ZESZYTY NAUKOWE AKADEMII MARYNARKI WOJENNEJ
ROK LII NR 2 (185) 2011

Krzysztof Czaplewski
Akademia Marynarki Wojennej

Sławomir Świerczyński
Centralna Składnica Marynarki Wojennej

ZAUTOMATYZOWANE STANOWISKO NAWIGACJI RADAROWEJ

STRESZCZENIE

Artykuł prezentuje rezultaty pracy naukowo-badawczej finansowanej przez MNiSW zrealizowanej w Instytucie Nawigacji i Hydrografii Morskiej AMW w Gdyni. Zakończony w marcu 2010 roku projekt jest praktyczną realizacją badań teoretycznych realizowanych w ciągu ostatnich dziesięciu lat. Efektem jest stworzenie zautomatyzowanego stanowiska do prowadzenia nawigacji z wykorzystaniem radaru. Automatyzacja oparta została na prostych metodach minimalno--odległościowych oraz współczesnych metodach M-estymacji wykorzystywanych w geodezji i kartografii. Artykuł zawiera syntetyczny obraz realizowanych prac, które są efektem badań wszystkich członków zespołu.

Słowa kluczowe:
nawigacja, nawigacja radarowa, metody M-estymacji, automatyzacja procesów nawigacyjnych.

WSTĘP

Aktualnie stosowana definicja nawigacji [9] stanowi, że jest to proces bezpiecznego prowadzenia pojazdu w odpowiednim środowisku fizyczno-geograficznym. Bazując na niej, jednym z głównych zadań nawigacji morskiej jest bezpieczne przeprowadzenie jednostki pływającej z punktu wyjścia do punktu docelowego. W dobie rozwoju wysoko dokładnych systemów satelitarnych większość rodzajów działalności ludzkiej na morzu skupia się wokół wykorzystania systemów satelitarnych. Jednakże w rejonach przybrzeżnych, szczególnie w akwenach trudnych pod względem

nawigacyjnym, nadal niezastąpiona jest nawigacja terrestryczna oparta na radarowym i optycznym oznakowaniu nawigacyjnym. Metody pozycjonowania i identyfikacji celów z wykorzystaniem systemów terrestrycznych charakteryzują się obecnie niską dokładnością i stosunkowo dużą pracochłonnością w porównaniu z metodami nawigacji satelitarnej. Współczesna technika oraz rozwój metod opracowania danych, w połączeniu z nowoczesnymi systemami informatycznymi, pozwalają jednak na istotne zwiększenie dokładności, a także niezawodności i szybkości wyznaczeń pozycji obiektów w nawigacji terrestrycznej. Szczególną rolę pełni nawigacja radarowa.

Proces prowadzenia nawigacji w oparciu o zautomatyzowane systemy antykolizyjne (ARPA i ATA) charakteryzuje się jak dotąd stosunkowo różną dokładnością klasycznych radarów nawigacyjnych z jednoczesnym usprawnieniem procesu analizy sytuacji w rejonie pływania dzięki funkcji automatycznego śledzenia obserwowanych obiektów. Pozwala to na pewne zmniejszenie obciążenia pracy oficera wachtowego.

Podstawowym, naukowym celem projektu, którego wybrane wyniki są prezentowane w niniejszym artykule, było zwiększenie dokładności i niezawodności wyznaczeń w nawigacji radarowej (głównie z zastosowaniem urządzenia ARPA i ATA). Cel naukowy został osiągnięty z zastosowaniem współczesnych metod opracowania obserwacji nawigacyjnych i geodezyjnych. Po zakończeniu wstępnych analiz przeprowadzonych na początku projektu stwierdzono, że w procesie identyfikacji i eliminacji wpływu na ostateczne wyznaczenia błędnych ech radarowych mogą być zastosowane metody estymacji odpornej, o odpowiednio dobranych funkcjach tłumienia. Zaproponowany rozwój odpornych metod estymacji, w zastosowaniu do opracowania obserwacji radarowych, wymagał ustalenia wiarygodnych warunków początkowych (np. pozycji startowej w procesie iteracyjnym). W tym zakresie wykorzystano opracowane w Instytucie Nawigacji i Hydrografii Morskiej AMW w Gdyni metody nawigacji porównawczej [13]. Taki rodzaj nawigacji pozwala już obecnie na określenie pozycji obiektu (jednostki pływającej lub innego obserwowanego echa) z dokładnością 1 piksela (w zakresie pracy radaru), która nie jest wystarczającą dokładnością z punktu widzenia prowadzenia współczesnej nawigacji morskiej. Może ona jednak pełnić rolę wspomagającą w opisanym powyżej kontekście. Szczegółowy opis M-estymacji wykorzystany w zakończonych pracach znaleźć można w [1].

Celem utylitarnym projektu było zbudowanie stanowiska automatyzacji obliczeń i prezentacji wyników nawigacji radarowej wraz z budową analizatora jakości prowadzonych badań. Opis stanowiska oraz możliwości wykorzystania są tematem niniejszego artykułu.

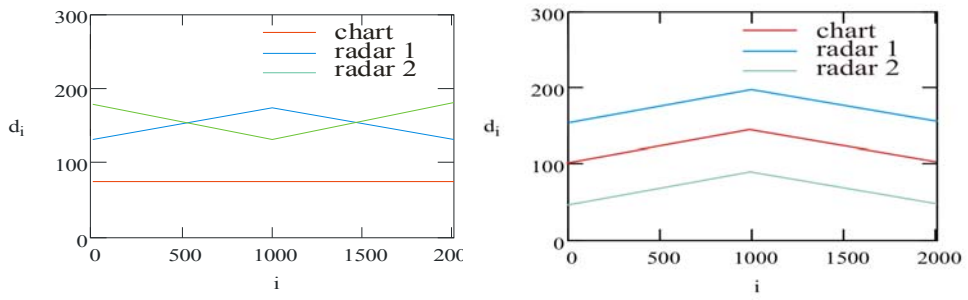
METODY NAWIGACJI PORÓWNAWCZEJ

Głównym źródłem informacji obrazowej stosowanej w metodach nawigacji porównawczej jest radar nawigacyjny. Obraz radarowy jest odwzorowaniem przestrzeni otaczającej okręt. Na dokładność takiego odwzorowania ma wpływ wiele zniekształceń charakterystycznych dla specyfiki prowadzenia obserwacji radarowej. Mają one wpływ na jakość obrazu radarowego i powodują, że obraz ten różni się od obrazu rzeczywistego, a jeszcze bardziej różni się od obrazu mapy morskiej. Informacja radarowa przekazywana jest do systemu zobrazowania map elektronicznych i informacji nawigacyjnej ECDIS. W systemach ECDIS obraz radarowy nakładany jest na mapę w pozycji wyznaczonej przez GPS lub inny system nawigacyjny. W przypadku utraty tej informacji obraz radarowy nakładany jest w miejsce pozycji zliczonej, której błąd szybko narasta w czasie.

Rozwiązaniem tego problemu mogą stać się metody minimalno-odległościowe wykorzystywane w tzw. nawigacji porównawczej. Obrazy radarowe i mapy morskie porównywane są ze sobą i wyznaczane jest miejsce najlepszego ich dopasowania. Za najlepsze usytuowanie względem siebie obrazów odpowiadać będzie algorytm dopasowania obrazów. W wyniku jego działania wyznaczany jest współczynnik dopasowania obrazów. Ma on decydujący wpływ na poprawne zgranie wszystkich elementów. Efektem pośrednim działania algorytmu będzie wyznaczenie pozycji obserwowanej.

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. Większość tych metod opiera się na tzw. funkcji podobieństwa. W metodach minimalno-odległościowych najważniejszą rzeczą jest dobór tej funkcji, ponieważ od tego zależy efekt dopasowania obrazów i pracochłonność całego procesu wyznaczania pozycji obserwowanej okrętu. Funkcje te możemy podzielić na funkcje odległości: euklidesową, Hamminga, Czebyszewa, Camberra, Minkowskiego i inne, a także funkcje bliskości: Tanimoto i cosinusa kierunkowego.

W funkcji odległości lub bliskości obliczana jest sumaryczna odległość elementów obrazu radarowego od elementów obrazu mapy. Dla obrazów rastrowych obliczana jest odległość między wartościami pikseli, natomiast dla inwariantów konturowych obliczana jest odległość między poszczególnymi dyskretnymi wartościami funkcji obrazu radarowego i mapy. Przy takich obliczeniach możliwe jest jednak popełnienie tzw. błędu grubego. Wyznaczona odległość do obrazu mapy dla dwóch obrazów radarowych różnie wyglądających może być identyczna (rys. 1a).



a) b)

Rys. 1. Odstępstwa obrazu radarowego od mapy morskiej z wykorzystaniem:
a) odległości euklidesowej, b) odległości Camberra

Źródło: Sprawozdanie końcowe z projektu badawczego nr 2108/B/T02/2007/33.

Sytuacja taka może wystąpić, ponieważ większość funkcji odległości bazuje na tzw. odległości euklidesowej, opisanej zależnością:

$$D = \sqrt{\sum_{n=1}^{N} (C_n - R_n)^2}, \tag{1}$$

gdzie:

C_n, R_n — wartości poszczególnych elementów obrazu mapy i obrazu radarowego.

Odmienną filozofią działania charakteryzują się algorytmy opierające się na funkcji odległości Camberra:

$$D^{Ca} = \sum_{n=1}^{N} \frac{|C_n - R_n|}{|C_n + R_n|}. \tag{2}$$

Dla obrazów binarnych wartości funkcji są mocno skorelowane z odległością euklidesową. Inne wartości otrzymujemy dla obrazów kolorowych (RGB — 24 bity) lub zapisanych w 256 stopniach szarości (8 bitów). Odległości miedzy pikselami bardzo jasnymi będą wielokrotnie mniejsze niż w przypadku pikseli ciemniejszych. W przypadku inwariantów konturowych odległości między liniami brzegowymi będą zależeć od zakresu obserwacji (mniejsze dla większych zakresów obserwacji — rys. 1b).

W tej sytuacji konieczne jest tzw. odwrócenie zakresu obserwacji dla inwariantów konturowych. Dla mniejszych zakresów obserwacji zniekształcenia obrazów radarowych są znacznie mniejsze, dlatego w miarę zbliżania się jednostki do linii brzegowej oczekuje się bardziej precyzyjnego zgrania obrazów radarowych z mapą.

Kolejną grupą funkcji podobieństwa są funkcje bliskości (cosinus kierunkowy, bliskość Tanimoto). Przyjmują one wartości odwrotnie proporcjonalne niż w przypadku funkcji odległości. Wskazują na bliskość obrazów radarowych do obrazu mapy. Im obrazy są bardziej podobne (bliższe), tym większa jest wartość funkcji.

Dla bliskości obliczanej za pomocą cosinusa kierunkowego, podobnie jak w przypadku funkcji odległości Camberra, konieczne jest wcześniejsze przygotowanie obrazów radarowych. W algorytmach, gdzie porównujemy obrazy jako bitmapy, należy dokonać obrócenia kolorów w obrazach radarowych do postaci „negatywów". W efekcie uzyskamy większą bliskość dla pikseli o większym poziomie jasności, czyli tych, które reprezentują obiekty o większej powierzchni skutecznego odbicia. Porównując obrazy inwariantne, nie jest konieczne dokonywanie jakichkolwiek transformacji. W przypadku bliskości Tanimoto nie dokonujemy wcześniejszych transformacji obrazów radarowych i obrazów mapy.

Inaczej funkcjonują algorytmy neuronowe. W wyniku ich działania wyznaczana jest pozycja obrazu wzorca. Możliwe jest to dzięki procesowi uczenia. Specjalnie zaprojektowana sztuczna sieć neuronowa przechodzi proces, w którym uczy się rozpoznawać obrazy ciągu uczącego. Ciąg ten musi być „reprezentatywny", tzn. powinien składać się z obrazów zarejestrowanych z różnych pozycji i w różnych warunkach hydrometeorologicznych. Do najczęściej stosowanych sieci neuronowych w dopasowaniu obrazów radarowych należą: perceptron wielowarstwowy (Multilayer Perceptron) i sieć GRNN (General Regression Neural Network) [11, 13]. Na podstawie badań własnych stwierdzono, że w odróżnieniu od metod minimalno-odległościowych algorytmy neuronowe aproksymują pozycję obrazu radarowego między obrazami pojawiającymi się w procesie uczenia. Ponadto charakteryzują się tym, że działają szybko i natychmiastowo. Proces uczenia perceptronu jest czasochłonny i nie należy do łatwych. Sieć GRNN uczy się szybko, lecz wymaga szybkich i pojemnych maszyn liczących. Wykazują się też małą odpornością na wystąpienie błędów grubych.

Dokładność opisanych metod porównawczego wyznaczania pozycji wykorzystujących algorytmy minimalno-odległościowe zależy głównie od „jakości" ciągu uczącego. Główną ich zaletą jest fakt możliwości zautomatyzowania całego procesu wyznaczania pozycji.

METODA M-ESTYMACJI WYNIKÓW OBSERWACJI

Zniekształcenia i błędy obrazów radarowych nie mogą dyskwalifikować nawigacji radarowej jako źródła informacji o pozycji własnej jednostki. Należy wyznaczyć

estymowaną (poprawioną) wartość pozycji na podstawie dodatkowych pomiarów parametrów nawigacyjnych wykonanych z pozycji obserwowanej (porównawczej). Dowiązujemy się w ten sposób do pozycji zidentyfikowanego oznakowania nawigacyjnego widocznego na ekranie radaru. Możliwość zwiększenia dokładności prowadzonych wyznaczeń mogą zapewnić nowoczesne metody rachunku wyrównawczego.

Znane z geodezji metody wskazują na ich interdyscyplinarność oraz możliwość szerokich zastosowań w nawigacji. Wykorzystując ponadto metody wyrównania odpornego, otrzymujemy możliwość uodparniania obserwacji nawigacyjnych obarczonych błędami grubymi. Polepszenie jakości ostatecznych wyznaczeń wartości parametrów nawigacyjnych i pozycji jest możliwe dzięki zastosowaniu dodatkowych procedur. Muszą one uwzględniać utrzymanie cechy automatyczności całego procesu prowadzenia nawigacji radarowej. W pierwszej kolejności należy wyekstrahować z obrazu radarowego te echa, które pochodzą od oznakowania radarowego wchodzącego w skład struktury nawigacyjnej badanego akwenu, następnie trzeba dokonać identyfikacji tych punktów (ech radarowych). Poprawna identyfikacja umożliwi przyporządkowanie i umiejscowienie punktów charakterystycznych na mapie. Kolejne ostateczne zadanie to określenie zadania wyrównawczego i jego realizacja.

Zadanie wyrównawcze sformułowano w oparciu o funkcjonalno-decyzyjny model elementu struktury nawigacyjnej (dostępnego oznakowania radarowego), model macierzy kowariancji wyników pomiaru zastępowany w rozwiązaniu odpornym modelem ekwiwalentnym (z zastosowaniem decyzyjno-ekwiwalentnej macierzy wag) oraz funkcję celu metody najmniejszych kwadratów. Zadanie wyrównawcze oraz jego rozwiązanie nawiązuje do podstawowych zasad odpornej na błędy grube pomiaru M-estymacji. Z uwagi na decyzyjny charakter modelu funkcjonalnego, stosowaną w tej estymacji ekwiwalentną macierz wag zastąpiono macierzą decyzyjno-ekwiwalentną. Decyzje co do wyboru wariantu modelu funkcjonalnego są tutaj realizowane przez macierz decyzyjną, natomiast uodpornienie na błędy grube uzyskuje się przez zastosowanie macierzy tłumienia. Iloczyn tych macierzy jest macierzą decyzyjno-tłumiącą stanowiącą podstawę zaproponowanej w [1] funkcji celu decyzyjno-odpornego zadania wyrównawczego elementu łańcucha struktury nawigacyjnej.

W związku z tym przyjęto, że w celu określenia pozycji (X_P, Y_P) jednostki na morzu wykorzystuje się namiary NR_i lub/i odległości d_i do charakterystycznych ech radarowych. W ten sposób uzyskano n obserwacji, (przy czym n>2). Współrzędne $(X_i, Y_i), i = 1,\ldots,n$, tych obiektów, które dają nam charakterystyczne echa, są znane. Taki układ geometryczny umożliwia utworzenie równań poprawek, analogicznie jak w [2, 12, 14]:

$$NR_i + v_i = F_i(\hat{X}_P, \hat{Y}_P) = arctg \left. \frac{X_i - \hat{X}_P}{Y_i - \hat{Y}_P} \right\}_{i=1,\ldots,n} \Leftrightarrow \mathbf{D} + \mathbf{V}_P = \mathbf{F}(\hat{\mathbf{X}}_P), \qquad (3)$$

gdzie:

$\mathbf{V}_P = [v_1, v_2, \ldots, v_n]^T$ — wektor poprawek do zmierzonych namiarów;

$\hat{\mathbf{X}}_P = [\hat{X}_P, \hat{Y}_P]^T$ — wyrównane współrzędne okrętu na morzu.

Zakładamy, że jest znany wektor przybliżonych współrzędnych jednostki $\mathbf{X}_P^o = [X_P^o \quad Y_P^o]^T$. Wówczas sprowadzając funkcję $\mathbf{F}(\hat{\mathbf{X}}_P)$ do postaci liniowej, przez rozwinięcie w ograniczony do pierwszych wyrazów szereg Taylora uzyskuje się [1]:

$$\mathbf{F}(\hat{\mathbf{X}}_P) = \mathbf{F}(\mathbf{X}_P^o) + \mathbf{A}_P \hat{\mathbf{d}}\mathbf{x}_P, \qquad (4)$$

gdzie

$$\mathbf{A}_P = \partial_X \mathbf{F}(\mathbf{X}_P^o) \text{ przy czym } \hat{\mathbf{X}}_P = \mathbf{X}_P^o + \hat{\mathbf{d}}\mathbf{x}_P.$$

Uwzględniając powyższe założenie, układ równań poprawek można przedstawić w postaci:

$$\mathbf{D} + \mathbf{V}_P = \mathbf{F}(\hat{\mathbf{X}}_P) \Leftrightarrow \mathbf{D} + \mathbf{V}_P = \mathbf{F}(\mathbf{X}_P^o) + \mathbf{A}_P \hat{\mathbf{d}}\mathbf{x}_P \Leftrightarrow \mathbf{V}_P = \mathbf{A}\hat{\mathbf{d}}\mathbf{x}_P + \mathbf{L}_P, \qquad (5)$$

gdzie

$$\mathbf{L}_P = \mathbf{F}(\mathbf{X}_P^o) - \mathbf{D}.$$

Załóżmy, że są znane błędy średnie $m_1, m_2, \ldots, m_i$ wzajemnie niezależnych wyników pomiaru namiarów $NR_1, NR_2, \ldots, NR_n$. Diagonalna macierz $\mathbf{Q}_D = Diag(m_1^2, m_2^2, \ldots, m_n^2)$ (macierz kofaktorów wyników pomiaru) będzie wtedy takim przybliżeniem macierzy kowariancji $\mathbf{C}_D = Diag(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \ldots, \sigma_n^2)$

$$\mathbf{C}_D = m_0^2 \mathbf{Q}_D = m_0^2 \mathbf{P}^{-1}, \qquad (6)$$

gdzie

$m_0^{\ 2}$ — nieznany współczynnik wariancji.

Niech ponadto

$$\Phi(\hat{\mathbf{d}}\mathbf{x}_P) = \mathbf{V}_P^T \mathbf{C}_D \mathbf{V}_P = \min \Leftrightarrow \Phi(\hat{\mathbf{d}}\mathbf{x}_P) = \mathbf{V}_P^T \mathbf{P} \mathbf{V}_P = \min$$

będzie kryterium estymacji metodą najmniejszych kwadratów. Proces wyznaczania nieznanego wektora pozycji własnej można wówczas utożsamiać z rozwiązaniem klasycznego zadania optymalizacyjnego w metodzie najmniejszych kwadratów [1]:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_P = \mathbf{A}_P \hat{\mathbf{d}}\mathbf{x}_P + \mathbf{L}_P \\ \mathbf{C}_D = m_0^2 \mathbf{Q}_D = m_0^2 \mathbf{P}^{-1}. \\ \mathbf{\Phi}(\hat{\mathbf{d}}\mathbf{x}_P) = \mathbf{V}_P^T \mathbf{P} \mathbf{V}_P = \min \end{cases} \tag{7}$$

Jego rozwiązaniem jest (o ile $\left|\mathbf{A}_P \mathbf{P} \mathbf{A}_P\right| \neq 0$)

$$\hat{\mathbf{d}}\mathbf{x}_P = -(\mathbf{A}_P^T \mathbf{P} \mathbf{A}_P)^{-1} \mathbf{A}_P^T \mathbf{P} \mathbf{L}_P. \tag{8}$$

Ponadto, ponieważ

$$\mathbf{V}_P = \mathbf{A}_P \hat{\mathbf{d}}\mathbf{x}_P + \mathbf{L}_P = -\mathbf{A}_P (\mathbf{A}_P^T \mathbf{P} \mathbf{A}_P)^{-1} \mathbf{A}_P^T \mathbf{P} + \mathbf{L}_P, \tag{9}$$

więc

$$\mathbf{V}_P^T = \mathbf{Q}_V \mathbf{P} \mathbf{L}_P^T, \tag{10}$$

gdzie

$$\mathbf{Q}_V = \mathbf{P}^{-1} - \mathbf{A}_P (\mathbf{A}_P^T \mathbf{P} \mathbf{A}_P)^{-1} \mathbf{A}_P^T$$

jest macierzą kofaktorów poprawek $\mathbf{V}_P$.

Macierz kofaktorów $\mathbf{Q}_V$ jest tutaj rozumiana jako takie przybliżenie macierzy kowariancji $\mathbf{C}_V$ wektora $\mathbf{V}_P$, że:

$$\mathbf{C}_V = m_0^2 \mathbf{Q}_V. \tag{11}$$

Współczynnik wariancji jest określany wyrażeniem:

$$m_0^2 = \frac{\mathbf{V}_P^T \mathbf{P} \mathbf{V}_P}{n-2}. \tag{12}$$

Jednakże w prowadzonych rozważaniach przyjmuje się, że $m_0^2 = 1$, wówczas

$$\mathbf{C}_V = \mathbf{Q}_V. \tag{13}$$

Załóżmy teraz, że któraś z odległości lub namiarów, na przykład wskutek błędnej identyfikacji echa radarowego, jest obarczona błędem grubym. Takiej obserwacji będziemy przyporządkowywać tak zwaną ekwiwalentną wagę $\widehat{p}_i$, która będzie wynikiem tłumienia oryginalnej (wynikającej z zakładanego błędu średniego pomiaru) wagi *p*. Proces tłumienia będzie przebiegał według zależności:

$$\widehat{p}_n = t(\overline{v}_n)\, p_n, \tag{14}$$

gdzie

$t(v_n)$ — funkcja tłumienia o następujących podstawowych własnościach:

dla $v_i \in \Delta v_i, v_j \in \Delta v_j$: $\quad t(v_i) = t(v_j);$

dla $(v_i \notin \Delta v_i) \vee (v_j \notin \Delta v_j),\ |v_i| < |v_j|$: $\quad t(v_i) > t(v_j).$

Przedziały $\Delta v_i = \langle -k\sigma_{v_i}; k\sigma_{v_i} \rangle$ są przedziałami dopuszczalnymi dla poprawek v_i, $i = 1,\ldots,n$, ustalanymi przy zakładanym poziomie ufności γ. Przyjmując, że v_i są zmiennymi losowymi o rozkładach normalnych, można zapisać:

$$\gamma = P(-k\sigma_{v_i} < v_i < k\sigma_{v_i}) = P(-k < \overline{v}_i < k) = \int_{-k}^{+k} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\overline{v}_i^2}{2}\right] d\overline{v}_i, \tag{15}$$

gdzie:

$\sigma_{v_i} = \sqrt{[\mathbf{C}_V]_{ii}}$ — odchylenie standardowe *i*-tej poprawki;

$\overline{v}_i = \dfrac{v_i}{\sigma_{v_i}}$ — poprawki standaryzowane o wspólnym przedziale dopuszczalnym $\Delta\overline{v}_i =< -k; k >$.

Na przykład dla $\gamma = 0.95$ współczynnik $k = 2$.

Dla potrzeb prezentowanych badań przyjęto do analiz duńską funkcję tłumienia o postaci:

$$t(\overline{v}) = \begin{cases} 1 & \text{dla } \overline{v} \in \langle -k, k \rangle \\ \exp\{-l(|\overline{v}| - k)^g\} & \text{dla } |\overline{v}| \in > k \end{cases} \tag{16}$$

Wobec tego ekwiwalentne wartości wag będą ustalane według wzoru:

$$\widehat{p}_n = t(\overline{v}_n)p_n = \begin{cases} p_n & \text{dla } \overline{v}_n \in \langle -k, k \rangle \\ \exp\{-l(|\overline{v}_n| - k)^g\}p_n & \text{dla } |\overline{v}_n| \in > k \end{cases} \quad (17)$$

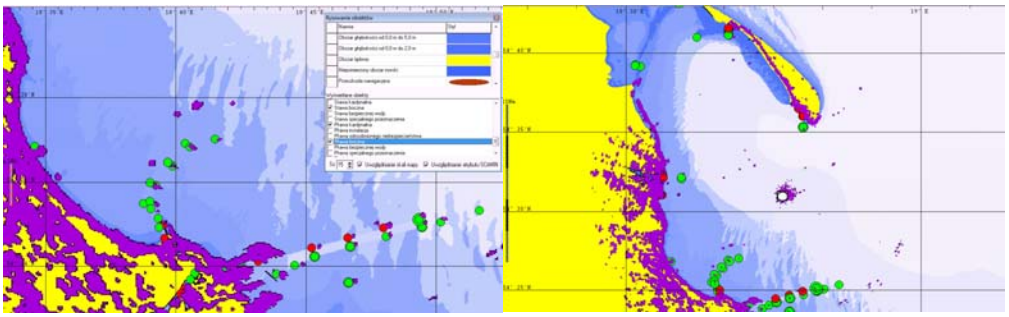
Na ogół przyjmuje, że $l = 0{,}01 \div 0{,}1$, $g = 2$. Jednakże wartości parametrów l i g powinny być dobierane w sposób doświadczalny. Źle dobrane parametry powodują niepotrzebne zwiększenie liczby kroków procesu iteracyjnego rozwiązującego odporne zadanie wyrównawcze.

PREZENTACJA WYNIKÓW BADAŃ NA ELEKTRONICZNEJ MAPIE NAWIGACYJNEJ

Stanowisko automatyzacji nawigacji radarowej wymaga opracowania dedykowanej przeglądarki elektronicznej mapy nawigacyjnej dającej możliwości automatycznego wyszukiwania w komórkach ENC danych o oznakowaniu nawigacyjnym, które znajdzie się we wskazanym przez radar obszarze. W ramach projektu badawczego, którego rezultaty opisywane są w niniejszym artykule, wykorzystano metodę tworzenia przeglądarek elektronicznych map nawigacyjnych opisanych w [6]. Do poprawnej identyfikacji obiektów śledzonych przez radar niezbędna jest informacja „mapowa" o obserwowanych echach. Wskazany obszar definiowany jest pozycją obserwowaną (φ, λ) oraz aktualnym zakresem pracy radaru.

Do badań przyjmowano obrazy radarowe wybierane losowo z bazy danych. Obrazy miały zniekształcenia i zakłócenia typowe dla obserwacji radarowej. Dopasowywane były do obrazów mapy (ciągu uczącego) w dwóch reprezentacjach cyfrowych: bitmapy oraz inwariantu konturowego. Bitmapa obrazu radarowego to pierwotna postać otrzymana w wyniku rejestracji. Ciąg uczący inwariantów mapy morskiej został przygotowany wcześniej, przed przystąpieniem do badań w czasie rzeczywistym. Zabiegi te znacznie skróciły czas potrzebny na wyznaczenie pozycji obserwowanej metodą porównawczą i pozwoliły na zachowanie cechy automatyczności wykonywanych zadań.

Proces dopasowania obrazów radarowych bez uwzględniania poziomów wagowych i punktów charakterystycznych jest szybki i możliwy do realizacji w czasie rzeczywistym. Nie trzeba wykonywać dodatkowych przekształceń na obrazach, które opóźniają cały proces. Przy takim porównaniu istnieje pewne ryzyko otrzymania większych błędów pozycji obserwowanej. Na rysunku 2a przedstawiono sytuację, gdzie punkty charakterystyczne nie wpływały na jakość dopasowania obrazów.



a) b)

Rys. 2. Dopasowanie obrazu radarowego: a) bez uwzględnienia punktów charakterystycznych, b) na podstawie punktów charakterystycznych

Źródło: Sprawozdanie końcowe z projektu badawczego nr 2108/B/T02/2007/33.

Echo radarowe linii brzegowej pokrywa się z linią brzegową mapy. Na obrazie widoczne są echa pochodzące od oznakowania nawigacyjnego portów w Gdyni i Gdańsku, ale nie pokrywają się one z oznakowaniem mapy. Wszystkie elementy obrazu (piksele) miały jednakową wagę w algorytmie dopasowania. Wpływ każdego piksela echa radarowego na wartość współczynnika dopasowania jest jednakowy (bez znaczenia, czy jest to echo od linii brzegowej, czy oznakowania nawigacyjnego). Ciężko jest wpasować echo radarowe pochodzące od oznakowania radarowego w pozycje tego oznakowania na mapie. Trudność ta wynika z faktu, że w przeprowadzonych testach pozycja oznakowania radarowego na mapie zajmuje jeden piksel, a echo radarowe identyfikowane jest jako zbiór kilkudziesięciu lub kilkuset pikseli.

Można to zmienić, gdy zastosujemy metodę dopasowania obrazów poprzez wcześniejszą ekstrakcję punktów charakterystycznych obrazu radarowego. Konieczne jest określenie niewielkiego obszaru wokół pozycji oznakowania nawigacyjnego na mapie (np. promieniem łukowania oznakowania pływającego). Jeżeli echo radarowe punktu charakterystycznego pokryje się z wyznaczonym obszarem, algorytm wygeneruje odpowiednio duży współczynnik dopasowania.

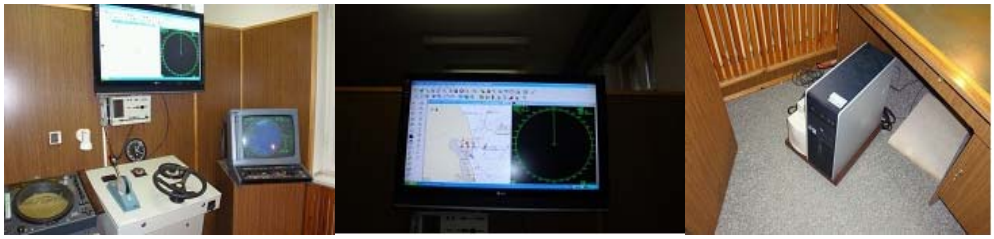
Wyznaczając pozycje tylko w oparciu o punkty charakterystyczne, otrzymujemy odmienną sytuację. Echo od linii brzegowej nie pokrywa się z linią brzegową obrazu mapy, natomiast punkty charakterystyczne obrazu dopasowane są prawidłowo z oznakowaniem na mapie (rys. 2b).

Obraz radarowy punktów charakterystycznych jest bardziej stabilny od obrazu linii brzegowej, mniej zależny od czynników zewnętrznych i dający silniejsze echo. W algorytmach dopasowania echa pochodzące od takich nieruchomych obiektów mają największą wagę.

Przedstawione dwa sposoby wyznaczenia pozycji metodą dopasowania obrazów mają zarówno wady, jak i zalety. Pierwszy polega na prostym i szybkim poszukiwaniu zgodności bitmapy obrazu radarowego i mapy morskiej. Zapewnia on wyznaczenie pozycji w czasie rzeczywistym, ale często generuje błędy grube. Wykorzystując drugi sposób, zakłada się, że najważniejsze jest dopasowanie punktów charakterystycznych obu obrazów. Wymaga on wykonania dodatkowego procesu ekstrakcji i identyfikacji punktów charakterystycznych, co powoduje spowolnienie procesu wyznaczenia pozycji. Dokładność tej metody zależy głównie od poprawnie przeprowadzonej identyfikacji znaków.

STANOWISKO BADAWCZE

Końcowym efektem projektu jest stanowisko automatycznego wyznaczania pozycji jednostki i analizatora badań. Zostało ono zbudowane w laboratorium manewrowania antykolizyjnego w Instytucie Nawigacji i Hydrografii Morskiej AMW w Gdyni (rys. 3.). Do zadań stanowiska należy: rejestracja obserwacji, automatyczne wyznaczanie pozycji jednostki na morzu oraz zobrazowanie sytuacji na elektronicznej mapie nawigacyjnej. W skład stanowiska wchodzi kilka elementów: radar nawigacyjny, stanowisko indywidualne symulatora ARPA, interfejs radar-PC Blackbox firmy Nobeltec z zestawem komputerowym lub komputer ze specjalizowaną kartą Maris PC Radar kit. Wizualizacja odbywa się na 42-calowym monitorze. Obrazy radarowe pozyskiwane są w czasie rzeczywistym poprzez transmisję z wykorzystaniem interfejsu BB firmy Nobeltec oraz w trybie offline w wyniku rejestracji przeprowadzonej w morzu (mobilny zestaw do rejestracji obrazów radarowych).



Rys. 3. Realizacja stanowiska badawczego
w laboratorium manewrowania antykolizyjnego INiHM AMW

Źródło: Sprawozdanie końcowe z projektu badawczego nr 2108/B/T02/2007/33.

Do przeprowadzenia badań morskich niezbędne jest posiadanie „mobilnego” zestawu rejestrującego obrazy radarowe. Mobilność zestawu otrzymano poprzez zamontowanie specjalizowanej karty PC Radar Kit w komputerze przenośnym. Zestaw wykorzystywany był do prowadzenia badań morskich (rys. 4a).

a) b)

Rys. 4. Mobilny zestawu do rejestracji i przetwarzania obrazów radarowych:
a) na jednostce pływającej, b) z wykorzystaniem sieci WIFI

Źródło: Sprawozdanie końcowe z projektu badawczego nr 2108/B/T02/2007/33.

Mobilny zestaw umożliwia także wykorzystanie sieci WiFi do transmisji zobrazowania radarowego. Jest to cecha szczególnie użyteczna w przypadku prób morskich na jednostce pływającej. W tej konfiguracji komputer z kartą Maris pełni rolę serwera i kontaktuje się z klientem poprzez router (rys. 4b).

Na stanowisku niezbędne jest zintegrowanie obserwacji radarowej z elektroniczną mapą nawigacyjną. Dane z mapy i radaru przesyłane są do głównej aplikacji automatyzacji nawigacji radarowej. Zasadniczymi funkcjami realizowanymi przez opracowaną aplikację są:

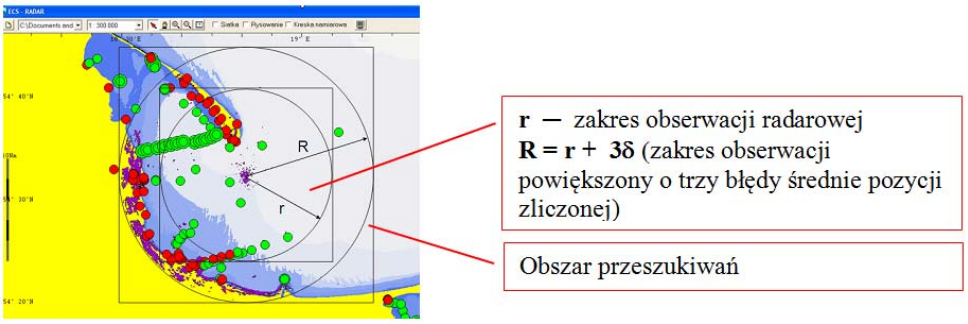
— wczytanie map;
— wczytanie obrazów radarowych w pozycję zliczoną;
— wyznaczenie pozycji obserwowanej na podstawie porównania obrazów;
— oszacowanie parametrów obszaru wyszukiwania radarowego oznakowania nawigacyjnego;
— wyszukanie dostępnego oznakowania w przeszukiwanym sektorze;
— wyznaczenie pozycji estymowanej.

Aplikacja bazuje na zobrazowaniu ENC. Na jej podstawie, przez nawigatora, wyszukiwane są punkty identyfikowane jako punkty charakterystyczne wyekstrahowane

z obrazów radarowych. Bardzo ważny jest odpowiedni dobór zakresu obserwacji radarowej. Powinien on zapewnić widoczność linii brzegowej i znaków nawigacyjnych, a w miarą zbliżania się do brzegu, powinien być redukowany do optymalnego, który zapewni dostępność niezbędnej liczby punktów charakterystycznych występujących w akwenie przybrzeżnym.

Obraz radarowy przed wczytaniem do aplikacji przechodzi szereg transformacji. Pierwszym krokiem jest zarejestrowanie go za pomocą karty Maris PC Radar Kit i wczytanie do pamięci. Kolejny etap to dobór kolorów reprezentujących wystąpienie echa radarowego. Kolor powinien posiadać cechy przezroczystości, aby mógł wyróżniać echo radarowe na tle lądu i oznakowania zobrazowanego na mapie.

Przygotowana aplikacja umożliwia wyliczenie i prezentowanie na ekranie współrzędnych pozycji zliczonej, obserwowanej i estymowanej. Pozycja zliczona obliczana jest w sposób ciągły. Rejestracji obrazów radarowych towarzyszy proces zliczenia matematycznego drogi jednostki i określanie jej pozycji wraz z narastającym błędem pozycji, zależnym głównie od czasu zliczenia i błędu ostatniej pozycji obserwowanej. Obraz radarowy przesuwa się po obrazie mapy nawigacyjnej w celu wzorowego dopasowania.

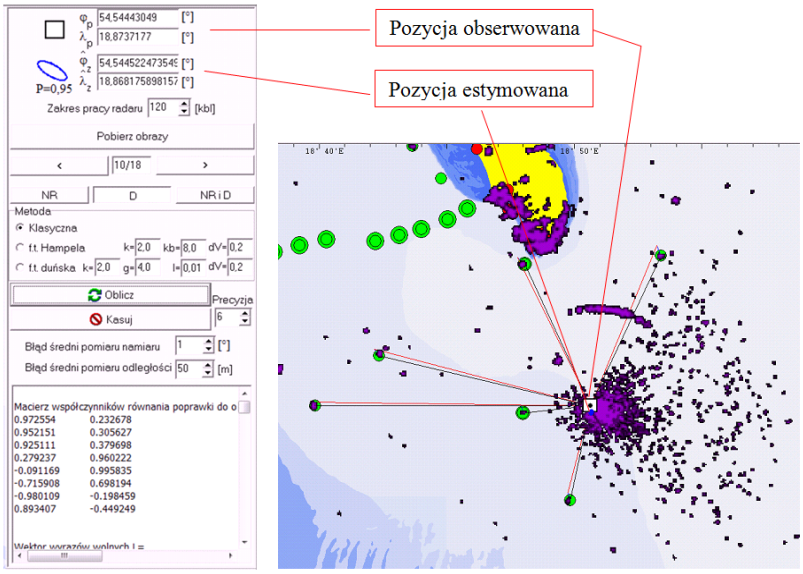


Rys. 5. Wyznaczenie obszaru poszukiwań miejsca precyzyjnego zgrania obrazu radarowego i mapy morskiej

Źródło: Sprawozdanie końcowe z projektu badawczego nr 2108/B/T02/2007/33.

W tej sytuacji cały obraz radarowy zawiera się w oszacowanym wyżej obszarze (P = 99,7%). Kolejne zadanie to wyznaczenie pozycji obserwowanej. Realizowane jest to w bloku nawigacji porównawczej. Stanowi on oddzielną aplikację programową. Obraz radarowy i obraz mapy przetwarzane są do reprezentacji inwariantu konturowego. Podczas tworzenia inwariantu pomijane są echa radarowe pochodzące od pojedynczych odosobnionych obiektów. Aplikacja wykorzystuje funkcję

odległości Euklidesa do określenia współczynnika wzajemnego dopasowania obrazów. Obrazy porównywane są i dopasowywane także w swojej pierwotnej postaci, czyli w reprezentacji rastrowej. Zastosowany jest prosty algorytm dopasowania zwany „metodą wzorców", gdzie porównywane są ze sobą wagi odpowiadających sobie pikseli obrazów. Wybór metody i reprezentacji obrazów zależy od decyzji operatora.



Rys. 6. Pozycja najlepszego dopasowania obrazu radarowego i mapy morskiej

Źródło: Sprawozdanie końcowe z projektu badawczego nr 2108/B/T02/2007/33.

Końcowy etap działania aplikacji to poprawa pozycji obserwowanej, otrzymanej w wyniku dopasowania obrazów, metodą wyrównania. 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). Aplikacja umożliwia dokonanie wyrównania klasycznego wyników pomiarów i pozycji obserwowanej. 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. Wybierając w aplikacji metodę wyrównania odpornego, operator musi dokonać wyboru funkcji tłumienia pomiędzy funkcją Hampela lub duńską oraz ustawić główne ich parametry.

TEST SPRAWDZAJĄCY

Poniżej przedstawiony został jeden z wykonanych testów sprawdzających na przykładzie klasycznego wyrównania wyników pomiarów i pozycji obserwowanej. Pozycję wyznaczono na podstawie obserwacji punktów charakterystycznych. Dane wejściowe podane są w tabeli 1. Obraz radarowy został dopasowany do mapy w pozycji $\varphi = 54° 32' N$, $\lambda = 18° 50' E$.

Tabela 1. Dane wejściowe do zadania

UTM	Xmapa	Ymapa	Dmapa	NRmapa	UTM	Xradar	Yradar	Dradar	NRradar
34	357897.00	6051206.23	6585.53	334.69	34	357560.80	6051562.96	7047.51	333.31
34	363669.25	6051400.42	6996.37	25.34	34	363466.92	6051859.70	7324.57	22.28
34	357636.07	6044919.26	2873.96	263.74	34	357553.15	6045277.72	2950.53	270.73
34	359519.03	6041150.00	4111.09	192.22	34	359330.83	6041485.37	3840.01	196.18
34	367754.91	6034687.92	12706.40	143.26	34	368191.93	6035337.63	12443.11	139.90

UTM – numer strefy w UTM
Xmapa – współrzędna X znaku na mapie
Ymapa – współrzędna Y znaku na mapie
Dmapa – obliczona odległość do znaku na mapie
NRmapa – obliczony namiar rzeczywisty do znaku na mapie
Xradar – obserwowana współrzędna X znaku na obrazie radarowym
Yradar – obserwowana współrzędna Y znaku na obrazie radarowym
Dradar – zmierzona odległość do znaku na obrazie radarowym
NRradar – zmierzony namiar rzeczywisty do znaku na obrazie radarowym.

Źródło: Sprawozdanie końcowe z projektu badawczego nr 2108/B/T02/2007/33.

Wyniki wyznaczeń w oparciu o namiary do wybranych ech radarowych są następujące:

— macierz współczynników przy niewiadomych

$$A = \begin{bmatrix} NR_{Xmapa} & NR_{Ymapa} \\ 0.007978 & 0.003435 \\ 0.007296 & -0.003691 \\ -0.001580 & 0.019842 \\ -0.013509 & 0.003334 \\ -0.003700 & -0.002565 \end{bmatrix};$$

— macierz wyrazów wolnych

$$L = \begin{bmatrix} NR_{mapa} - NR_{radar} \\ 1.375798 \\ 3.054728 \\ -6.996345 \\ -3.958533 \\ 3.360705 \end{bmatrix};$$

— macierz wag

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_{NR_1}^2} & & & & \\ & \frac{1}{m_{NR_2}^2} & & & \\ & & \frac{1}{m_{NR_3}^2} & & \\ & & & \frac{1}{m_{NR_4}^2} & \\ & & & & \frac{1}{m_{NR_5}^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix};$$

— estymator przyrostów do współrzędnych zliczonych

$$\hat{d}_X = \begin{bmatrix} -196.2 \\ 352.9 \end{bmatrix};$$

— wyrównane współrzędne pozycji

$$\hat{X} = X^o + \hat{d}_X = \begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 360309.33 \\ 6045500.63 \end{bmatrix};$$

— wektor poprawek wykonanych obserwacji

$$V = \begin{bmatrix} 1.022546 \\ 0.320555 \\ 0.315940 \\ -0.131404 \\ 3.181657 \end{bmatrix};$$

— wyrównane wartości namiarów rzeczywistych

$$NR = \begin{bmatrix} 334.34 \\ 022.61 \\ 271.05 \\ 196.06 \\ 143.09 \end{bmatrix};$$

— wektor błędów średnich wyrównanych namiarów

$$m_{NR} = \begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.83 \\ 1.86 \\ 1.48 \\ 0.52 \end{bmatrix};$$

— błąd wyznaczenia pozycji estymowanej

$$m_p = \sqrt{m_{\hat{X}}^2 + m_{\hat{Y}}^2} = 146.30 \quad m.$$

Pokazane wyniki są przeliczane z układu *X*, *Y* na geograficzny układ współrzędnych. W niniejszym przykładzie z powodu nieskomplikowanej prezentacji wyników badań nie wykonano zamiany w układ współrzędnych geograficznych.

WNIOSKI

1. Rozwój elektroniki i informatyki w ostatnich latach przyniósł kolejne rozwiązania w zakresie wykorzystania radaru do celów nawigacyjnych, szczególnie do określania pozycji. Zastosowanie nowych technologii pozwoliło na odmienne podejście do zagadnienia mapy radarowej. Fotografowanie obrazów radarowych zastąpiono rejestracją sygnałów wizyjnych na nośnikach magnetycznych, a później cyfrowych.
2. Obecnie rejestracja obrazów radarowych nie stwarza większego problemu, a w dobie wzrostu bezpieczeństwa nawigacji staje się niemal obowiązkiem narzuconym przez Międzynarodową Organizację Morską (IMO). Urządzenia typu VDR lub MDR (*Voyage Data Recorder*, *Mission Data Recorder*) zostały stworzone dla spełnienia wymagań stawianych przez rezolucję IMO A.861(20) i służą do zapisywania wszelkich informacji z okrętu, pobieranych ze wszystkich urządzeń, nie tylko nawigacyjnych, na jednostkach pływających.

3. Proces prowadzenia nawigacji w oparciu o zautomatyzowane systemy antykolizyjne (ARPA — radary umożliwiające automatyczne śledzenie echa innej jednostki oraz pozwalające prognozować sytuację nawigacyjną) charakteryzuje się jak dotąd stosunkowo niską dokładnością. Powodem tego są nie tylko trudne do wyeliminowania zakłócenia fal radiowych (wpływające na częstotliwość pracy radaru) oraz ograniczenia techniczne w prezentacji echa radarowego na ekranie, ale także błędna identyfikacja echa radarowego, losowe i deterministyczne zakłócenia obserwacji radarowej oraz brak synchronizacji czasowej (lub brak jednoczesności) w procesie pozyskiwania informacji radarowych o położeniu obiektów.
4. Podstawowym naukowym celem zrealizowanego projektu było zwiększenie dokładności i niezawodności wyznaczeń w nawigacji radarowej. Cel naukowy został osiągany z zastosowaniem współczesnych metod opracowania obserwacji nawigacyjnych i geodezyjnych. W procesie identyfikacji i eliminacji wpływu na ostateczne wyznaczenia błędnych ech radarowych zastosowane zostały metody estymacji odpornej o odpowiednio dobranych funkcjach tłumienia. Proponowany rozwój odpornych metod estymacji, w zastosowaniu do opracowania obserwacji radarowych, wymagał ustalenia wiarygodnych warunków początkowych (np. pozycji startowej w procesie iteracyjnym). W tym zakresie zastosowano opracowane w Instytucie Nawigacji i Hydrografii Morskiej Akademii Marynarki Wojennej metody nawigacji porównawczej, które pozwalają na określenie pozycji obiektu (jednostki pływającej lub innego obserwowanego echa) z dokładnością od 1–3 pikseli.
5. Cel utylitarny osiągnięto poprzez zbudowanie stanowiska automatyzacji obliczeń i prezentacji wyników nawigacji radarowej, którego funkcjonalność opisano powyżej.

BIBLIOGRAFIA

[1] Czaplewski K., *Positioning with Interactive Navigational Structures Implementation*, 'Annual of Navigation', 2004, No. 7 (rozprawa habilitacyjna).

[2] Czaplewski K., Wąż M., *Construction of the Interactive Navigational Structure on the Basis of Radar Display*, International Conference ENC-GNSS, 2009, 3–6 May, Neapol, pp. 325–328.

[3] Czaplewski K., Wąż M., *The Interactive Navigational Structure in Radar Navigation*, 'Polish Journal of Environmental Studies', 2009, Vol. 18, No. 5A, pp. 34–43.

[4] Czaplewski K., Wiśniewski Z., *Hybrid M-estimation in Maritime Navigation*, 'Polish Journal of Environmental Studies', 2008, Vol. 17, No. 5A, pp. 25–32.

[5] Czaplewski K., Wiśniewski Z., *Theoretical Foundation for the Interactive Navigational Structure Taking into Consideration the Deterministic Model of Survey Errors*, 'Annual of Navigation', 2007, No. 11.

[6] Naus K., *Zastosowanie dynamicznego odwzorowania perspektywicznego do zobrazowania elektronicznej mapy nawigacyjnej* (rozprawa doktorska), Gdynia 2003.

[7] Sprawozdanie końcowe z projektu badawczego numer 2108/B/T02/2007/33.

[8] Stateczny A., Wąż M., *Pozycjonowanie bazujące na obrazach radarowych. Metody nawigacji porównawczej*, Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Gdynia 2004.

[9] Urbański J., Kopacz Z., Posiła J., *Nawigacja morska*, cz. 2, AMW, Gdynia 2000.

[10] Wąż M., *Application of Multilayer Perceptron in Radar Navigation*, 4th International Conference 'Navy and Shipbuilding Nowadays', St. Petersburg 26–29.06.2007.

[11] Wąż M., Cichocki A., *Zastosowanie algorytmów porównawczych do określania pozycji okrętu*, „Zeszyty Naukowe" AMW, 1999, nr 1.

[12] Wąż M., Czaplewski K., *Automation of Radar Navigation*, 'European Journal of Navigation', 2009, Vol. 7, No. 2, pp. 33–39.

[13] Wąż M., *Metoda wyznaczania pozycji okrętu za pomocą porównania obrazu radarowego z mapą morską* (rozprawa doktorska), Gdynia 2000.

[14] Wiśniewski Z., *Metody opracowania wyników pomiarów w nawigacji i hydrografii*, AMW, Gdynia 2004.

[15] Wiśniewski Z., *Teoretyczne podstawy filtracji obserwacji nawigacyjnych uzyskanych z zastosowaniem Pokładowej Sieci Pomiarowej*, AMW, Gdynia 2010.

TEST STAND FOR AUTOMATION OF RADAR NAVIGATION

ABSTRACT

The paper presents results of research work done in Institute of Navigation and Hydrography Polish Naval Academy. Our theoretical work has been done over the last ten years. And now implementation phase has started. The results of the work is a test stand for automation of radar navigation. Navigators at sea can use the stand for automation of radar navigation during execution of typical navigational tasks. This study was supported by a grant from Ministry of Science and Higher Education.

Keywords:
navigation, radar navigation, M-estimation method, automation of navigation processes.

Recenzent dr inż. Ryszard Wawruch