

**Andrzej Felski**  
**Akademia Marynarki Wojennej**

## **SPECYFIKA POMIARÓW KURSU KOMPASEM SATELITARNYM**

### **STRESZCZENIE**

Kompas satelitarny jest nowym urządzeniem nawigacyjnym, praktycznie dotychczas nie opisywanym szczegółowo w polskiej literaturze fachowej. W artykule dokonano przeglądu konstrukcji tego rodzaju kompasów, ich własności pomiarowych oraz praktycznych aspektów zastosowania na jednostkach pływających.

Słowa kluczowe:

kurs, kompas, kompas satelitarny.

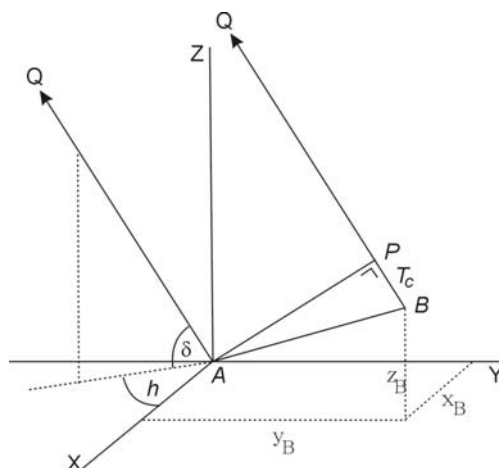
### **WSTĘP**

W ostatniej dekadzie w nawigacji morskiej coraz popularniejsze staje się urządzenie nazywane kompasem satelitarnym. Jest to rozbudowany wieloantenowy odbiornik nawigacyjnego systemu satelitarnego, który pozwala zmierzyć wybrane kąty przestrzennej orientacji swojego nosiciela. Podobne odbiorniki znajdują szerokie zastosowanie na maszynach roboczych sterowanych automatycznie, na przykład spsychaczach lub kombajnach rolniczych, nie wspominając o autonomicznych aparatach latających. W niniejszym artykule omówiono specyfikę zastosowania kompasu satelitarnego na jednostkach pływających.

Urządzenie to, pomimo przysłowiowego konserwatyzmu nawigatorów, przyjmuje się bardzo dobrze. Cechuje się niską ceną, brakiem wirujących części mechanicznych, i niemal natychmiastową gotowością do pracy.

Obecnie brak jest w literaturze polskiej materiałów dotyczących zasad działania tych konstrukcji, a także rozważań o specyfice ich eksploatacji. Niniejszy materiał ma częściowo lukę tę wypełnić.

Termin kompas radiowy funkcjonuje w nawigacji od kilku dziesięcioleci, przede wszystkim w nawigacji lotniczej, gdzie oznacza specyficzny radionamiernik, dzięki któremu określa się kąt poziomy pomiędzy kierunkiem na radiolatarnię i kierunkiem osi wzdłużnej statku powietrznego. Z kolei wykorzystanie promieniowania elektromagnetycznego generowanego przez obiekty kosmiczne datuje się od lat siedemdziesiątych XX wieku i odnosi do tzw. radiosekstantów, które nawet w warunkach zachmurzenia pozwalają zmierzyć kąt pionowy, przede wszystkim na Słońce. Do tej grupy urządzeń nawigacyjnych należy również zaliczyć kompas satelitarny, jakkolwiek źródłem promieniowania jest w tym przypadku sztuczny satelita Ziemi, a technologia pomiarów wywodzi się z technologii interferometrii bardzo długich baz (Very Long Base Interferometry — VLBI) stosowanej w geodezji i geofizyce od lat sześćdziesiątych XX wieku. Istota tej techniki pomiarowej sprowadza się do rejestracji tej samej fali radiowej w dwóch różnych miejscach, a następnie korelowania obu przebiegów. Na tej podstawie, po wykonaniu wielu niejednoczesnych pomiarów względem tego samego źródła, uwzględniając ruch obrotowy Ziemi, można wyznaczyć przestrzenny wektor łączący punkty pomiarowe. Idea takich pomiarów została przedstawiona na rysunku 1.



Rys. 1. Idea pomiarów metodą VLBI

Źródło: G. Bomford, *Geodesy*, Clarendon Press, Oxford 1980.

Dwie stacje odbiorcze  $A$  i  $B$  rozmieszczone są na Ziemi zwykle w odległości tysięcy kilometrów od siebie. Kierunki  $AQ$  i  $BQ$  określają kierunki na odległe źródło fal elektromagnetycznych, za które najczęściej przyjmuje się kwazary emitujące szerokie spektrum fal radiowych. Źródło fal radiowych jest na tyle daleko, że nie

mieści się na rysunku. Jego współrzędne to deklinacja  $\delta$  i kąt godzinny  $h$ . Wobec bardzo dużej odległości do źródła odległość  $AB$  można uznać za niewielką, co pozwala założyć, że odcinki  $AQ$  i  $BQ$  są równoległe. Na tej podstawie, pomijając wpływ refrakcji atmosferycznej, możemy uznać, że również krzywizna czoła fali radiowej docierającej do punktów  $A$  i  $B$  jest nieistotna. Przy takich założeniach moment, w którym czoło fali dociera do punktu  $B$ , jest opóźniony o czas  $T$ . Zakładając prędkość fali radiowej jako  $c$ , odcinek  $BP$  możemy wyrazić jako iloczyn  $Tc$ .

Rysunek 1. nie uwzględnia tego, że Ziemia, a wraz z nią odcinek  $AB$ , zmienia swoje położenie w przestrzeni. Kierunki  $AQ$  i  $BQ$  zmieniają się także. Ten fakt umożliwia wykonanie wielu pomiarów na to samo źródło, które przyjmuje się jako niezmiennie. W efekcie uzyskuje się wiele niejednoczesnych, dwuwymiarowych pomiarów, które pozwalają dokonywać wyznaczeń w przestrzeni. Jednym z częstszych zastosowań tej techniki w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku było tworzenie międzykontynentalnych sieci geodezyjnych, w których dokonywano wyznaczeń długości wektora łączącego obie stacje. Przykładowo, w jednym z eksperymentów na bazie o długości 3900 km uzyskano błąd pomiaru odległości rzędu 40 cm [2]. W latach osiemdziesiątych zastosowanie technologii satelitarnych ograniczyło wykorzystanie VLBI w geodezji, jednak nadal jest to bardzo ważne narzędzie badania ruchu obrotowego Ziemi.

Kwazar generuje niezwykle szerokie widmo częstotliwości, znacznie przekraczające zakres przenoszenia dostępnych urządzeń odbiorczych. Praktyka pomiarowa VLBI polega na rejestrowaniu kilkuminutowych sesji cechowanych dokładnymi znacznikami czasu na magnetofonie, a następnie, w trybie postprocesingowym, określaniu czasu korelacji wzajemnej dwóch zapisów pochodzących z punktów  $A$  i  $B$ . Zasadniczym czynnikiem przy rozpatrywaniu dokładności tej techniki staje się szerokość pasma przenoszenia układów rejestrujących sygnał radiowy oraz synchronizacja wzorców czasu, które przy tak dużych odległościach pomiędzy stacjami pomiarowymi muszą działać jako niezależne.

Tę samą zasadę do obserwacji sygnałów GPS dla pomiarów względnych w geodezji jeszcze w latach osiemdziesiątych XX wieku zaproponował wykorzystając Mac Doran [9]. Sygnały emitowane przez satelity GPS mają znacznie węższe spektrum niż naturalne źródła fal radiowych, są stabilniejsze i silniejsze, jednak są kodowane przez ciągi pseudolosowe. Wyższy w porównaniu z kwazarami poziom sygnału od satelitów sprawia, że urządzenia odbiorcze, zwłaszcza anteny, mogły być wielokrotnie mniejsze. O ile sygnały od kwazarów odbierane są z użyciem olbrzymich anten parabolicznych (niekiedy o średnicy kilkudziesięciu metrów), to sygnały od satelitów Mac Doran odbierał za pomocą płaskich kwadratowych anten o boku 50 cm. Z tej techniki wyrosły współczesne pomiary fazowe stosowane powszechnie w geodezji.

Zwróćmy uwagę na istotne różnice pomiędzy technikami fazowymi GPS i techniką VLBI. W stosunku do sygnałów naturalnych zalety sygnałów GPS nie ograniczają się tylko do węższego spektrum, stabilniejszej częstotliwości czy wyższego poziomu mocy. Przede wszystkim sygnał ten jest wytworzony przez aparaturę stworzoną przez człowieka. Wobec tego podobną aparaturę można zainstalować w odbiorniku, co pozwala wykonywać pomiary fazy nie poprzez korelowanie sygnałów traktowanych jako szum, lecz klasycznymi metodami interferometrycznymi, to jest poprzez nakładanie sygnału od satelity na sygnał wytworzony przez generator odbiornika. Pozwala to na bieżąco, w sposób cyfrowy, mierzyć zmiany fazy sygnału odbieranego od satelity. To prowadzi do współczesnych metod fazowych wykorzystania systemu GPS w geodezji.

W porównaniu z powszechnie w nawigacji stosowaną techniką pomiarów kodowych długość fali nośnej stosowanej w GPS to około 20 cm, podczas gdy długość kodu C/A jest równoważna fali o długości 293 m. Z tego wynika wielokrotnie wyższa dokładność pomiarów fazowych, jednak na drodze do uzyskania takich dokładności stoi problem punktu odniesienia, czyli znajomości momentu, w którym faza fali generowanej przez satelitę wynosi zero. O ile w dziedzinie czasu ten punkt odniesienia istnieje, bowiem informacje przekazywane w depeszy nawigacyjnej pozwalają odtworzyć czas GPS i ustalić „o której godzinie” został wysłany kolejny sygnał kodu, to w dziedzinie pomiarów fazowych jest to niemożliwe. Z tego powodu wszelkie pomiary fazowe są pomiarami względnymi, co oznacza, iż zawsze sprowadzają się do pomiaru wektora ukazującego położenie anteny jednego odbiornika względem anteny drugiego. W wariacie stosowanym powszechnie w geodezji jeden z odbiorników (bazowy) zlokalizowany jest w miejscu o znanych współrzędnych, a więc wektor względny pomiędzy dwoma odbiornikami wyznacza przyrost współrzędnych anteny odbiornika wyznaczanego.

## ZASADA POMIARU

We wszystkich współczesnych fazowych odbiornikach GPS pomiar odbywa się poprzez interferencję fali nośnej sygnału odebranego od satelity z sygnałem generowanym lokalnie, w odbiorniku. Ponieważ sygnał nadawany przez satelitę jest kodowany ciągami pseudolosowymi C/A oraz P, które powodują przeskok fazy fali nośnej, niezbędne jest ich usunięcie przed wykonaniem pomiarów. W przypadku posiadania informacji o naturze tych kodów, a przecież kod C/A jest znany, nie przedstawia to istotnych trudności, jednak w odniesieniu do kodu P dotyczy to wyłącznie

uprawnionych użytkowników. Okazuje się, że bez posiadania tej informacji można również odtworzyć czystą falę nośną odebraną od satelity, na przykład poprzez korelację wzajemną sygnałów odebranych na obu częstotliwościach lub poprzez podnoszenie takiego przebiegu do kwadratu (kwadratuowanie), czyli przemnożenie sygnału przez samego siebie.

Równanie opisujące zależności pomiędzy zmierzoną fazą sygnału i odległością do satelity ma następującą postać [5]:

$$\Phi = \rho + d\rho + \lambda N + cdt + cdT + lb - dlon + dTrop + \varepsilon, \quad (1)$$

gdzie:

- $\Phi$  — zmierzona faza fali nośnej;
- $\rho$  — prawdziwa (nieznana) odległość do satelity;
- $d\rho$  — błąd współrzędnej radialnej satelity;
- $\lambda$  — długość fali nośnej;
- $N$  — liczba pełnych długości fali na odcinku pomiędzy satelitą i anteną odbiornika;
- $cdt$  — poprawka zegara satelity;
- $cdT$  — poprawka zegara odbiornika;
- $lb$  — opóźnienie wywołane długością przewodu antenowego;
- $dTrop$  — opóźnienie wprowadzone przez troposferę;
- $dlon$  — opóźnienie wprowadzone przez jonosferę;
- $\varepsilon$  — błąd wywołany szumami odbiornika.

Zasadniczą trudność w takim procesie pomiarowym sprawia ustalenie liczby  $N$ , która wyznacza liczbę pełnych okresów fali nośnej mieszczących się na trasie pomiędzy satelitą i anteną. W sytuacjach podobnych do tej, jaka wynika z zależności (1), tj. występowania wielu zakłóceń o losowej naturze, skuteczne jest stosowanie metod różnicowych. Polegają one na określaniu różnicy pomiędzy wartościami zmierzonymi, na przykład przez dwa odbiorniki znajdujące się w podobnym środowisku. Zwróćmy uwagę, że w przypadku gdy względnie blisko siebie będą znajdowały się dwa odbiorniki odbierające sygnały od tego samego satelity, to odejmując wyniki pomiarów, uzyskamy efekt redukcji błędów wywołanych jonosferą, troposferą oraz poprawką na zegar satelity. Metoda ta w technologii GPS nazywana jest pojedynczą różnicą faz, a odpowiednie równanie ma postać (2).

$$\Delta\Phi = \Delta\rho + \Delta d\rho + \lambda\Delta N - c\Delta dT + \Delta lb + \Delta\varepsilon, \quad (2)$$

gdzie

- $\Delta$  — różnica odpowiednich wielkości pomierzonych w obu odbiornikach.

W kompasie satelitarnym zagadnienie upraszcza się dodatkowo z tego względu, że mamy do czynienia nie z dwoma odrębnymi odbiornikami, lecz jednym wielokanałowym pracującym z pojedynczym oscylatorem. Wobec tego błąd zegara odbiornika także się redukuje. Podobnie możemy potraktować błąd wynikający z różnicy długości kabli antenowych, które na etapie produkcji należy tak dopasować, aby błąd wywołany różnicą ich długości stał się pomijalny. Co więcej, jeśli anteny odbiorcze będą oddalone od siebie o znaną wielokrotność długości fali nośnej, to również problem wartości zmiennej  $N$  da się rozwiązać analitycznie i ostatecznie równanie (2) przyjmie prostą postać:

$$\Delta\Phi = \Delta\rho + \Delta d\rho + \Delta\varepsilon. \quad (3)$$

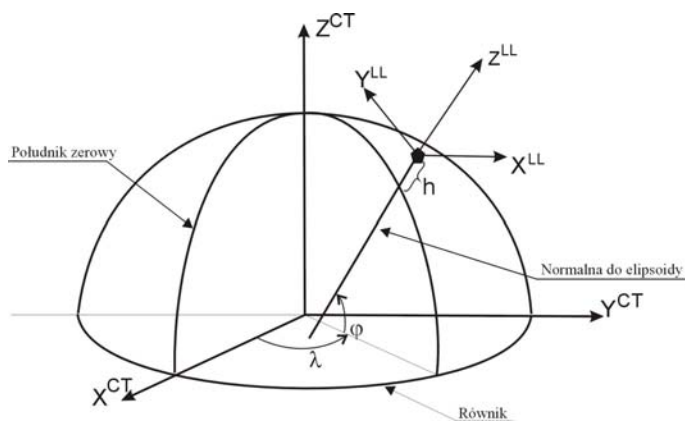
### PARAMETRY ORIENTACJI PRZESTRZENNEJ

Omawiając zagadnienie orientacji przestrzennej obiektu nawigacji nie można pominąć zależności pomiędzy układami współrzędnych, w jakich pomiary są wykonywane i do jakich mają być odniesione. W tym kontekście należy rozważyć co najmniej trzy układy współrzędnych:

- konwencjonalny ziemski układ współrzędnych geodezyjnych, CT (Conventional Terrestrial);
- lokalny układ współrzędnych, LL (Local Level);
- układ współrzędnych związanych z obiektem, AB.

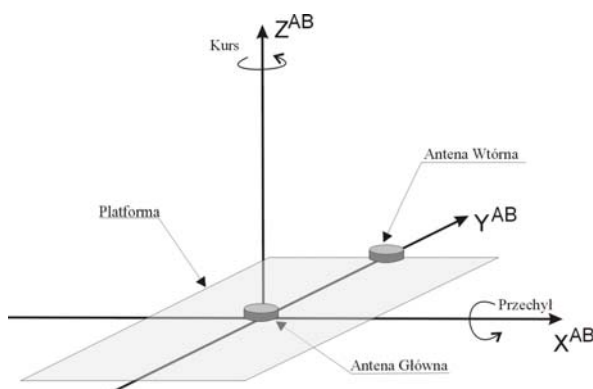
W nawigacji jako układ CT przyjmuje się układ współrzędnych geograficznych (geodezyjnych) powszechnie stosowany do opisu współrzędnych związanych z Ziemią. Definiowany jest on za pośrednictwem elipsoidy obrotowej odpowiednio zorientowanej względem Ziemi i pozwala opisać nie tylko położenie obiektu poprzez współrzędne  $(\varphi, \lambda, h)$ , ale także orientację kątową obiektu względem Ziemi.

Do opisanie orientacji okrętu (lub innego obiektu nawigacji) względem Ziemi bardziej czytelnym dla człowieka okazuje się lokalny (LL) ziemski układ odniesienia, którego początek znajduje się na powierzchni Ziemi i pokrywa się ze współrzędnymi obserwatora wyrażonymi w układzie współrzędnych CT. Oś pionowa układu LL pokrywa się z kierunkiem lokalnego pionu, natomiast osie horyzontalne teoretycznie mogą być skierowane w dowolnym kierunku, na przykład zgodnie z kierunkiem zaplanowanej trasy (układ ortodromiczny), jednak najpowszechniej stosuje się orientację jednej z osi zgodnie z kierunkiem południka.



Rys. 2. Zależności pomiędzy konwencjonalnym układem ziemskim i układem lokalnym

Układ współrzędnych związanych z obiektem jest zwykle definiowany przez użytkownika, zależnie od rodzaju platformy, której orientacja ma być określana. Korzystnie jest też przyjąć upraszczające założenie, że system antenowy będzie pokrywał się z systemem AB. W odniesieniu do okrętów najlepiej przyjąć, że oś  $Y^{AB}$  pokrywa się z diametralną okrętu i leży w płaszczyźnie pokładu, oś  $X^{AB}$  leży w tejże płaszczyźnie, uzupełniając prawoskrętny system współrzędnych, a oś  $Z^{AB}$  skierowana jest w górę. Współrzędne obrazujące orientację okrętu i jednocześnie układu antenowego będą wielkościami kątowymi obrazującymi kurs jednostki oraz jej przechyły. Zwróćmy uwagę, iż w konsekwencji przyjętych założeń odnośnie poszczególnych układów współrzędnych kurs będziemy mierzyli w kierunku odwrotnym niż przyjęto powszechnie w nawigacji. Jest to jednak trudność formalna, bowiem wynik wystarczy odejmować od wartości 360.



Rys. 3. Układ współrzędnych związanych z obiektem i usytuowanie anten

Należy pamiętać, że zestaw dwóch anten daje podstawy do określenia tylko dwóch kątów obrotu, w osiach, w których możliwe jest pomierzenie różnicy odległości. Dokonanie pomiarów kąta obrotu wokół osi, w której leży baza AB, jest niemożliwe.

Trzeba również podkreślić, że system antenowy zazwyczaj tworzy trwale połączone ze sobą elementy, a więc formalnie jest odrębnym systemem współrzędnych mocowanym do okrętu i może być przesunięty czy skręcony względem układu współrzędnych związanych z okrętem. Założymy jednak, że ten problem nie występuje wobec poprawnej instalacji anten na okręcie.

Usytuowanie układu współrzędnych związanego z okrętem względem układu lokalnego opisujemy następującą zależnością:

$$\mathbf{r}^{\text{AB}} = \mathbf{R}_{\text{LL}}^{\text{AB}} \cdot \mathbf{r}^{\text{LL}}, \quad (4)$$

gdzie:

$\mathbf{r}^{\text{AB}}$  — wektor bazy wyrażony w układzie współrzędnych AB;

$\mathbf{R}_{\text{LL}}^{\text{AB}}$  — macierz obrotu transformująca wektor z układu LL do układu AB;

$\mathbf{r}^{\text{LL}}$  — wektor współrzędnych wyrażony w układzie współrzędnych LL.

Jeżeli przyjmiemy, że współrzędne wektora łączącego dwa punkty na powierzchni Ziemi w układzie CT opisujemy wektorem  $\mathbf{r}^{\text{CT}}$ , to transformacja pomiędzy układami może być opisana równaniem:

$$\mathbf{r}^{\text{CT}} = \mathbf{R}_{\text{LL}}^{\text{CT}} \cdot \mathbf{r}^{\text{LL}} + \mathbf{r}^{\text{CT}_0}, \quad (5)$$

gdzie:

$\mathbf{r}^{\text{CT}}$  — wektor bazy wyrażony w układzie CT;

$\mathbf{R}_{\text{LL}}^{\text{CT}}$  — macierz skręcenia wzajemnego obu układów;

$\mathbf{r}^{\text{LL}}$  — wektor wyrażony w układzie współrzędnych LL;

$\mathbf{r}^{\text{CT}_0}$  — wektor przesunięcia układu LL względem CT.

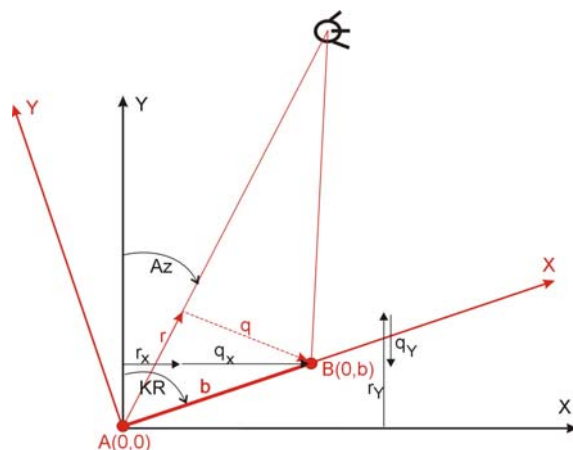
Wektor  $\mathbf{r}^{\text{CT}}$  obrazuje położenie jednej z anten rozpatrywanego systemu względem drugiej. Macierz obrotu  $\mathbf{R}_{\text{LL}}^{\text{CT}}$  może mieć postać następującą:

$$\mathbf{R}_{\text{LL}}^{\text{CT}} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & -\cos \lambda \sin \varphi & \cos \lambda \cos \varphi \\ \cos \lambda & -\sin \lambda \sin \varphi & \sin \lambda \cos \varphi \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \end{bmatrix}. \quad (6)$$



Zauważmy, iż mamy wszystkie informacje niezbędne do wykonania powyższej transformacji, jeżeli znamy współrzędne jednej z anten w układzie współrzędnych CT. Oznacza to jednocześnie znajomość wektora  $\mathbf{r}^{CT_0}$ , albowiem jest to położenie tej anteny względem początku układu CT.

Załóżmy, że zestaw dwóch anten jest rozmieszczony jak na rysunku 3. Antena główna stanowi początek układu współrzędnych, a współrzędne anteny wtórnej opisane są wektorem  $\mathbf{b}(0, L, 0)^T$ , gdzie  $L$  oznacza odległość pomiędzy antenami (rys. 4.).



Rys. 4. Schemat zależności pomiędzy wielkościami mierzonymi i wyliczanymi

Dla uproszczenia założmy, że zagadnienie dotyczy przestrzeni dwuwymiarowej (powierzchni rysunku) i sprowadza się do określenia wartości kąta  $KR$ . Na powyższym rysunku wielkościami znanymi są długość bazy  $b$  oraz zmierzony wektor różnic odległości anten do satelity  $r$ . Znamy również, pomierzone metodami kodowymi, współrzędne anteny  $A$ , wobec czego znamy wartość  $Az$  azymutu na satelitę. Znając wartości  $b$  i  $r$ , nietrudno obliczyć wartość  $q$ . Z kolei znając wartości  $r$  i  $q$  oraz  $Az$ , można obliczyć składowe wektora  $r$  w osiach lokalnego układu współrzędnych  $r_x, r_y, q_x, q_y$ , które dają kombinację (rzuty) bazy  $AB$  na osie lokalnego układu współrzędnych, a więc dają podstawy do obliczenia  $KR$ . Zauważmy, że wartość  $KR$  jest wyznaczana na podstawie proporcji stałej  $b$  oraz pomierzonej wartości  $r$  i sumowana z  $Az$ . Ponieważ  $b$  wynosi zazwyczaj 50–100 cm, a wartość  $r$  jest mierzona z błędem kilku milimetrów, to o błędzie  $KR$  decyduje w istocie znajomość wartości  $Az$ . W dostępnych kompasach satelitarnych błąd ten wynosi  $1^\circ$ , a więc podobnie jak w tradycyjnych kompasach żyroskopowych i magnetycznych.

Oczywiście w warunkach rzeczywistych zadanie jest bardziej skomplikowane, bowiem odbywa się w przestrzeni, a nie na płaszczyźnie i powyższy szkic ma tylko znaczenie pogładowe. Jednak w zastosowaniach praktycznych możliwe jest wykonanie pomiarów różnic  $r$  do kilku satelitów, co pozwala wykorzystać szeroko stosowane metody estymacji.

Powszechnie dostępne kompasy satelitarne stanowią specyficzny przypadek stosowanej w geodezji techniki pomiarowej zwanej pomiarami kinematycznymi czasu rzeczywistego (Real Time Kinematic — RTK). W tym wariancie wykorzystania systemu GPS niezbędne jest posiadanie dwóch odbiorników oraz połączenia radiowego pomiędzy nimi. Jest to wariant różnicowego wykorzystania systemu GPS, w którym jeden z odbiorników, tzw. stacja bazowa, umieszczony w punkcie o dokładnie wyznaczonych współrzędnych, stanowi punkt odniesienia dla drugiego, ruchomego, zwanego powszechnie *roverem*. Stacja bazowa, wykorzystując to, iż znajduje się na punkcie o znanych współrzędnych, może określić część błędów. Transmitując do odbiornika ruchomego odpowiednie informacje, umożliwia wyeliminowanie części błędów pomiarowych występujących w odbiorniku ruchomym. Odbywa się to w czasie rzeczywistym drogą radiową, zwykle w zasięgu nieprzekraczającym 10 km.

Na przełomie wieków firma Trimble zaproponowała modyfikację tego rozwiązania, które jest przydatne w sytuacji, gdy współrzędne anten w układzie współrzędnych CT nie muszą być wyznaczone z dużą dokładnością, natomiast istotne jest dokładne wyznaczenie wektora względnego położenia anten [10]. Technika ta została nazwana techniką ruchomej bazy (Moving Base Technique) i poza klasycznym zestawem RTK jest dostępna również w postaci specyficznego odbiornika wyposażonego w dwie anteny. W pewnym sensie odbiornik składa się z dwóch odbiorników, z których jeden odgrywa rolę odbiornika bazowego, a drugi *rovera*, zabudowanych jako jedno urządzenie wyposażone w dwie anteny. Przykładem zastosowań Moving Base RTK może być sytuacja, gdy zachodzi konieczność dynamicznego utrzymywania pozycji względem innego okrętu w ruchu. Może być również zastosowana do określania kursu.

W technice ruchomej bazy RTK pozycję anteny bazowej wyznacza się ze standardową dokładnością uzyskiwaną w wariancie pomiarów kodowych, a więc z dokładnością metrów, natomiast technikami fazowymi (RTK) z dużą dokładnością wyznacza się wektor łączący obie anteny. Dodajmy, że w odróżnieniu od typowego wariantu RTK w przypadku kompasu satelitarnego nie jest konieczna transmisja radiowa, bowiem pomiary odbywają się w tym samym urządzeniu.

## PRAKTYKA WYKORZYSTANIA KOMPASU SATELITARNEGO

Obecnie dostępnych jest kilka kompasów satelitarnych różniących się rozwiązaniami konstrukcyjnymi (tab. 1.). Wspólną ich cechą jest specyficzna antena składająca się z dwóch, niekiedy trzech anten, których przykłady przedstawia rysunek 5.

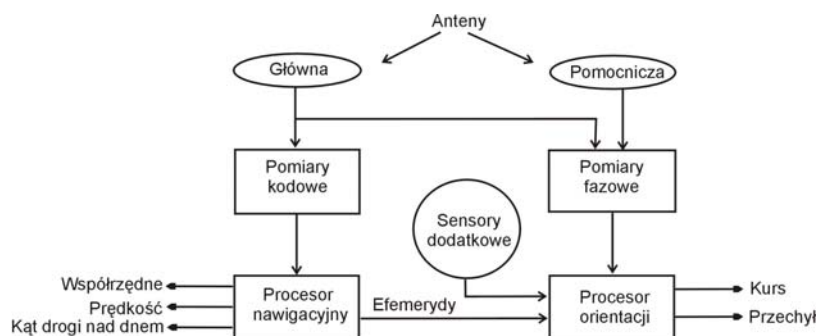
Tabela 1. Podstawowe dane techniczne wybranych kompasów satelitarnych

	CRESCENT Vector 100	FURUNO SC-50	SPERRY Navistar
Wymiary (mm)	600 x 160 x 180		85 x 238 x 134 (wyświetlacz) 378 x 286 x 92 (procesor) 776 x 98 x 144 (antena)
Waga (kg)	Antena wraz procesorem — 1,5	Antena — 4 Procesor — 4,2 Wyświetlacz — 0,5	Antena — 2 Procesor — 4,5 Wyświetlacz — 1
Zasilanie	10–36 VDC 5,0 W	12–24 VDC 15 W	9–36 VDC 12 W
Błąd pozycji w płaszczyźnie horyzontalnej	0,6 m (95%) (DGPS) 2,5 m (95%) (GPS)	5 m (95%) (DGPS) 10 m (95%) (GPS)	5 m (95%) (DGPS) 10 m (95%) (GPS)
Błąd kursu	0,3° (RMS)	1,0° (RMS)	0,5° (RMS)
Prędkość nadążania	90°/s	45°/s	25°/s
Czas do pierwszego pomiaru	1 min	3 min	4 min
Częstość wyznaczeń	20 Hz		10 Hz (pozycja) 50 Hz (kurs)
Typowy zestaw	Moduł anteny z wbudowanym procesorem, brak odrębnego wyświetlacza	Moduł anteny, moduł procesora, wyświetlacz	Moduł anteny, moduł procesora, wyświetlacz

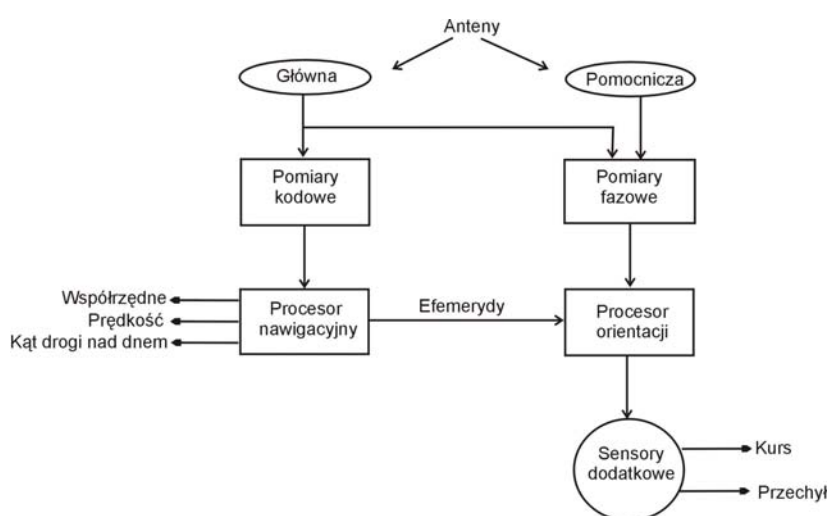


Rys. 5. Przykłady anten kompasów satelitarnych

Najistotniejsza różnica kryje się jednak w układach i algorytmach pomiarowych. Można wyróżnić dwie zasadnicze odmiany kompasów satelitarnych, przedstawione na rysunkach 6. i 7.



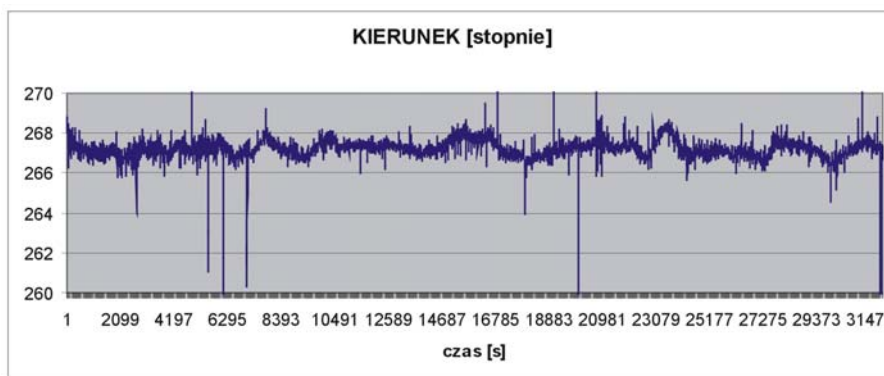
Rys. 6. Schemat I kompasu satelitarnego



Rys. 7. Schemat II kompasu satelitarnego

Oba rozwiązania zawierają w istocie odbiornik nawigacyjny GPS obejmujący tor pomiarów kodowych z anteną, układem pomiarów kodowych i procesorem nawigacyjnym oraz dodatkowy tor pomiarów fazowych współpracujący z dwiema antenami i procesorem orientacji wykorzystującym efemerydy wypracowane w pierwszym torze. Oba rozwiązania obejmują też dodatkowe sensory wspomagające pomiary kątów w warunkach zakłóceń lub zaników sygnałów GPS. Zazwyczaj w charakterze tych sensorów stosuje się różne zestawienia żyroskopów prędkościowych wykonanych

na układach elektronicznych kategorii MEMS, akcelerometrów i sensorów pola magnetycznego (fluxgate). Zasadnicza różnica pomiędzy nimi sprowadza się do usytuowania tych sensorów w systemie. W wariancie pierwszym sensory mają wspomagać fazowy tor pomiarowy w przypadku trudności z pomiarem. Skutkuje to pojawianiem się krótkookresowych, skokowych zmian wartości wyjściowych. Przykład zmian wartości kursu na postoju statku określanych takim urządzeniem przedstawia rysunek 8.



Rys. 8. Wskazania kursu na postoju mierzone kompasem satelitarnym typu I

W przypadku rozwiązania typu II w istocie użytkownik odbiera wartość kursu ze swojego kompasu żyroskopowego, który jest podstrajany za pomocą kompasu satelitarnego. Zaletą tego rozwiązania polega na radykalnie lepszej stabilności wskazań, w których nie występują wspomniane skoki wartości kursu. Rysunek 8. pozwala także zaobserwować typowy charakter błędów występujących w obu rodzajach kompasu. Są to typowe dla każdego urządzenia elektronicznego niewielkie szumy pomiarowe o wysokiej częstotliwości, których amplituda waha się na poziomie minut kątowych, a więc w praktyce okrętowej może być pominięta. Występuje jednak i drugi rodzaj błędów, o okresie licznym godzinami i amplitudzie rzędu 1°. Ten rodzaj błędów zdaje się być skorelowany z układem konstelacji satelitarnej, jednak zagadnienie wymaga dalszych badań.

## PODSUMOWANIE

Kompasy satelitarne to nazwa żargonowa, bowiem zgodnie z rezolucjami IMO urządzenia takie klasyfikuje się jako „Heading Transmitting Devices”, czyli urządzenia transmitujące kurs (Rezolucje MSC.116(73), A.424(XI) lub A.821(19)).

Konsekwencją jest dopuszczalność stosowania ich tylko w charakterze urządzeń pomocniczych. Zgodnie z konwencją SOLAS nie mogą one zastąpić kompasu magnetycznego ani żyroskopowego, jakkolwiek konstruowano je jako tanią alternatywę dla kosztownych żyrokompasów mechanicznych lub optycznych (RLG lub FOG). W kontekście skokowych zmian kursu wskazywanego przez kompas typu I stanowisko takie zdaje się być zrozumiałe. Trudno wyobrazić sobie, że autopilot sterowany takim kompasem spowoduje gwałtowną zmianę kursu o kilkadziesiąt stopni na kilkanaście sekund. Jednak wariant II nie ma tego ograniczenia i z powodzeniem mógłby występować w charakterze kompasu.

Na dzień dzisiejszy kompasy satelitarne coraz powszechniej stosowane są jako źródło informacji o orientacji kątowej okrętu (również przechyłach) w niemal wszystkich urządzeniach wymagających takiej informacji (radary, ECDIS, VDR, AIS, stabilizacja anten łączności satelitarnej itp.). Ich niezaprzeczalnym atutem jest niska cena, brak jakichkolwiek wymagań serwisowych, bardzo mały pobór prądu, brak błędów kursu charakterystycznych dla kompasu magnetycznego lub żyroskopowego i natychmiastowa gotowość. Wydaje się, że jako przyczynę szybkiej popularyzacji tych urządzeń należy też wskazać to, iż użytkownicy traktują je jako swoisty odbiornik GPS, z którym nawigatorzy zdążyli się już oswoić i traktują go jako oczywistość.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Axelrad P., Comp C. J., Mac Doran P. F., *Use of SNR for multipath error correction in GPS differential phase measurements: methodology and experimental results*, Proceedings of ION-GPS 94, Salt Lake City 1994.
- [2] Bomford G., *Geodesy*, Clarendon Press, Oxford 1980.
- [3] Felski A., Nowak A., *Pierwsze doświadczenia z eksploatacji kompasu satelitarnego*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2008, nr 4, s. 37–44.
- [4] Grass van, B. M., *GPS Interferometric Attitude and Heading Determination: Initial Flight Test Results*, ‘Navigation’, 1991, Vol. 38, No 4, pp. 297–316.
- [5] Hofmann-Wellenhof B. and others, *GNSS — Global Navigation Satellite Systems*, Springer Verlag, Wien 2008.
- [6] Jiun H. K., *Determining Heading and Pitch Using a Single Difference GPS/GLONASS Approach*, The University of Calgary, 1999.
- [7] Jwo D-J., Pai Ch-F., *Incorporation of Neural Network State Estimator for GPS Attitude Determination*, ‘The Journal of Navigation’, 2004, Vol. 57, No 1, pp. 117–134.

- [8] Lu G., *Development of a GPS Multi-Antenna System for Attitude Determination*, The University of Calgary, 1995.
- [9] Mac Doran P. F. and others, *Codeless GPS Systems for Positioning of Offshore Platforms and 3D Seismic Surveys*, 'Navigation', 1984, Vol. 31, No 2, pp. 57–69.
- [10] O’Meagher B., *New Techniques in Relative RTK GPS Positioning Between Dynamic Platforms*, Dynamic Positioning Conference Marine Technology Society, 2001.
- [11] Schleppe J. B., *A Real-Time Attitude System*, The University of Calgary, 1996.

## **CHARACTERISTICS OF FIXING COURSE WITH SATELLITE COMPASS**

### **ABSTRACT**

A satellite compass is a new navigational aid which so far has not been dealt with in detail in the Polish professional publications. The paper makes a review of this kind of compass, their measuring properties and practical aspects of use aboard floating vessels.

Keywords:

course, compass, satellite compass.

Recenzent dr hab. inż. Jacek Januszewski, prof. AM Gdynia