

**ZESZYTY NAUKOWE NR 2 (74)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Jakub Montewka

**Metoda wyznaczania bezpiecznego obszaru manewrowego
statków, oparta na pomiarach fotooptycznych**

Słowa kluczowe: bezpieczny obszar manewrowy, metoda kształtowania dróg wodnych,
pomiar laserowy, inżynieria ruchu morskiego

Przedstawiono koncepcję metody określania wymiarów bezpiecznego akwenu manewrowego statku w płaszczyźnie poziomej, opartej na pomiarach wykonanych dalmierzami laserowymi na przykładzie wejścia do portu w Świnoujściu. Zawarto również analizę błędów, jakimi metoda jest obciążona.

**The Method of Determination the Safe Maneuvering Area
for Vessels, Based on Optical Laser Measurements**

Key words: safe maneuvering area, method of determination waterways parameters,
laser rangefinder measurement, marine traffic engineering

The article presents a concept of the method of determination the horizontal dimensions of safe maneuvering area for vessels, based on laser measurements, conducted at the entrance to the Port of Świnoujście.

The error analysis of the method is discussed as well.

Wstęp

Proponowana w artykule metoda wyznaczania obszaru manewrowego statku jest metodą eksperymentalną, opierającą się na pomiarach wykonanych z zastosowaniem dalmierzy laserowych oraz kompasów elektronicznych. Techniki pomiarowe są znane w geodezji lądowej [7], z racji dużej dokładności, jakimi się charakteryzują, cieszą się dużą popularnością. Z tego względu postanowiono zaadaptować je do potrzeb inżynierii ruchu morskiego.

Pomiary wykonywane za pomocą zestawu dwóch dalmierzy laserowych z dołączonymi kompasami elektronicznymi, realizowane z nabrzeża do przepływających jednostek, pozwalają na opracowanie metody wyznaczania bezpiecznego obszaru manewrowego jednostki. Metoda taka charakteryzuje się dużą dokładnością, autonomicznością oraz stosunkowo niskimi kosztami zakupu i eksploatacji sprzętu.

Ograniczenia przedstawianej metody wynikają przede wszystkim z zasięgu dalmierza (300 m) [4] oraz wpływu otoczenia na dokładność kompasu elektronicznego [6].

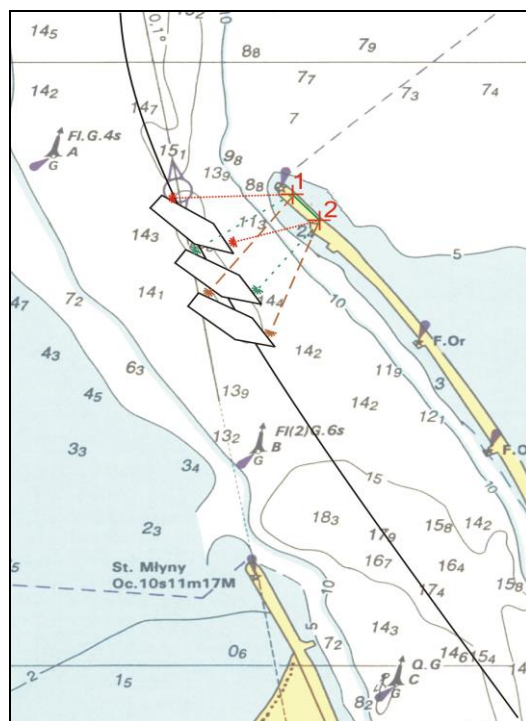
Zastosowana metoda pomiaru, polegająca na śledzeniu charakterystycznych punktów na dziobie i rufie jednostki (z *ang.* *tracking*), pozwala na określenie szerokości pasa ruchu statku, a następnie na wyznaczenie bezpiecznego obszaru manewrowego na odcinku toru wodnego o długości około 400 m.

W artykule przedstawiono metodę badawczą, jej błędy oraz ograniczenia, opisano także eksperyment związany z wyznaczeniem szerokości pasa ruchu promu m/f „Pomerania” podczas wyjścia z portu w Świnoujściu.

1. Metoda badawcza

Proponowana metoda wyznaczania szerokości pasa ruchu statku, jest metodą eksperymentalną. Wykorzystuje ona technikę TOF (*Time Of Flight*), laserowego pomiaru odległości z jednoczesnym pomiarem kąta, za pomocą impulsowego dalmierza laserowego z dołączonym kompasem elektronicznym.

Skalibrowane urządzenia ustawiono na głowicy falochronu, na wybranej i oznakowanej pozycji, umożliwiając dokonanie pomiaru odległości i kąta do burty statków wchodzących lub wychodzących z portu. Pomiar był wykonywany jednocześnie przez dwa dalmierze, prowadzone przez operatorów, gdzie jeden śledził położenie charakterystycznego punktu w części dziobowej statku, natomiast drugi śledził charakterystyczny punkt w części rufowej jednostki. Pomiar realizowano w stosunku do wstawki cylindrycznej jednostki. Szkic sytuacyjny przedstawiający zasadę wykonywania pomiaru podano na rysunku 1.



Rys. 1. Zasada wykonywania pomiaru dwoma dalmierzami z zastosowaniem techniki śledzenia
Fig. 1. The principle of performing the measurement with two rangefinders, called tracking technique

1.1. Wybór akwenu do przeprowadzenia eksperymentu

Akwenu, na którym wykonywano pomiary to wejście do portu w Świnoujściu w rejonie wschodniej głowicy falochronu. Akwenu ten został wybrany do badań ze względu na stosunkowo wysoki poziom ryzyka nawigacyjnego, jaki jest związany z wykonywanymi w tym rejonie manewrami jednostek [8]. Wejście do portu w Świnoujściu to zakole drogi wodnej, układ ten wymusza wykonywanie wielu skomplikowanych manewrów na styku morza otwartego oraz akwenu ograniczonego, gdzie występuje zmiana warunków hydrologicznych.

Na wysuniętej w morze wschodniej głowicy falochronu ustawiono stanowisko pomiarowe, dzięki czemu obserwacją można było objąć zakole drogi wodnej, prowadzące z otwartego morza do kanału portowego.

Stanowiska dalmierzy zostały osadzone na końcowym, prostoliniowym odcinku falochronu w odległości 5 m od siebie, w celu zapewnienia operatorom swobody ruchów podczas wykonywania pomiarów oraz nieprzysłaniania sobie wzajemnie obserwowanej jednostki, co miało miejsce w przypadku bliższego ustawienia dalmierzy.

1.2. Błędy metody

Błędy charakteryzujące omawianą metodę można podzielić na trzy grupy [7]:

- błędy wynikające z dokładności urządzenia – błędy instrumentalne,
- błędy wynikające z przyjętej metody wykonywania pomiarów (śledzenie obiektu),
- błędy wygenerowane na etapie obróbki danych oraz błędy związane z transformacją wyników do wybranego układu odniesienia.

1.2.1. Błędy wynikające z dokładności urządzenia – błędy instrumentalne

W celu wyznaczenia błędów instrumentalnych dalmierzy oraz kompasów elektronicznych przeprowadzono testy terenowe, których wyniki poddane analizie statystycznej umożliwiły określenie faktycznych wartości błędów, jakimi charakteryzują się stosowane w metodzie urządzenia. Wartości niepewności zostały zebrane w tabeli 1.

Tabela 1

Zestawienie wartości błędów pomiaru odległości oraz kąta dalmierzem LaserAce300 firmy MDL z kompasem elektronicznym
Errors of of distance and angle measurements by an MDL-made LaserAce300 rangefinder with an electronic compass

Pomiar statyczny	
Pomiar odległości [m]	Pomiar kąta [deg]
0,047	0,17
Pomiar dynamiczny	
Pomiar odległości [m]	Pomiar kąta [deg]
0,058	0,41

Źródło: opracowanie własne.

1.2.2. Błędy wynikające z przyjętej metody wykonywania pomiarów

Opisywaną grupę błędów, wynikającą z przyjętej metody wykonywania pomiaru, polegającej na śledzeniu statku, można podzielić na dwie podgrupy:

- błędy systematyczne:
 - błąd pomiaru odległości, na podstawie przeprowadzonych testów terenowych: $\delta_a = 0,05$ m,
 - błąd pomiaru kąta, na podstawie przeprowadzonych testów terenowych: $\delta_a = 0,17^\circ$;
- błędy przypadkowe (losowe):

- błąd spowodowany nieutrzymaniem płamki dalmierza w stałym punkcie,
- wpływ bezwładności kompasu na dokładność pomiaru kąta.

Na podstawie danych otrzymanych w wyniku przeprowadzonego eksperymentu terenowego oraz dokonanej analizy statystycznej i logicznej można przyjąć, iż niepewność pomiaru dynamicznego związana z uwzględnieniem opisanych wyżej błędów wynosi:

- $\delta_d = 0,058$ m, dla pomiaru odległości,
- $\delta_\alpha = 0,41^\circ$, dla pomiaru kąta.

1.2.3. Błędy wygenerowane na etapie obróbki danych oraz błędy związane z transformacją wyników do wybranego układu odniesienia

Z dokonaną transformacją współrzędnych jest związany problem propagacji niepewności parametrów wejściowych na wartości parametrów wyjściowych. Parametrami wejścia są: odległość zredukowana (d) oraz kąt (α). Parametrami wyjścia są współrzędne kartezjańskie. Niepewność związaną z wyznaczaniem współrzędnych kartezjańskich (X, Y) można oszacować stosując przekształcenia z zakresu teorii przenoszenia błędów [10].

2. Przeprowadzenie eksperymentu

2.1. Statki, warunki oraz wykonywane manewry

Eksperyment został przeprowadzony w dniu 27.07.2003 r., w zmiennych warunkach hydrometeorologicznych oraz o różnych porach doby. Polegał on na wykonaniu serii pomiarów do burt promów pasażerskich, manewrujących w rejonie główek wejściowych portu w Świnoujściu.

Celem nadrzędnym eksperymentu było wyznaczenie szerokości pasa ruchu statku w pojedynczym przejeździe. Celem cząstkowym było określenie wartości błędu, jakim dana metoda charakteryzuje się w konkretnych warunkach. Dokładność metody w dużej mierze zależy od odległości jednostki od stanowiska pomiarowego oraz jej ułożenia w stosunku do linii, wzdłuż której wykonywany jest pomiar.

W tabeli 2 zestawiono parametry obserwowanych jednostek, wykonywane przez nie manewry, warunki hydrometeorologiczne oraz porę dnia w jakich przeprowadzono pomiary.

Tabela 2

Parametry jednostek, obserwowane manewry oraz warunki hydrometeorologiczne
The vessel's parameters and maneuvers carried out and the prevailing hydro-meteorological conditions

Jednostka	Godzina	Manewr	L_c [m]	B [m]	T [m]	Wiatr [m/s]
„Silesia”	1920 (dzień)	wejście	127,60	19,4	4,7	2,1 NW
„Silesia”	2300 (noc)	wejście	127,60	19,4	4,7	0,3 W
„Pomerania”	2230 (noc)	wyjście	127,44	21,7	5,6	0,3 WNW / ulewny deszcz

Pomiary przeprowadzono w godzinach wieczornych, w warunkach dobrej widzialności. Jedyne pomiar w odniesieniu do m/f „Pomerania” odbywał się w warunkach nocnych, przy ograniczonej widzialności spowodowanej ulewnym deszczem. Siłę wiatru oraz wartości prędkości prądu otrzymano z kapitanatu portu w Świnoujściu. Dane te zostały zarchiwizowane i mogą posłużyć do dalszych badań.

2.2. Metodyka wyznaczania pasa ruchu statku w pojedynczym przejeździe

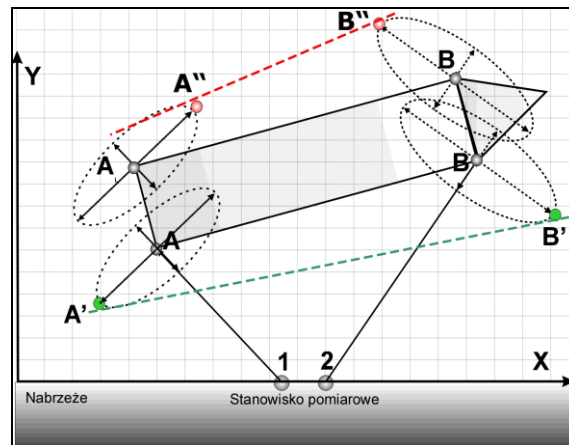
Na podstawie wyznaczonych współrzędnych punktów charakterystycznych kadłuba, w części rufowej i dziobowej wstawki cylindrycznej statku, oraz mając błędy jakimi są obarczone, można przeprowadzić dalsze obliczenia, mające na celu wyznaczenie szerokości pasa ruchu statku w pojedynczym przejeździe.

Pas ruchu należy określić jako obszar ograniczony z jednej strony linią zawierającą punkty najbliższe stanowisku pomiarowemu, natomiast z drugiej strony linią będącą zbiorem punktów najbardziej oddalonych od dalmierza. Każda próba związana z pojedynczym przejściem statku wyznacza charakterystyczny dla niej pas ruchu.

Aby wyznaczyć pas ruchu statku oraz określić wielkość błędu, jakim jest on obciążony w trakcie pojedynczego przejścia należy:

- na podstawie wyliczonego położenia punktów A oraz B wyznaczyć punkty skrajne burty przeciwnej (A_L, B_L);
- określić położenie punktów A', A'' oraz B', B'' ;
- wyznaczyć cztery zbiory, dla burty prawej (A, A', B, B') oraz lewej statku (A_L, A'', B_L, B'');
- ze zbiorów tych dla poszczególnych pomiarów należy wyłonić wartości najmniejsze oraz największe – punkt najbliższy oraz najdalszy stanowisku pomiarowemu;
- połączyć punkty skrajne, tworząc w ten sposób linie wyznaczające pas ruchu statku na danym akwenie.

Schematycznie zasada wyznaczania pasa ruchu z pojedynczego przejazdu statku została przedstawiona na rysunku 2, gdzie linią przerywaną zaznaczono pas ruchu, którego algorytm obliczeniowy uwzględnia już błędy metody.



Rys. 2. Procedura wyznaczania błędu metody na podstawie pojedynczej obserwacji dziobu i rufy
Fig. 2. The procedure of determination the error the ship's swept path width and path's width itself, based on the single measurement of characteristic points of bow and stern

3. Wyniki

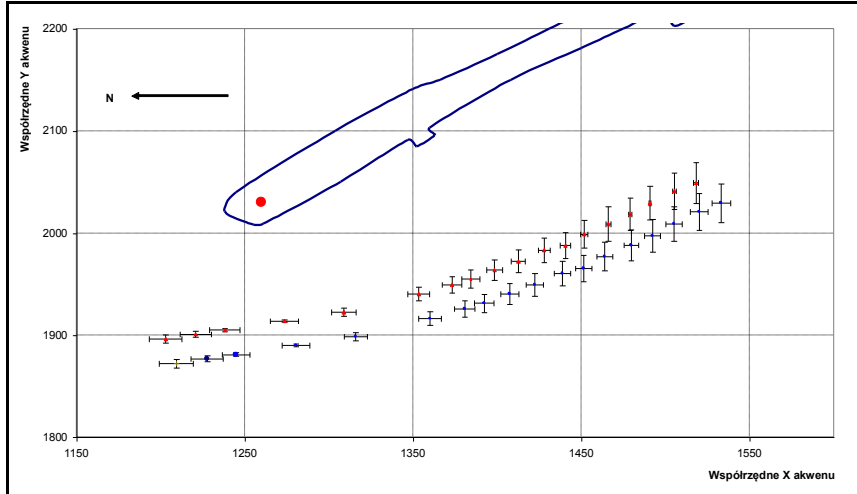
Porównując współrzędne charakterystycznych punktów statku otrzymane z pomiaru bezpośredniego (A , B , A_L , B_L), ze współrzędnymi uwzględniającymi niepewności pomiarowe (A' , B' , A'' , B''), można określić wartości błędów oraz ich przebieg dla kolejnych położenia statku na torze wodnym. Błędy te charakteryzują się istotną zmiennością w zależności od odległości statku od stanowiska oraz kąta ułożenia względem stanowiska.

Dokładność określenia pasa ruchu statku, z jednej tylko burty, wynikająca z omówionych błędów, waha się od 0,9 m (gdy statek znajduje się na wprost stanowiska) do 2,0 m (gdy statek znajduje się na skraju zasięgu urządzenia).

Na rysunku 3 przedstawiono zarejestrowane odległości skrajnego punktu na rufie statku wraz z niepewnościami charakteryzującymi każdy pomiar.

W celu przejrzystego zobrazowania sytuacji na mapie akwenu, przedstawiono tylko serię danych pozyskanych z jednego dalmierza.

Wartości błędów określenia współrzędnych kartezjańskich położenia kolejnych punktów kadłuba reprezentowane przez słupki błędu są powiększone dziesięciokrotnie, w celu lepszego zilustrowania sytuacji.



Rys. 3. Graficzna interpretacja błędów metody na przykładzie promu m/f „Pomerania”
 Fig. 3. Graphical interpretation of widening of the ship's path width – m/f “Pomerania”

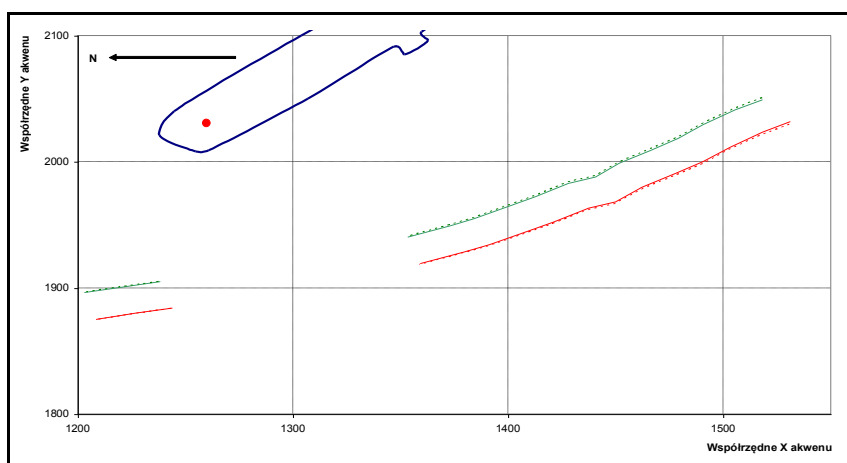
Największymi błędami charakteryzują się pomiary najbardziej oddalone od stanowiska pomiarowego (oznaczone jako kropka na głowicy falochronu). Dla tych położenia statku dominującym jest błąd określenia współrzędnej Y , istotnie wpływający na dokładność określenia pasa ruchu.

Wraz ze zbliżaniem się statku do stanowiska wartości błędów maleją, zmienia się także ich układ. Zaczyna przeważać błąd wyznaczenia współrzędnej X , który w niewielki sposób wpływa na poszerzenie szerokości pasa ruchu. Najmniejsze błędy charakteryzują pomiary wykonane, gdy statek znajdował się na wprost dalmierza.

Wartości błędów wyznaczenia współrzędnych punktów charakterystycznych burty przeciwległej (A_L, B_L) są większe niż błędy wyznaczenia współrzędnych burty bezpośrednio obserwowanej (A, B). Wynika to przede wszystkim z propagacji błędów określania kierunku i odległości. Błędy, jakimi są obciążone pomiary bezpośrednie, w trakcie dalszych obliczeń sumują się, powodując w efekcie wzrost parametrów elipsy błędów charakteryzującej położenie punktu burty przeciwnej.

Na rysunku 4 zaprezentowano w postaci graficznej, ślad wyznaczony przez charakterystyczny punkt na rufie promu m/f „Pomerania” podczas wyjścia z portu w Świnoujściu. Linia ciągła obrazuje wyniki pomiaru bezpośredniego dla burty bliższej stanowisku oraz wartości wyliczone dla burty przeciwnej, bez uwzględnienia błędów pomiarowych. Linie przerywane przedstawiają wyniki pomiaru skorygowane o wartości błędu metody. W sektorach najbardziej oddalonych od stanowiska pomiarowego dokładność określenia pasa ruchu dochodzi do 4 m, natomiast w sektorach bliższych stanowisku wynosi 1,5 m, w stosunku

do pasa wyznaczonego z pomiaru bezpośredniego. Wartości te zostały wyliczone na poziomie prawdopodobieństwa 0,68.



Rys. 4. Zarejestrowane odległości charakterystycznego punktu na rufie statku wraz z wielkością błędu

Fig. 4. Measured distances of the characteristic point of ship's stern (solid lines) in comparison with the distances corrected for errors (dotted lines)

Wnioski

Zaprezentowana metoda wyznaczania bezpiecznego obszaru manewrowego statku oparta na dokładnych, znanych w pomiarach lądowych urządzeniach oraz sposobach pomiarowych, jest podejściem do problemu szacowania poziomu bezpieczeństwa na akwenach ograniczonych.

Metoda rzeczywista wyznaczania bezpiecznego obszaru manewrowego statku charakteryzuje się dokładnością od 1,5 m do 4 m, przy czym wyznaczając za jej pomocą szerokość pasa ruchu statku uwzględniane są nie tylko, jak w większości metod, czynniki zewnętrzne oddziałujące na kadłub, lecz wszystkie elementy wpływające na zachowanie się statku oraz jego trajektorię w układzie: środowisko – człowiek – statek.

Duża dokładność, jaka charakteryzuje przedstawianą metodę oraz jej autonomiczność pozwala na zastosowanie metody jako narzędzia do weryfikacji istniejących metod wyznaczania dróg wodnych, w tym szeroko rozpowszechnionej metody symulacyjnej. Metoda rzeczywista może również mieć zastosowanie na akwenach, gdzie ze względu na specyfikę rejonu, inne sposoby bądź systemy umożliwiające wyznaczanie horyzontalnych wymiarów bezpiecznego akwenu manewrowego mogą okazać się nieskuteczne, lub mało dokładne.

Kolejnym krokiem w badaniach nad metodą, może być pasywne zwiększenie siły odbitego sygnału, zapobiegające utracie danych i powstawaniu luk w pomiarze oraz próba zastosowania dokładniejszego urządzenia do pomiaru kąta, np.: enkodera, zwiększając przy tym dokładność pomiaru skutkującą w mniejszych błędach metody.

Literatura

1. Gucma S., *Kierunki badań inżynierii ruchu morskiego – stan obecny, perspektywy*, Materiały na VII Międzynarodową Konferencję Inżynierii Ruchu Morskiego, Wydawnictwo WSM Szczecin, Szczecin 1997.
2. Gucma S., *Metody wyznaczania i kształtowania dróg wodnych*, Studia nr 15, Wydawnictwo WSM Szczecin, Szczecin 1990.
3. Holeyko K., *Precyzyjne elektroniczne pomiary odległości i kątów*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1981.
4. Instrukcja obsługi do dalmierza laserowego LaserAce 300 firmy MDL, Dystrybucja T.P.I. Warszawa.
5. Karsznia K., *Wybrane sposoby praktycznego testowania dokładności dalmierzy elektrooptycznych*, Przegląd Geodezyjny, 7/2003.
6. Ojeda L., Borenstein J., *Experimental Results with the KVH C-100 Fluxgate Compass in Mobile Robots*, Proceedings of the IASTED International Conference Robotic and Application 2000, Honolulu, Hawaii, USA, August 14-16.2000.
7. Osada E., *Geodezja*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
8. Ślęczka W., *Wymiarowanie obszaru manewrowania statku na podstawie analizy ryzyka awarii*, rozprawa doktorska, WSM Szczecin 2001.
9. Ślęczka W., Guzewicz J., *Metody wyznaczania obszaru manewrowania statku stosowane w badaniach symulacyjnych*, VII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Inżynierii Ruchu Morskiego, Szczecin 1997.
10. Taylor J.R., *Wstęp do analizy błęd pomiarowego*, Wydawnictwo Naukowe PWN S.A. Warszawa 1999.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

prof. dr hab. inż. Andrzej Felski
prof. dr hab. inż. kpt.ż.w. Stanisław Gucma

Adres Autora

mgr inż. Jakub Montewka
Akademia Morska w Szczecinie, Instytut Inżynierii Ruchu Morskiego
ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin, tel. 48 09 458, e-mail: kumo@wp.pl