

Andrzej Felski
Aleksander Nowak
Akademia Marynarki Wojennej

METODA WERYFIKACJI SYSTEMU NAWIGACJI INERCJALNEJ NA OKRĘCIE PODWODNYM

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono propozycję metody weryfikacji funkcjonowania systemu nawigacji inercjalnej na okręcie podwodnym na przykładzie systemu MINS-1. Próby przeprowadzono w położeniu nawodnym i podwodnym. Jako system odniesienia wykorzystano DGPS LF/MF, przy czym korekty różnicowe odbierano z morskiej stacji referencyjnej znajdującej się na Rozewiu. Porównano wartości prędkości i kursów określonych przez MINS-1 ze wskazaniami logu hydrodynamicznego oraz żyroskopów Anschütz i GKU-2.

Słowa kluczowe:

nawigacja inercjalna, żyroskop laserowy, nawigacja podwodna.

WSTĘP

Okręty podwodne w zanurzeniu mają ograniczone możliwości określania pozycji obserwowanej. Co prawda możliwe jest wypuszczenie na pławce anteny satelitarnej systemu nawigacyjnego (GNSS), jednak działanie takie może zdradzić położenie okrętu. W związku z tym współczesne okręty podwodne wyposażane są w systemy nawigacji inercjalnej (INS), które określają bieżącą pozycję okrętu w stosunku do pozycji początkowej (zadanej) metodą zliczenia, dla którego argumentami są, mierzone w sposób ciągły, przyspieszenia w trzech osiach ortokartezjańskiego lokalnego układu współrzędnych realizowanego za pośrednictwem żyroskopów. Zmierzone wartości transformowane są do geograficznego układu współrzędnych i finalnie nawigator otrzymuje informację o kursie i prędkości okrętu, jego bieżącej pozycji oraz dane dotyczące kołysania i nurzania. Pozycja wyznaczona przez INS

jest pozycją zliczoną, w związku z tym jej dokładność maleje wykładniczo z upływem czasu. Dzieje się tak między innymi dlatego, że na wartości pomiarów przyspieszeń wpływa nie tylko ruch jednostki, ale także ruch Ziemi oraz siły związane z ruchem i oddziaływaniem Ziemi, Słońca, Księżycy i planet. Wyniki są również zależne od jakości zastosowanych sensorów oraz algorytmów i aparatury przetwarzającej te dane [1, 3]. Z tego względu systemy nawigacji inercjalnej charakteryzują się ograniczonym czasem pracy w trybie nawigacji autonomicznej — konieczne jest okresowe korygowanie pozycji (ponowne wprowadzenie pozycji początkowej). Zatem czas do osiągnięcia maksymalnej dopuszczalnej wartości błędu pozycji bądź maksymalna wartość błędu pozycji po upływie określonego czasu stają się głównymi kryteriami przydatności danego systemu nawigacji inercjalnej. Jest to przyczyną, dla której znajomość zmian dokładności systemu INS ma dla praktyki nawigacyjnej kapitalne znaczenie. Zadanie jest szczególnie istotne dla okrętu podwodnego w zanurzeniu, gdy INS staje się zasadniczym źródłem informacji nawigacyjnej. Jednocześnie brak jest możliwości weryfikacji jego wskazań w tych warunkach. Celem referowanych badań było określenie zmian wartości błędu wyznaczanych przez INS współrzędnych pozycji, kursu i prędkości w funkcji jego autonomicznej pracy.

SYSTEM NAWIGACJI INERCJALNEJ MINS-1

Producentem systemu MINS-1 (którego moduły przedstawiono na rysunku 1.) jest firma Raytheon Anschütz. Podstawowym modułem systemu jest moduł inercjalny (DRU — Dynamic Reference Unit), którego zasadniczym elementem, poza układami elektronicznymi, jest zespół sensorów:

- trzy precyzyjne akcelerometry;
- trzy żyroskopy laserowe typu RLG.

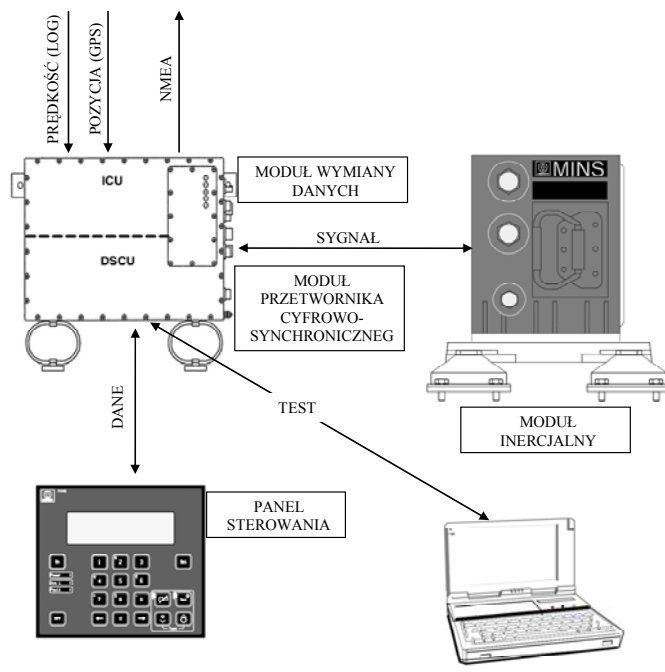
System MINS-1 może pracować w czterech trybach:

- nawigacja z systemem GPS i logiem;
- nawigacja z systemem GPS;
- nawigacja z logiem;
- nawigacja autonomiczna (tylko nawigacja inercjalna bez GPS i logu).

Zależnie od przyjętego trybu uzyskuje się różne dokładności. W przypadku współpracy z logiem i odbiornikiem GPS producent zapewnia następujące dokładności:

Kurs:	$\leq 3.0' * \sec \varphi$ (RMS)
Przechyły (wzdłużne i poprzeczne)	$\leq 1.14'$ (RMS)
Pozycja	$< 0,1 \text{ Mm/h}$ (CEP)

Dokładności te gwarantowane są w przedziale szerokości geograficznych poniżej 85° przy założeniu, iż błąd logu nie przekracza 0,5w. Dla pozostałych konfiguracji zmienia się dokładność pozycji i wartości te są każdorazowo negocjowane w kontrakcie. W tym przypadku oczekiwano, że w trybie autonomicznym, po upływie 12 godzin, błąd pozycji nie przekroczy 2Mm. Celem eksperymentu było sprawdzenie tej wartości.



Rys. 1. Schemat blokowy systemu MINS-1 oraz sposób połączenia komputera rejestrującego:
 ICU — Interface and Connection Unit, DSCU — Digital Signal Converter Unit,
 MINS — Marine Inertial Navigation System

PRZEBIEG EKSPERYMENTU

Eksperyment zrealizowano na Zatoce Gdańskiej w korzystnych warunkach meteorologicznych. Stan morza nie przekraczał trzech stopni przy wiatrach zmiennych. Okręt wyposażony był w następujące urządzenia nawigacyjne:

- odbiornik DGPS;
- żyrokompas Anschütz Standard 20;
- żyrokompas GKU-2;
- log hydrodynamiczny MGŁ.

WYNIKI EKSPERYMENTU

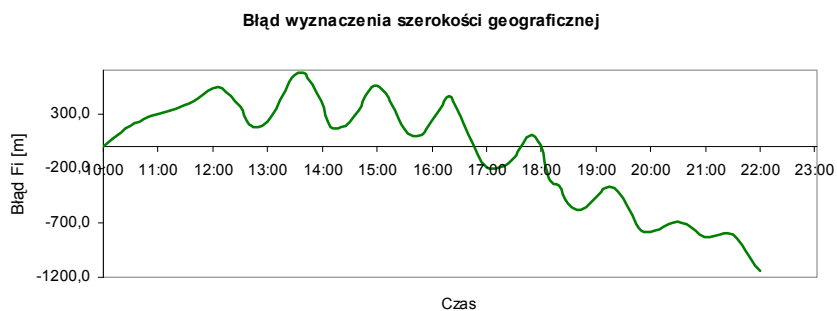
Wyniki przeprowadzonych prób analizowano pod kątem zgodności wskazań kursu i prędkości oraz wyznaczeń pozycji przez system MINS-1 pracujący w trybie autonomicznym z innymi przyrządami. Na potrzeby niniejszej publikacji wyniki eksperymentu przedstawiono w formie graficznej, przy czym za system wzorcowy przyjęto DGPS LF/MF. Rezultaty podzielono na następujące grupy:

- różnice wyznaczeń współrzędnych pozycji przez MINS-1 (szerokości i długości geograficznej oraz pozycji zliczonej);
- różnice wyznaczeń kursu;
- różnice wyznaczeń prędkości.

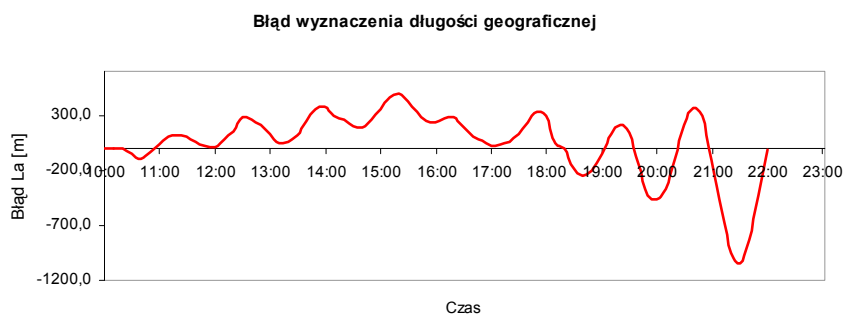
Poszczególne błędy porównano z odpowiednimi błędami wskazań pozostałych urządzeń nawigacyjnych (żyrokompasów i logu).

Dokładność wyznaczenia pozycji okrętu

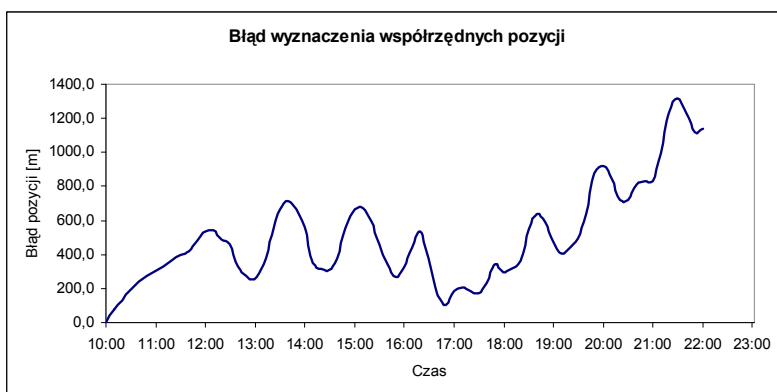
Na poniższych wykresach zaprezentowano różnice pomiędzy długością i szerokością geograficzną oraz współrzędnymi pozycji wyznaczonymi za pomocą DGPS LF/MF oraz MINS-1.



Rys. 3. Błędy wyznaczeń szerokości geograficznej przez INS MINS-1 w funkcji czasu

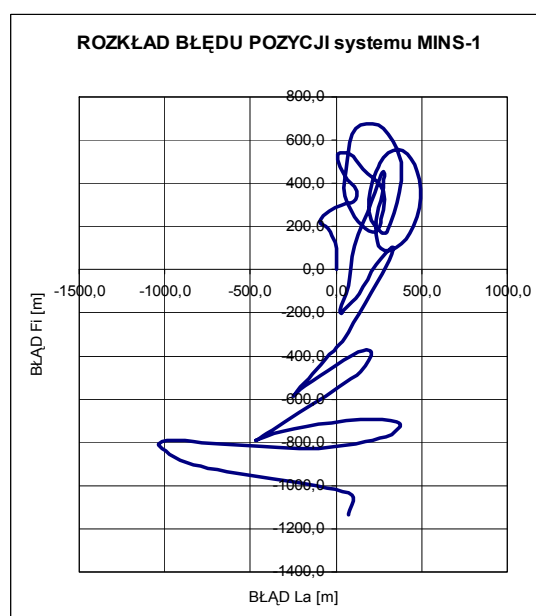


Rys. 4. Błędy wyznaczeń szerokości i długości geograficznej przez MINS-1 w funkcji czasu



Rys. 5. Błędy wyznaczeń współrzędnych pozycji przez MINS-1 w funkcji czasu

Rysunek 6. przedstawia rozkład błędów wyznaczeń współrzędnych pozycji przez MINS-1 w trakcie przeprowadzonych prób morskich.



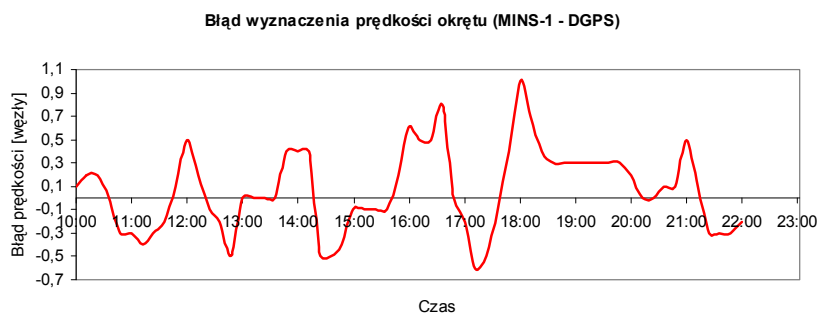
Rys. 6. Rozkład błędów wyznaczeń pozycji przez MINS-1

Przeprowadzony eksperyment potwierdził, iż rzeczywiste błędy wyznaczeń współrzędnych pozycji przez systemy nawigacji inercyjnej zachowują się zgodnie z założeniami teoretycznymi [1], tzn. błąd zliczenia oscyluje z okresem Schulera (ok. 84 min.) i rośnie w czasie. Ponadto wyniki prób wykazały, że błąd w wyznaczeniu pozycji przez MINS-1 nie przekroczył 1 mili morskiej po 12 godzinach pracy w trybie

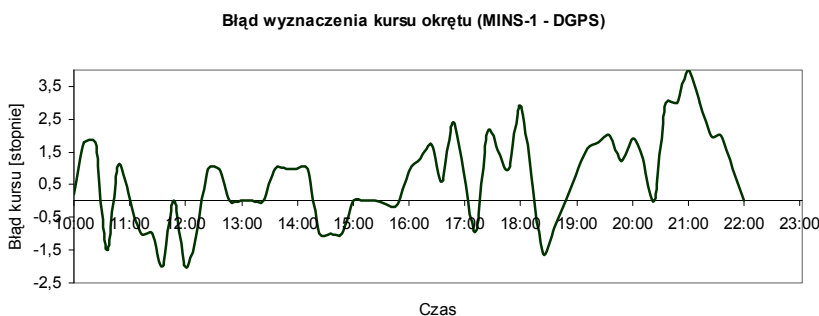
nawigacji autonomicznej, potwierdzając tym poprawność montażu i kalibracji urządzenia przez dostawcę systemu (przedstawiciel producenta gwarantował, że w tym czasie błąd nie przekroczy 2 mil morskich). Na marginesie wspomnieć należy, iż dokładności osiągane przez system MINS-1 nie do końca satysfakcjonowały załogę okrętu, która oczekiwała, że MINS-1 będzie zamiennikiem podwodnym systemu GPS. Argumentowali, że z porównywalną dokładnością pozycję wyznacza nawigator metodą zliczenia, wykorzystując informację o kursie i prędkości z klasycznych urządzeń nawigacyjnych (żyrokompasów i logu).

Dokładność wyznaczeń kursu i prędkości okrętu

Na poniższych wykresach zaprezentowano błędy wyznaczeń kursu i prędkości okrętu. Za błąd danej wartości przyjęto różnicę wskazań pomiędzy INS MINS-1 a wskazaniem odbiornika DGPS LF/MF. Założono, że nie występuje znos, co dało podstawy do porównywania kursu z kątem drogi nad dnem określanym przez system DGPS oraz prędkości po wodzie z prędkością względem dna określaną przez DGPS. Założenie to wydaje się być prawdopodobne, bowiem nie zaobserwowano składowej systematycznej w krzywych określających odpowiednie różnice porównywanych wielkości.

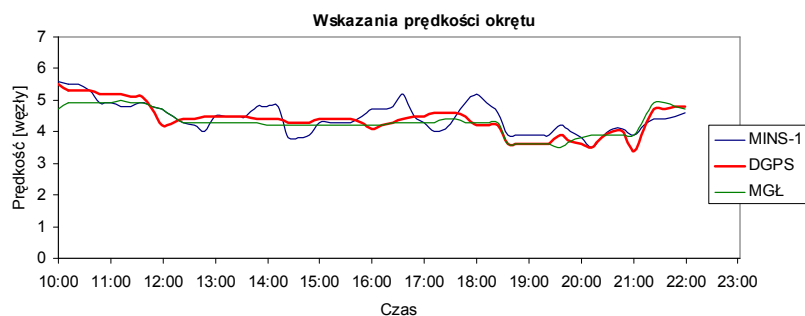


Rys. 7. Błędy wyznaczeń prędkości przez MINS-1 w funkcji czasu

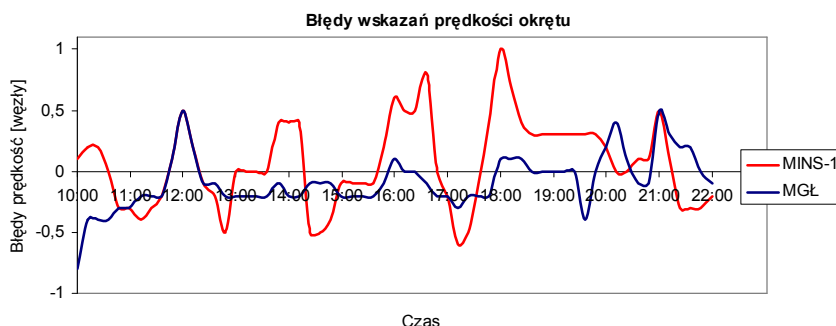


Rys. 8. Błędy wyznaczeń kursów przez MINS-1 w funkcji czasu

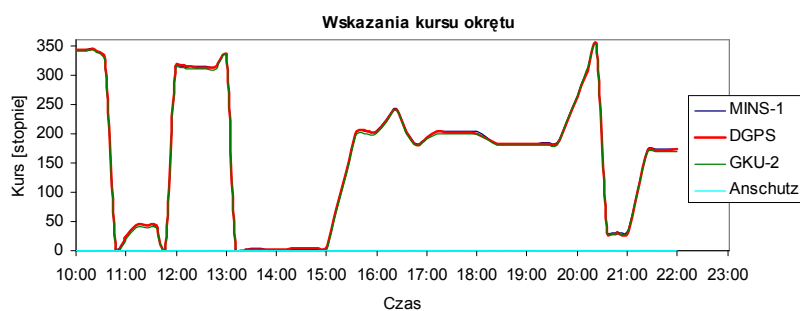
Z przedstawionych wykresów wynika, że różnica wskazań prędkości okrętu pomiędzy odbiornikiem DGPS LF/MF a MINS-1 nie przekraczała 1 węzła, natomiast kursu 3,5 stopnia. W celach porównawczych na poniższych wykresach przedstawiono wskazania prędkości wyznaczone przez MINS-1, odbiornik DGPS LF/MF i log hydrodynamiczny MGŁ. Na rysunkach 11. i 12. zaprezentowano natomiast wskazania kursu przez odbiornik DGPS LF/MF, żyrokompasy Anschütz i GKU-2 oraz INS MINS-1, a także ich błędy względem odbiornika DGPS LF/MF.



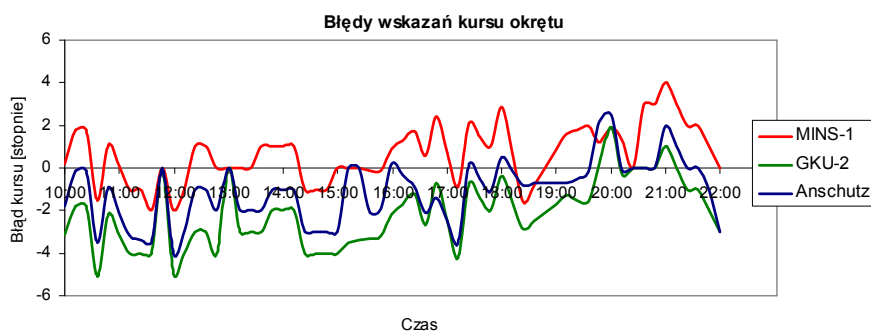
Rys. 9. Wskazania prędkości przez poszczególne urządzenia nawigacyjne



Rys. 10. Różnice prędkości względem odbiornika DGPS LF/MF w funkcji czasu



Rys. 11. Wskazania kursów przez poszczególne urządzenia nawigacyjne



Rys. 12. Różnice wskazań kursu względem odbiornika DGPS LF/MF

Z przedstawionych wykresów wynika, że kursy i prędkości wyznaczone przez MINS-1 w trybie nawigacji autonomicznej mają podobny poziom dokładności co wartości wskazywane przez odpowiednie urządzenia nawigacyjne. Potwierdza to również porównanie błędów pozycji zliczonych określonych przez MINS-1 i nawigatora okrętowego. W jednym i drugim przypadku nie przekroczyły one 1 mili morskiej w trakcie 12-godzinnego testu. Przy okazji eksperymentu zwrócono uwagę, że wskazania obu żyroskopasów zamontowanych na okręcie wykazują stałą różnicę względem wzorca (DGPS), a także MINS (co najmniej 1°), co może oznaczać potrzebę skorygowania ustawienia obu i powinno być uwzględniane w procesie prowadzenia nawigacji jako poprawka żyroskopasu.

WNIOSKI

Zasadniczym celem referowanych prób było sprawdzenie, czy system MINS-1 zamontowany na badanym okręcie został poprawnie zainstalowany i skalibrowany przez dostawcę. W trakcie testów obejmujących okres 12-godzinnej pracy w trybie autonomicznej nawigacji błędy wyznaczeń pozycji mieściły się w przyjętych granicach, a maksymalny błąd pozycji był o połowę mniejszy od założonej wartości. Poza zadaniem usługowym testy były okazją do zdobycia doświadczenia w zakresie eksploatacji współczesnych systemów inercyjnych opartych na żyroskopach laserowych RLG. Potwierdzono wiedzę literaturową na temat inercyjnych systemów nawigacyjnych co do zasad ogólnych, a ponadto stwierdzono, iż dokładności wyznaczeń przez MINS-1 kursów i prędkości są porównywalne z dokładnością klasycznych urządzeń nawigacyjnych (żyroskopasy i logi), co sprawia, że dokładności pozycji zliczonych przez INS i nawigatora są na podobnym poziomie. Zatem mimo tego, że system nie jest tak dokładny, jak życzyłaby sobie tego załoga okrętu, z powodzeniem może ułatwić i usprawnić prowadzenie nawigacji w położeniu podwodnym, odciążając nawigatora od żmudnego zliczenia drogi, szczególnie w trakcie manewrów.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Farrell J. A., Barth M., *The Global Positioning System & Inertial Navigation*, McGraw-Hill, 1999.
- [2] Specht C., *System Satelitarny GPS*, Bernardinum, Gdańsk 2007.
- [3] Yilin Z., *Vehicle Location and Navigation Systems*, Artech House, Inc. Boston, London 1997.

METHOD USED TO VERIFY INERTIAL NAVIGATION SYSTEM ABOARD SUBMARINE

ABSTRACT

The paper presents a method to be used to verify functioning of inertial navigation system aboard a submarine based on system MINS-1 as an example. Trials were carried out on surface and under water. DGPS LF/MF was used as a referential system, where corrections were received from a maritime referential station situated in Rozewie. The values of speed and course recorded with MINS-1 were compared with readings on a hydrodynamic log and gyrocompasses Anschütz and GKU-2.

Keywords:

inertial navigation, laser gyroscope, underwater navigation.

Recenzent kmdr dr hab. inż. Cezary Specht, prof. AMW