

**ZESZYTY NAUKOWE NR 3(75)
AKADEMII MORSKIEJ
SZCZECIN 2005**

Arkadiusz Tomczak, Paweł Zalewski

**Analiza błędu wyznaczania kursu rzeczywistego statku
technikami GPS**

Słowa kluczowe: GPS, DGPS, kurs, bezpieczeństwo nawigacji.

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę dokładności określania kursu rzeczywistego pomiędzy dwoma antenami GPS dla dwóch technik pomiarowych autonomicznego GPS i kodowego DGPS. Dokonano również oceny przydatności ewentualnego zastosowania wyżej wymienionych technik pomiarowych w systemach prowadzenia statku na akwenach ograniczonych.

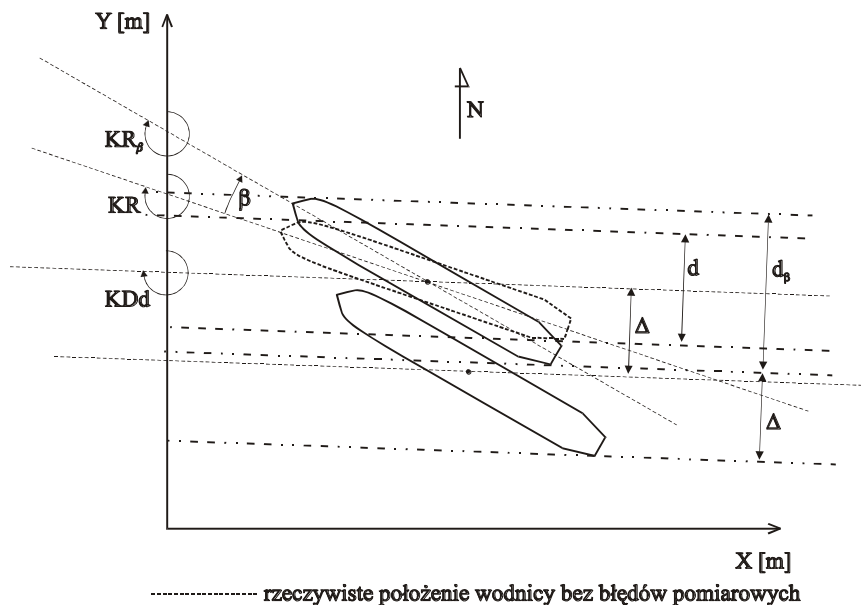
**Analysis of the Ship's True Heading Determination
by Means of GPS Techniques**

Keywords: GPS, DGPS, ship's heading, safety of navigation.

Abstract: The paper presents an accuracy evaluation analysis of the ship's heading measured between two GPS antennas of autonomic GPS and code DGPS type. The usefulness of the above mentioned GPS techniques for the vessel's navigation and piloting systems in confined waters has also been evaluated.

Wprowadzenie

Inżynieria Ruchu Morskiego wykorzystuje techniki satelitarnego pozycjonowania do oceny bezpieczeństwa ruchu statków na obszarach ograniczonych [1]. Na podstawie rejestrowanych w trzech wymiarach zmian położenia (szerokość geograficzna, długość geograficzna i wysokość nad przyjętym poziomem odniesienia) minimum dwóch anten rozmieszczonych w charakterystycznych punktach statku, możliwe jest wyznaczenie trajektorii ruchu, kursu rzeczywistego, prędkości i osiadania manewrującej jednostki. Parametry te mogą być wykorzystane w systemach prowadzenia statku takich jak: systemy pilotowe, systemy dokujące. Podstawowym wskaźnikiem do oceny bezpieczeństwa ruchu statków na obszarach ograniczonych jest szerokość pasa ruchu manewrującej jednostki, czyli rozkład odchyłek maksymalnych punktów wodnicy pływania od linii lub punktu odniesienia. Metody wyznaczania szerokości pasa ruchu jednostki podczas jednego przejazdu statku bazują na informacji o pozycji i kursie rzeczywistym jednostki. Maksymalne punkty wodnicy wyznacza się przy wykorzystaniu metod geometrii analitycznej, dla rejestrowanych synchronicznie, parametrów pozycji przyjętego punktu wodnicy i kursu rzeczywistego (KR). Błędy określenia kursu (β) i pozycji wpływają na obliczoną wodnicę jednostki, a tym samym są przenoszone na ostateczną szerokość jej pasa ruchu ($d_\beta + \Delta$ w stosunku do rzeczywistej szerokości d na rys. 1).



Rys. 1. Poszerzenie pasa ruchu wodnicy w wyniku błędu kursu i pozycji
 Fig. 1. Widening of the waterline's swept path as a result of heading and position error

Ocena dokładności wyznaczonego pasa ruchu powinna zostać przeprowadzona dwuetapowo. Etap pierwszy powinien obejmować ocenę niepewności wielkości mierzonych bezpośrednio, czyli pozycji dwóch synchronicznie pracujących odbiorników GPS. Następnie należy stwierdzić, w jaki sposób niepewności te przenoszą się w trakcie obliczeń, na niepewność wyznaczonego kursu, a ta z kolei na błąd ostatecznego wyniku, czyli na błąd, z jakim wyznaczony zostanie pas ruchu jednostki.

Istniejące techniki pomiarowe GPS, wykorzystywane w badaniach inżynierii ruchu morskiego zapewniają różne poziomy dokładności wyznaczonej pozycji. Najwygodniej byłoby stosować te techniki, które są najdokładniejsze. Jednak fakt, że są one najdroższe, i to, że w systemach prowadzenia statku wykorzystuje się pozycje 2D (dwuwymiarowe) zdecydował, iż armatorzy szukają rozwiązań mniej kosztownych, ale zapewniających wystarczającą dokładność prowadzenia statku w rejonach ograniczonych. Należy tu wspomnieć o istniejących odbiornikach specjalizowanych, dwu lub kilku antenowych, służących do wyznaczania orientacji przestrzennej obiektu. Dzięki pomiarowi różnicy fali nośnej na dwóch częstotliwościach L1, L2 i stałej odległości między antenami, odbiorniki te zapewniają wysoką dokładność wyznaczanych parametrów wektora stanu obiektu i są wygodne w użyciu. Wysoka cena tych urządzeń przyczynia się jednak do faktu, że na statkach floty handlowej i pasażerskiej są stosowane sporadycznie.

Do najtańszych i najpowszechniejszych technik pomiarowych GPS, spotykanych obecnie na statkach morskich zaliczyć można:

- GPS (autonomiczny),
- DGPS (kodowy ograniczony zasięgiem radiolatarni IALA lub kodowy autonomiczny EGNOS / WAAS / MSAS).

Ze względu na relatywnie niską cenę odbiorników zapewniających wyznaczenie pozycji w tych dwu trybach i z uwagi na fakt, iż w przyszłości dojdzie do wspólnej eksploatacji systemów GPS i GALILEO, co znacznie zwiększy dokładność tych technik, celowym wydaje się zbadanie ich przydatności do stosowania w systemach prowadzenia statku w rejonach ograniczonych. Można tego dokonać na podstawie analizy dokładności pozycji i kursu rzeczywistego, obliczonego dla dwóch pracujących synchronicznie odbiorników GPS.

W artykule przedstawiono matematyczny model błędu kursu rzeczywistego, określanego na podstawie wskazań dwóch synchronicznie działających odbiorników GPS. Określono błąd, jakim obarczony jest kurs rzeczywisty wyznaczony następującymi technikami pomiarowymi:

- GPS,
- DGPS (kodowy),

Dokonano również oceny przydatności wyżej wymienionych technik pomiarowych do stosowania w systemach prowadzenia statku na akwenach ograniczonych.

1. Metody oceny wielkości błędu kursu rzeczywistego

Wartość błędu kursu rzeczywistego (β), wyznaczonego z dwóch synchronicznie działających odbiorników GPS zależy od:

- błędu, z jakim określono pozycje anten odbiorników pracujących w systemie - (2DRMS, $p = 0,68$),
- odległości między tymi antenami - (d_A),
- wzajemnej korelacji wektorów błędu pozycji poszczególnych anten w czasie t - (r).

W przypadku, gdy korelacja pomiędzy wektorami błędów pozycji równa jest (-1), mówimy o ich korelacji ujemnej (antykorelacji), czyli o sytuacji, gdy poszczególne wektory błędów są przeciwne, co do wartości i kierunku. W szczególnym przypadku antykorelacji (rys. 2) błąd β przyjmuje wartość największą (β_{\max}). Błąd kursu ma wartość najmniejszą (β_{\min}), gdy korelacja pomiędzy wektorami błędów równa jest 1. Wektory błędów pozycji są wtedy równe, co do wartości i kierunku.

Błąd maksymalny (β_{\max}), jakim może być obciążony kurs rzeczywisty, opisany może być za pomocą metody analityczno-geometrycznej i metody wykorzystującej teorię przenoszenia niepewności pomiarowej. Do oceny faktycznej wartości błędu kursu rzeczywistego β wyznaczonego za pomocą dwóch anten GPS zastosować należy probabilistyczny model błędu kursu rzeczywistego.

1.1. Analityczno-geometryczny model maksymalnego błędu kursu rzeczywistego

Zasadę określania błędu maksymalnego kierunku między dwoma pozycjami ilustruje rys. 2. Wartości tego błędu (β_{\max}) można analitycznie wyrazić zależnością:

$$\beta_{\max} = \arcsin\left(\frac{sdh_2 + sdh_1}{d_A}\right) \quad (1)$$

gdzie:

- d_A – odległość między antenami,
- sdh_1, sdh_2 – odchylenia standardowe poziome lub 2DRMS, przy znanych pozycjach rzeczywistych ($N1, E1$), ($N2, E2$).

Kierunek (α) i odległość (d_A) pomiędzy kolejnymi pozycjami anten wyznacza się natomiast z zależności:

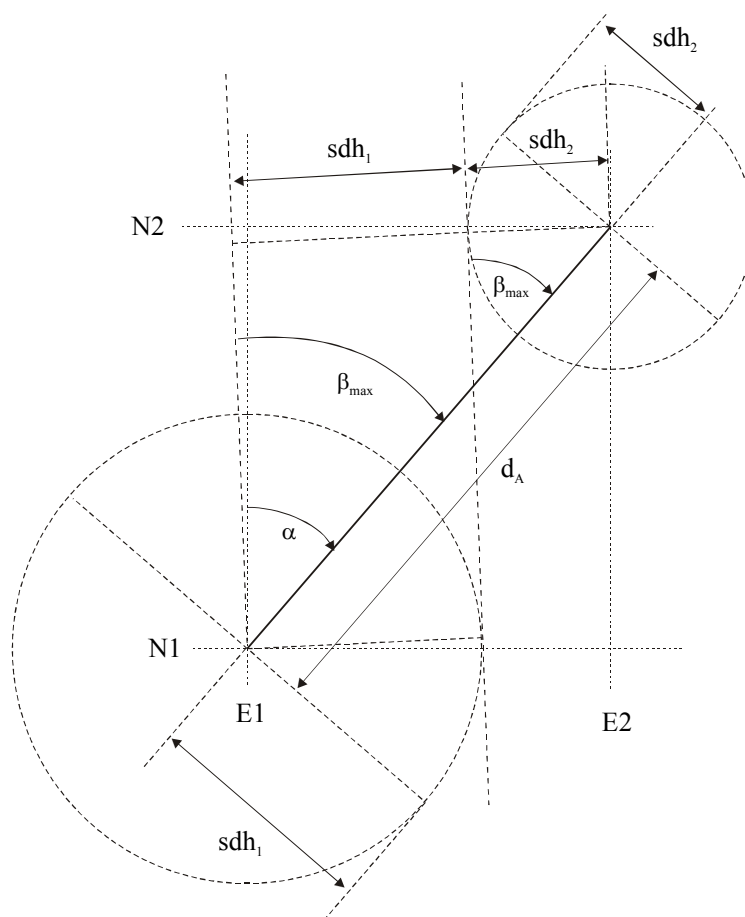
$$\alpha = \arctg\left(\frac{E2 - E1}{N2 - N1}\right) \quad (2)$$

$$d_A = \sqrt{(N2 - N1)^2 + (E2 - E1)^2} \quad (3)$$

gdzie:

E1, N1 - współrzędne pozycji anteny dziobowej,

E2, N2 - współrzędne pozycji anteny rufowej.



Rys. 2. Geometryczna zasada wyznaczenia kierunku pomiędzy dwoma pozycjami anten i oceny jego dokładności

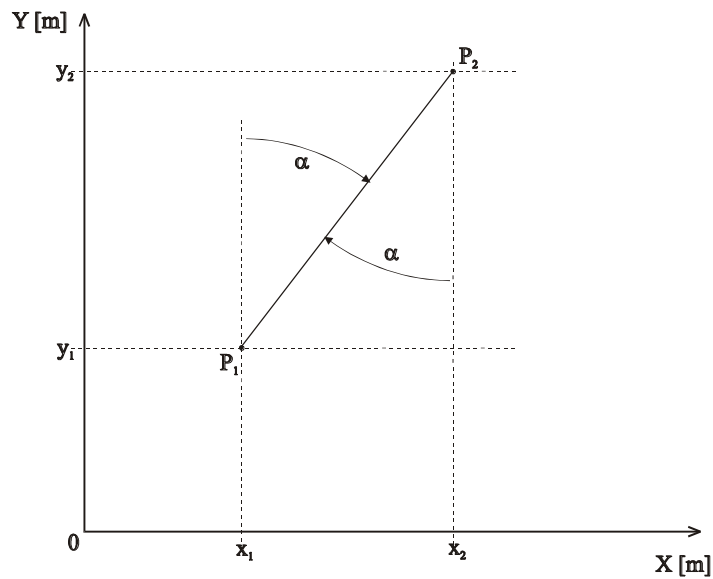
Fig. 2. The geometric principle of the direction determination and evaluation of its accuracy between two antennas' positions

1.2. Model błędu maksymalnego oparty na teorii przenoszenia błędu pomiarowego

Aby oszacować niepewność, z jaką wyznaczony zostanie kierunek α (rys. 3):

$$\alpha = \arctg \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \quad (4)$$

należy skorzystać z ogólnej reguły przenoszenia niepewności, gdzie: Δx_1 , Δx_2 , Δy_1 , Δy_2 są dowolnymi małymi przyrostami x_1 , x_2 , y_1 , y_2 , a $\partial\beta/\partial x_1$, $\partial\beta/\partial x_2$, $\partial\beta/\partial y_1$, $\partial\beta/\partial y_2$ są pochodnymi cząstkowymi β względem x_1 , x_2 , y_1 , y_2 . Oznacza to, że $\partial\beta/\partial x_1$ jest wynikiem różniczkowania β względem x_1 , przy ustalonych x_2 , y_1 , y_2 .



Rys.3. Zasada wyznaczenia kierunku pomiędzy dwoma punktami: $P_1(x_1, y_1)$ i $P_2(x_2, y_2)$ w prostokątnym układzie współrzędnych OXY

Fig.3. The principle of the direction determination between two points: $P_1(x_1, y_1)$ i $P_2(x_2, y_2)$ in the Cartesian reference system OXY

$$\begin{aligned} & \beta(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, y_1 + \Delta y_1, y_2 + \Delta y_2) = \\ & = \beta(x_1, y_1, x_2, y_2) + \frac{\partial\beta}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial\beta}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial\beta}{\partial y_1} \Delta y_1 + \frac{\partial\beta}{\partial y_2} \Delta y_2 \quad (5) \end{aligned}$$

Po zróżniczkowaniu i zamianie różniczek na przyrosty otrzymujemy:

$$|d\beta| = \frac{1}{d_A^2} \left[\frac{d_A}{\sqrt{2}} (|dx_1| + |dx_2| + |dy_1| + |dy_2|) \right] \quad (6)$$

Ostatecznie maksymalny błąd kursu wyrazić można równaniem:

$$\beta_{\max} = d\beta = \frac{1}{d_A \sqrt{2}} [|dx_1| + |dx_2| + |dy_1| + |dy_2|] \quad (7)$$

gdzie:

$\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta y_1, \Delta y_2$ - błędy z jakimi wyznaczone zostały poszczególne współrzędne.

1.3. Metoda oceny dokładności kursu rzeczywistego wyznaczonego z dwóch pozycji w funkcji odległości, dla korelacji różnej od -1

W celu oceny dokładności wyznaczania kursu rzeczywistego pomiędzy dwiema antenami GPS w zależności od odległości między nimi zestawiono:

- wartości błędu kołowego pozycji dla poszczególnych anten 2DRMS,
- wartości statystyk opisowych obliczonych zmiennych odległości i kierunku, pomiędzy antenami GPS (dobór metody obliczania kierunku w funkcji odległości, uzależniono od tego, czy znane są rzeczywiste współrzędne pozycji, w których umieszczone są anteny odbiorników w trakcie pomiarów, czy też nie ma możliwości wyznaczenia wektora błędu pozycji w oparciu o pozycje rzeczywiste; wynik statystyki w postaci błędu kierunku β , nie może być większy, niż wartość błędu maksymalnego: $\beta < \beta_{\max}$),
- wartości współczynników korelacji współrzędnych N i E pozycji anten,
- wartości błędu kierunku w funkcji odległości pochodzące z symulacji,
- maksymalne wartości błędu kierunku w funkcji odległości obliczone jedną z metod wyznaczania błędu maksymalnego.

2. Eksperyment badawczy

Eksperyment badawczy został przeprowadzony na terenie portu Świnoujście. Anteny odbiorników GPS umieszczono w punktach geodezyjnych znajdujących się na falochronie wschodnim portu. Odległość między antenami wynosiła 113,950 m, kierunek rzeczywisty $334,563^\circ$. Dane zostały zarejestrowane w kilkunastominutowych sesjach pomiarowych, wykonanych w przeciągu 6 dni

dla dwóch punktów pomiarowych. Eksperyment obejmował pomiary techniką kodową DGPS, przy wykorzystaniu własnej stacji referencyjnej oraz techniką autonomicznego GPS. Utworzyły one próbę pomiarową liczącą ponad 4000 pozycji dla każdej z technik. Odbiorniki pracowały synchronicznie, rejestrując pozycje w odstępach 1s.

W pierwszym etapie zweryfikowano w praktyce dokładności statyczne odbiornika Trimble Pathfinder Pro XRS dla dwóch technik pomiarowych: kodowego DGPS i GPS. Wyniki w postaci średniego błędu kwadratowego pozycji poziomej, przy poziomie ufności 0,68 oraz odchylenia standardowego pozycji poziomej zaprezentowano w tabeli 1.

Tabela 1

Wartości średniego błędu kwadratowego (2DRMS) pozycji poziomej przy poziomie ufności 0,68 oraz wartości odchyżeń standardowych pozycji poziomej (2Dsdh) anten P_1 i P_2 dla dwóch technik pomiarowych: DGPS i GPS

Tab. 1. Values of the P_1 and P_2 antennas positions' horizontal root mean square error (2DRMS) at 0,68 confidence level and values of their horizontal standard deviations (2sdh) for two measurement techniques: code DGPS and GPS

	DGPS		GPS	
	P_1	P_2	P_1	P_2
2DRMS [m]	0,236	0,275	4,010	4,242
2sdh [m]	0,124	0,220	1,553	1,646

Bardzo wysoka dokładność pozycji w trybie DGPS wynika z faktu, że w badaniach wykorzystano własną stację referencyjną oddaloną od punktów pomiarowych o około 1,5 km. Wcześniejsze badania dokładności pozycji wyznaczonej techniką DGPS w wariancie kodowym, przeprowadzone przez autorów z wykorzystaniem stacji referencyjnej w Dziwnowie (położonej ok. 50 km od miejsca pomiaru) [2], dały jednakże zbliżone rezultaty (2DRMS \approx 0,4 m, sdh \approx 0,8 m).

Następnie obliczono statystyki opisowe otrzymanych w przeprowadzonym eksperymencie zmiennych odległości i kierunku dla dwóch technik pomiarowych: DGPS i GPS, co przedstawiają tabele 2 i 3. Przedziały ufności dla średnich obliczono w oparciu o rozkład T-Studenta. Obliczając wartości odległości i kierunku bezpośrednio pomiędzy średnimi pozycjami otrzymano: dla GPS $d_A=114,145$ m, $\alpha=KR=334,589^\circ$; dla DGPS $d_A=114,145$ m, $KR=334,587^\circ$.

Tabela 2

Wartości statystyk opisowych zmiennych odległości i kierunku pomiędzy antenami GPS w eksperymencie pomiarowym w trybie autonomicznego GPS

Values of the descriptive statistics of distance and direction variables in the research performed with autonomous GPS

	n	Średnia	P. ufn. śr. -95%	P. ufn. śr. +95%	Mediana	Min.	Max.	Odch. std.
kurs [°]	4449	334,5891	334,5878	334,5905	334,5832	334,5418	335,4524	0,044828
odl. [m]	4449	114,1451	114,1420	114,1482	114,1446	113,4820	115,3882	0,104410

gdzie:

- n - liczebność próby
- odl. - odległość
- P. ufn. śr. - poziom ufności średniej
- Min. - minimalna wartość
- Max. - maksymalna wartość
- Odch. std. - odchylenie standardowe

Tabela 3

Wartości statystyk opisowych zmiennych odległości i kierunku pomiędzy antenami GPS w przeprowadzonym eksperymencie pomiarowym w trybie kodowym DGPS

Values of the descriptive statistics of distance and direction variables in the research performed with code DGPS.

	n	Średnia	P. ufn. śr. -95%	P. ufn. śr. +95%	Mediana	Min.	Max.	Odch. Std
kurs [°]	4449	334,5872	334,5864	334,5879	334,5831	334,5418	334,6597	0,025291
odl. [m]	4449	114,1452	114,1434	114,1470	114,1446	113,9741	114,2864	0,061578

Otrzymane odchylenia standardowe kierunku są bardzo niewielkie i wynoszą odpowiednio 0,025° dla DGPS i 0,044° dla GPS. Tak wysoką dokładność wyznaczonego parametru determinuje stosunkowo niewielki błąd pozycji 2DRMS oraz prawdopodobna wysoka korelacja wektorów błędów pozycji pomiędzy antenami GPS.

W dalszej części eksperymentu zbadano siłę korelacji pomiędzy odpowiednimi współrzędnymi N i E pozycji anten, wyznaczonymi podczas pomiaru, dla poziomu istotności $p < 0,05$. Ze względu na to, że w procesie weryfikacji normalności rozkładu populacji współrzędnych N i E dla poziomu istotności $p = 0,05$ odrzucono hipotezę o normalności rozkładu próby badanych współrzędnych, wy-

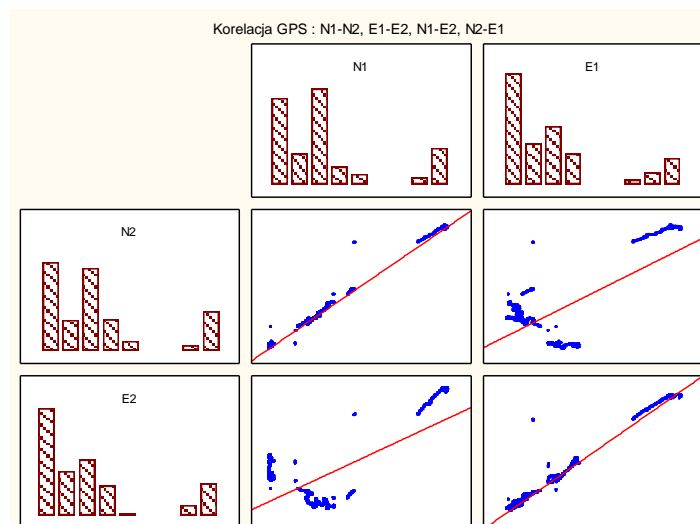
znaczono współczynnik korelacji liniowej Pearsona, oraz dodatkowo współczynniki nieparametrycznej korelacji R Spearmana, Tau Kendalla, Gamma dla trybów pomiarowych DGPS i GPS (tabele 4 i 5 oraz rysunki 4 i 5).

Tabela 4

Wartości współczynników korelacji współrzędnych N i E pozycji anten, istotnych statystycznie przy $p < 0,05$, dla pomiarów GPS.

Values of the statistically significant ($p < 0.05$) correlation coefficients of N and E antennas' coordinates for GPS measurements.

Współczynnik	N1-N2	E1-E2
korelacji liniowej Pearsona r_{xy}	1,00	0,99
nieparametrycznej korelacji R Spearmana	0,983	0,978
nieparametrycznej korelacji Tau Kendalla	0,906	0,887
nieparametrycznej korelacji Gamma	0,907	0,889



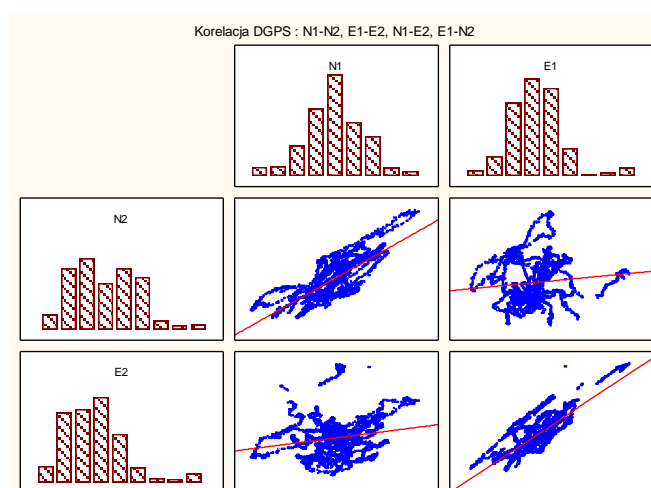
Rys. 4. Wykresy macierzowe rozrzutu i korelacji współrzędnych N i E pozycji anten GPS
 Fig. 4. Matrix diagrams of spread and correlation of N and E antennas' GPS coordinates

Otrzymane wyniki wskazują na występowanie bardzo wysokich korelacji odpowiednich współrzędnych pozycji anten P_1 i P_2 . Dla techniki autonomicznego GPS wartości współczynników Pearsona wynoszą 1 i 0,99, a dla odpowiedników nieparametrycznych przyjmują wartości powyżej 0,88. Położenie współrzędnych równoleżnikowych (N) i południkowych (E) w stosunku do prostej regresji przedstawiono na rys. 4. Znajdują się one prawie idealnie na prostej regresji.

Tabela 5

Wartości współczynników korelacji współrzędnych N i E pozycji anten, istotnych statystycznie przy $p < 0,05$, dla pomiarów DGPS
 Values of the statistically significant ($p < 0.05$) correlation coefficients of N and E antennas' coordinates for DGPS measurements

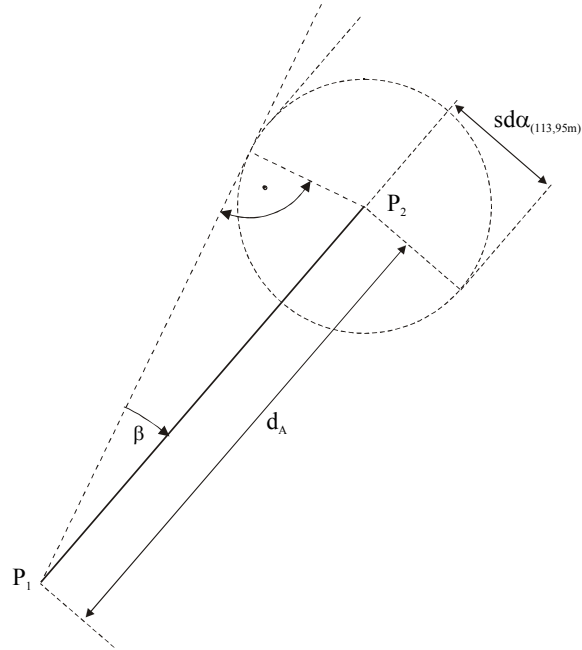
Współczynnik	N1-N2	E1-E2
korelacji liniowej <i>Pearsona</i> r_{xy}	0,800	0,840
nieparametrycznej korelacji <i>R Spearmana</i>	0,778	0,753
nieparametrycznej korelacji <i>Tau Kendalla</i>	0,591	0,575
nieparametrycznej korelacji <i>Gamma</i>	0,590	0,573



Rys. 5. Wykresy macierzowe rozrzutu i korelacji współrzędnych N i E pozycji anten DGPS
 Fig. 5. Matrix diagrams of spread and correlation of N and E antennas' DGPS coordinates

Niższe korelacje zaobserwowano dla techniki DGPS (rys. 5). Wartości współczynników korelacji *Pearsona* odpowiednich współrzędnych są prawie równe i wynoszą 0,8 i 0,84. Wartości korelacji dla współczynników stosowanych w przypadku odrzucenia hipotezy o normalności rozkładów, utrzymują się na poziomie przeciętnym i nie przyjmują wartości niższych niż 0,5. Słabszą korelacji współrzędnych DGPS potwierdza wykres macierzowy korelacji. Wartości, mimo, że usytuowane wzdłuż prostej regresji, to odchylają się od niej nieznacznie w obu kierunkach.

Ostatni etap obejmował wykonanie symulacji oceny zmiany dokładności pomiaru kursu rzeczywistego oraz maksymalnego błędu kursu rzeczywistego wraz ze wzrostem odległości między odbiornikami dla dwóch technik pomiarowych: autonomicznego GPS i DGPS (rys. 6).



Rys. 6. Analityczny model zastosowany w symulacji oceny maksymalnego błędu kursu rzeczywistego

Fig. 6. Analytical model used in simulation of maximum heading error evaluation

Wartość błędu pomiaru kierunku (β) analitycznie można wyrazić zależnością:

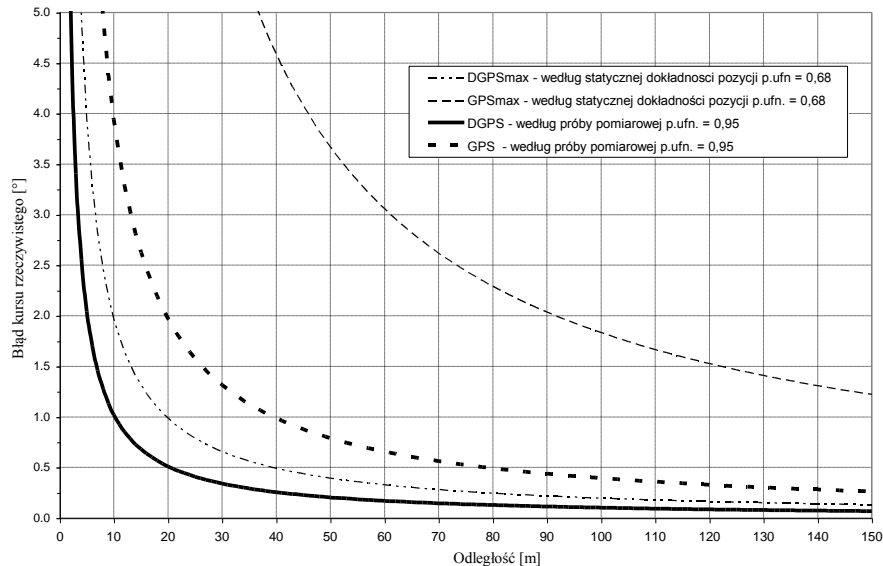
$$\beta = \arcsin \frac{sda_{(113,95m)}}{d_A} \quad (8)$$

gdzie:

$sda_{(113,95m)}$ - 2DRMS lub odchylenie standardowe kursu rzeczywistego od średniej obliczone na podstawie eksperymentu, gdy odległość między antenami wynosiła $d_A=113,95$ m.

Zmianę wielkości błędu maksymalnego β_{max} w funkcji odległości zasymulowano wykorzystując model oparty na teorii przenoszenia błędów (według zależności (7)).

Wyniki przeprowadzonej symulacji potwierdzają bardzo wysoką dokładność wyznaczonego kierunku (rys. 7).



Rys. 7. Zmiana dokładności pomiaru kursu rzeczywistego pomiędzy dwoma odbiornikami rejestrującymi synchronicznie pozycje dla trybów pracy GPS i DGPS

Fig. 7. Change of the heading accuracy measured between two synchronically position recording receivers of GPS and DGPS types

Zgodnie z oczekiwaniami wartość błędu rośnie wykładniczo wraz z redukcją odległości między antenami. Dla $d_A=1$ m błąd kierunku wynosi $2,8^\circ$ dla DGPS i 5° dla autonomicznego GPS przy poziomie ufności 0,68. Zwiększając odległość d_A do 10 m błąd kierunku maleje do $0,28^\circ$ dla DGPS i $0,5^\circ$ dla autonomicznego GPS. Błędy maksymalne natomiast wynoszą 2° dla DGPS i 18° dla GPS w przypadku, gdy odległość $d_A=10$ m. Tak wysokie wartości błędu tłumaczy fakt, że model błędu maksymalnego oparty jest na szczególnym przypadku maksymalnej ujemnej korelacji ($r = -1$) między wektorami błędów pozycji. Zasady rozrzutu pozycji wynikające z teorii działania systemu GPS, jak i przeprowadzone badania wykazują jednoznacznie, że jest to przypadek czysto teoretyczny, który w praktyce nie występuje.

Podsumowanie

Aktualne rozwiązania technologiczne odbiorników pozwalają na osiągnięcie decymetrowych dokładności pozycji w przypadku techniki DGPS i kilkumetrowych w przypadku GPS. W rezultacie osiągnięto bardzo wysoką dokładność określania kursu rzeczywistego pomiędzy dwoma antenami GPS, co sprawia, że możliwe jest stosowanie technik DGPS i autonomicznego GPS w systemach przeznaczonych do bezpiecznego prowadzenia statku na obszarach ograniczonych.

Wnioski z przeprowadzonego eksperymentu badawczego są następujące:

1. Wartość błędu określania kierunku techniką DGPS wyniosła $\beta < 1^\circ$ dla odległości między antenami $d_A = 6$ m i $\beta < 0,5^\circ$ dla odległości między antenami $d_A = 12$ m przy poziomie ufności 0,95. Biorąc pod uwagę konstrukcję statku i możliwość dogodnego rozmieszczenia anten stwierdzono, że podczas eksploatacji odległość między antenami nie powinna być mniejsza niż $d_A = 10$ m. Zapewnia to dokładność określania kursu około $0,5^\circ$ (lepszą od żyrokompasu) i czyni technikę wystarczająco dokładną do stosowania w systemach nawigacyjnych typu stacjonarnego i przenośnego.
2. Wartość błędu określania kierunku techniką autonomicznego GPS wyniosła $\beta < 1^\circ$ dla odległości między antenami $d_A = 10,5$ m i $\beta < 0,5^\circ$ dla odległości między antenami $d_A = 20$ m przy poziomie ufności 0,95. Ze względu na większy błąd kierunku, niż w przypadku DGPS zaleca się stosowanie techniki GPS w rozwiązaniach stacjonarnych, gdzie odległość między antenami i sposób mocowania nie determinuje funkcjonalności systemu.
3. W artykule przedstawiono zbiór procedur i metod służących do oceny dokładności określania kursu rzeczywistego pomiędzy dwoma odbiornikami GPS. Wyznaczono pomocnicze parametry, np. błąd maksymalny i korelację odpowiednich wektorów błędu pozycji, w celu dokonania pełniejszej analizy i wykazano zależność błędu kierunku od tych parametrów. Wspólna interpretacja wymienionych parametrów przy ocenie błędu kierunku może zminimalizować możliwość popełnienia pomyłki. Błąd wyznaczony na podstawie sesji pomiarowej nie może bowiem przewyższać błędu maksymalnego obliczonego przy założeniu maksymalnej korelacji ujemnej. W przypadku, gdy wartość błędu maksymalnego nie przekracza założonej w danym zastosowaniu dokładności można pominąć badania korelacji (odpowiednio małe wartości błędu maksymalnego wyznaczonego na podstawie 2DRMS pozycji uzyskać można np. techniką RTK).
4. Dla większych wartości błędu kursu otrzymanych z pomiarów GPS uzyskano równocześnie większą wartość korelacji zmian pozycji (wektorów błędu odpowiednich pozycji anten) niż w DGPS. Dalsze badania w celu określenia błędu kierunku wyznaczonego między dwoma antenami GPS powinny polegać na opisanu zależności wielkość błędu kierunku od wartości błędu pozycji 2DRMS i wartości korelacji pomiędzy wektorami błędów pozycji (korelacja wektorowa). Da to możliwość zbudowania modelu błędu kierunku, w którym zmienną wejściową będzie błąd pozycji 2DRMS.

Literatura

1. Gucma S.: „Inżynieria ruchu morskiego.” Okrętownictwo i Żegluga. Gdańsk 2001.

2. Zalewski P.: „*Applying Two DGPS Receivers to the Direction Measurement in Marine Traffic Engineering Research*”, IX Międzynarodowa Konferencja Inżynierii Ruchu Morskiego, WSM Szczecin, 2001.

Recenzent

dr hab. inż. Jacek Januszewski, prof. AM Gdynia
AM w Gdyni

Adres Autorów

dr inż. Paweł Zalewski
mgr inż. Arkadiusz Tomczak

Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Inżynierii Ruchu Morskiego
ul. Wały Chrobrego 1/2
70-500 Szczecin