Błąd pozycji po wyrównaniu $M_{po} = 103,6084720406$ [m]

Współczynnik korelacji $p = -0,000493648246592972$

Kąt skręcenia elipsy ufności $\varphi = 5,74259343001288$ [°]

Półosie elipsy ufności $a = 252,646888404398$ i $b = 24,0383579119449$ [m]

Pozycja obserwowana jednostki została poprawiona w wyniku procesu wyrównania. Wyniosła ona: $\varphi = 54,53618^{\circ}\text{N}$, $\lambda = 018,84371^{\circ}\text{E}$. Poprawione zostały także parametry pomiarowe (namiary i odległości do punktów charakterystycznych). Błąd średni pozycji po wyrównaniu wyniósł 103,6 m (przed wyrównaniem wynosił ok. 180 m). Uzyskano wzrost dokładności wyznaczenia pozycji obserwowanej w granicach 40%.



Rys. 6. Precyzyjne zgranie obrazów po wyrównaniu pozycji.

4. WNIOSKI

Zgrywanie obrazu radarowego z obrazem elektronicznej mapy nawigacyjnej metodą wyrównania daje dobre rezultaty, szczególnie w sytuacji gdy mamy do dyspozycji dużą liczbę pomiarów odległości i namiarów do zidentyfikowanego oznakowania nawigacyjnego (tzw. pomiarów nadliczbowych). Należy jednak mieć świadomość tego, że klasyczna metoda wyrównania nie jest odporna na błędy grube i w sytuacji pomyłki w identyfikacji oznakowania błąd pozycji może być większy niż przed wyrównaniem. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie zmodyfikowanej metody najmniejszych kwadratów - zwanej wyrównaniem odpornym.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Basztura C., Rozmawiać z komputerem, Wydawnictwo Prac Naukowych FORMAT. Wrocław 1992
- [2] Czaplewski k. Wąż M. The Using of the Neural Networks and Robust Estimation Methods in Radar Nawigation. Navigation and Hydrography nr 18/2004. St. Petersburg, Rosja
- [3] Stateczny A., Problemy komputerowego wyznaczania pozycji okrętu metodami porównawczymi. ZN AMW 107A/1990, Gdynia 1990
- [4] Stateczny A., Wąż M. Pozycjonowanie bazujące na obrazach radarowych. Metody nawigacji porównawczej. Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Gdynia 2004 pp. 259-300
- [5] Tadeusiewicz R., Flasiński M., Rozpoznanie obrazów. PWN, Warszawa 1991
- [6] Wąż M. , Metoda wyznaczania pozycji okrętu za pomocą porównania obrazu radarowego z mapą morską. Rozprawa doktorska, Gdynia 2000.
- [7] Wąż M., Precise Matching of Radar Display with the Nautical Chart. International Conference ENC-GNSS 2009, 3-6 May, Naples (Italy); str 329-334
- [8] Wąż M., Cichocki A., Zastosowanie algorytmów porównawczych do określania pozycji okrętu. ZN AMW 1/1999, Gdynia 1999

- [9] Wąż M., Stateczny A., Neural algorithm of fixing the ship's position. Anual of Navigation Nr 2. pp 127-141
- [10] Wiśniewski Z., Metody opracowania wyników pomiarów w nawigacji i hydrografii. AMW Gdynia 2004

