

Andrzej Felski, Aleksander Nowak
Akademia Marynarki Wojennej

PIERWSZE DOŚWIADCZENIA Z EKSPLOATACJI KOMPASU SATELITARNEGO

STRESZCZENIE

W minionych kilku latach na jednostkach pływających coraz częściej dostępne są tzw. kompasy satelitarne. Jest to specyficzny wieloantenowy odbiornik systemu satelitarnego, który poza standardowymi funkcjami umożliwia określanie kątów orientacji jednostki, co w odniesieniu do najprostszyc konstrukcji oznacza w szczególności określanie kursu. W referacie omówiono konstrukcję takiego urządzenia oraz pierwsze spostrzeżenia odnośnie jego własności.

ISTOTA KOMPASU SATELITARNEGO

Technologie satelitarne jeszcze u zarania systemu GPS, bo w latach siedemdziesiątych XX w., przyswoiły technikę pomiarów geodezyjno-astronomicznych zwaną VLBI (*Very Long Base Integrity*). Jej istota sprowadza się do odbioru w dwóch odległych miejscach fali radiowej emitowanej przez jedno źródło. Rozmieszczenie odbiorników powoduje, że faza rejestrowanego przebiegu jest odmienna, a to pozwala określić wartości łączącego je wektora [2]. Do tego samego sprowadza się technologia wykorzystania systemu GPS w geodezji. W tym przypadku jeden odbiornik, bazowy, stawia się na pozycji o znanych współrzędnych, a położenie drugiego określane jest poprzez ustalenie wektora łączącego oba punkty. Kompas satelitarny jest modyfikacją tej idei, jednak w tym przypadku zakłada się, że precyzyjnie określona jest odległość pomiędzy antenami, a pomiary fazy pozwalają określić kierunek tego wektora. Wspólną cechą wszystkich kompasów satelitarnych jest zestaw co najmniej dwóch anten, zazwyczaj zabudowanych jako jeden element.



Rys. 1. Przykłady anten kompasów satelitarnych [5, 6]

Badania przeprowadzono na produkcie typu Crescent Vector 100 firmy Hemisphere będącej fragmentem kanadyjskiej firmy CSI, która wcześniej wykupiła jednego z pierwszych producentów odbiorników GPS — Magnavoxa. W ofercie tego koncernu już w 2005 roku pojawił się kompas satelitarny MX 575 DGPS Compass, który uzyskał certyfikat US Coast Guard potwierdzający spełnianie wymogów konwencji SOLAS, jako rezerwowe źródło informacji o kursie oraz źródło informacji o kursie dla urządzenia AIS [www.marinelink.com, 8 czerwca 2005]. Modyfikacją urządzenia MX 575 jest linia Crescent Vector.

Wszystkie kompas satelitarne są w istocie wieloantenowymi odbiornikami GPS, które poza standardową informacją dostępną w typowym odbiorniku dostarczają informację o orientacji anten względem wybranego kierunku odniesienia. Rozwiązania takie znajdują obecnie zastosowanie nie tylko na morzu, ale także w lotnictwie i geodezji przemysłowej.

Crescent Vector 100 jest urządzeniem opartym na specyficznym rozwiązaniu układowym (układzie scalonym) tej firmy będącym kompletnym odbiornikiem GPS uzupełnionym o moduł pomiarów fazowych. Jest to odbiornik pracujący na częstotliwości L1 z kodem C/A oraz analizą fali nośnej. Ma dwa razy po 12 kanałów śledzonych równolegle (w wariacie pracy WAAS/EGNOS dwa razy po 10 kanałów) [1]. W efekcie jest to zatem typowy odbiornik GPS, który spełnia jednocześnie funkcję pomiaru kąta w płaszczyźnie poziomej dokonywanego poprzez pomiar różnicy fazy fali nośnej. Konstrukcyjnie stanowi pojedyncze urządzenie, które w zamysle konstruktorów nie ma być samodzielnym urządzeniem nawigacyjnym, lecz sensorem dla innych, wobec czego wymaga tylko podłączenia zasilania oraz przewodu do transmisji danych. Komunikacja odbywa się za pośrednictwem czterech wyjść szeregowych (2xRS-232 i 2xRS-422) przy prędkości transmisji w przedziale od 4800 do 38400 bodów z użyciem protokołów NMEA 0183 albo firmowego Crescent binary [1].

Vector 100 jest zbudowany przede wszystkim z myślą o użyciu na rynku użytkowników morskich, jednak możliwe jest jego użycie w innych obszarach, na przykład do sterowania maszynami roboczymi albo rolniczymi. Podobne urządzenie, oferowane przez firmę Sperry (Navistar Satellite Compass), pomyślane jest jako kompletne urządzenie nawigacyjne i ma element sterowania wraz z wyświetlaczem, a także możliwość podłączenia dodatkowych repetytorów kursu, zarówno cyfrowych, jak i analogowych.

Zastosowana w urządzeniu Vector 100 unikalna technologia pomiarowa Crescent® obsługuje wielokrotny pomiar końcowego zbocza sygnału radiowego, co umożliwia doskonałą korelację pomiarów z dwóch rozdzielnych anten dla precyzyjnego określenia kierunku. Dzięki niezwykle precyzyjnemu porównaniu faz dwóch sygnałów radiowych użytkownik otrzymuje informację o wysokiej dokładności, a także

stabilności. Odległość środków fazowych anten GPS umieszczonych wewnątrz urządzenia Crescent V100 wynosi 50 centymetrów, co pozwala osiągać średni błąd pomiaru kierunku na poziomie 0.30° (RMS) z częstotliwością nawet do 20 Hz. Domyślne ustawienia powodują jego pracę w wariancie różnicowym. W trakcie uruchamiania w pierwszej kolejności przeszukuje częstotliwości stosowane w systemach SBAS (systemy EGNOS, WAAS, MSAS lub podobne). Jeśli sygnały te nie są dostępne, może współpracować ze stacjami DGPS z zakresu fal średnich lub własną stacją bazową V110 [1]. W ostateczności, jeśli poprawki różnicowe nie są dostępne, pracuje w wersji czystego GPS. Skutkuje to wyłącznie zmniejszeniem dokładności wyznaczeń pozycji i nie ma żadnego wpływu na wyznaczenia kierunku, albowiem proces ten odbywa się i tak w oparciu o sygnały transmitowane przez satelity na częstotliwości L1.



Rys. 2. Wyświetlacz wraz z układami sterowania oraz procesor kompasu Navistar [5]

Tabela 1. Podstawowe dane techniczne typowych kompasów satelitarnych [1, 5]

	Crescent Vector 100	Navistar Satellite Compass
Wymiary [mm]	60 cm x 16 cm x 18 cm	Wyświetlacz 134x238x85 Procesor 92x286x378 Antena 144x776x98
Waga [kg]	1.50 kg	Wyświetlacz 1 Procesor 4,5 Antena 1,9
Zasilanie	10 to 36 VDC 5.0 W	9-36VDC 12W
Błąd w płaszczyźnie horyzontalnej	< 0.6 m (95%) (DGPS) < 2.5 m (95%) GPS, SA wyłączone	Position 5m 95% (DGPS) 10 m 95% (GPS)
Błąd kursu	< 0.30° (RMS)	0.5° (pomiar statyczny)
Błąd ROT		0.5°
Prędkość nadążania	90°/s	25°/s
Błąd pomiaru przechyłów	< 1° RMS	
Czas do pierwszego pomiaru	< 60 s	<4 min

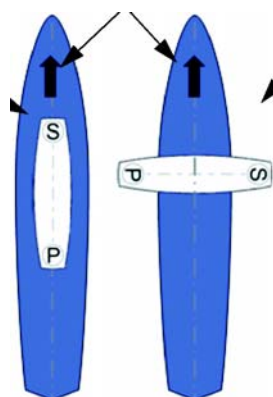
Crescent V100 wykorzystuje zarówno kod C/A transmitowany na częstotliwości L1 systemu GPS, jak i fazę fali nośnej do obliczenia położenia anteny pomocniczej względem zasadniczej z błędem poniżej centymetra. Jak wspomniano na wstępie, jest to realizowane w oparciu o technikę pomiarów RTK-GPS, jednak w stosunku do rozwiązań stosowanych w geodezji należy zauważyć, iż dzieje się to w warunkach poruszania się obu anten, również odbiornika bazowego. Technologia RTK, nie wnikając w szczegóły, jest bardzo skomplikowanym i wyrafinowanym procesem pomiarowym i wymaga analizy znacznej liczby możliwych rozwiązań wynikających z kombinacji całkowitych wielokrotności długości fali nośnej L1 odbieranej od wielu satelitów, co powoduje wieloznaczność rozwiązania (ambiguity). W rozwiązaniu zastosowanym w Crescent V100 bierze się pod uwagę ograniczoną liczbę potencjalnych rozwiązań, ponieważ znana jest stała odległość pomiędzy antenami (50 cm) zainstalowanymi wewnątrz obudowy. Rozwiązanie, w którym odległość pomiędzy antenami jest stała, stosuje się najczęściej, jednak należy wspomnieć, iż znane są również rozwiązania, w których odległość pomiędzy antenami może być zmieniana na etapie instalacji urządzenia. W takich przypadkach rozwiązanie tego zagadnienia wymaga specjalnych procedur w trakcie pierwszego uruchomienia, chociaż w trakcie rutynowej eksploatacji również nie występuje.

Dokładność określenia wektora łączącego obie anteny to jedna sprawa, natomiast w warunkach eksploatacji odbiornika GPS na dowolnym obiekcie pojawia się zawsze pytanie o możliwość przesłaniania satelitów i wynikające z tego przerwy w serwisie [3]. Tego samego problemu należy oczekiwać w przypadku kompasu

satelitarnego. Ponieważ doświadczenie dowodzi, iż przerwy te mogą być mierzone w minutach, rutynowo wspomaga się kompasy satelitarne tanim, mało stabilnym jednoosiowym żyroskopem oraz akcelerometrem, które konserwują w tym czasie informacje o kursie i zapewniają skrócenie czasu reakwizycji satelitów. Żyroskop jest także wykorzystywany jako źródło informacji wspomagającej filtrowanie wyznaczeń kierunku. Powszechnie stosuje się w tym celu układy zbudowane w technologii MEMS (*Micro Electronics Mechanized Systems*) — niewielkie układy scalone niewymagające dużych mocy. Integracja tych elementów stwarza dodatkową szansę pomiaru prędkości zwrotu oraz kołysań w jednej z osi.

Standardowo wyznaczenia w tego typu urządzeniach odbywają się w cyklu 10 Hz, jednak wartość ta może być regulowana przez operatora. Należy zwrócić uwagę na to, że odczyty są zawsze wynikiem uwzględnienia wcześniejszych wyznaczeń. Najpowszechniej stosuje się w tym celu filtr kalmana, którego własności również mogą być zmieniane w zależności od własności dynamicznych obiektu. Domyślna wartość stałej czasowej w urządzeniu Crescent V100 wynosi 2 s, co oznacza uwzględnianie 20 ostatnich wyznaczeń.

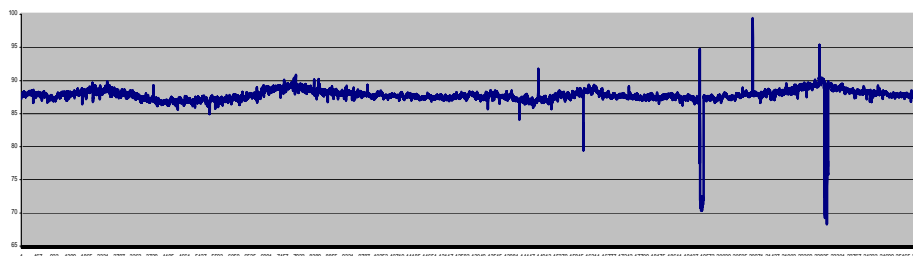
Omawiane urządzenie może być instalowane na okręcie w dwóch wariantach: równoległe lub prostopadłe do diametralnej. Instalacja równoległa do diametralnej pozwala określać współrzędne pozycji, kurs oraz przechyły burtowe. Instalacja prostopadła do diametralnej statku pozwala określać współrzędne pozycji, kurs z poprawką 90° i przechyły wzdłużne. Przewidziano możliwość wprowadzenia stałej poprawki do odczytów, dzięki czemu bez względu na kierunek usytuowania układu antenowego zawsze jest możliwe wyprowadzanie na wyświetlacz i pozostałe odbiorniki kursu, a nawet korygowanie ewentualnych niedokładności w instalacji.



Rys. 3. Różne warianty usytuowania anteny względem kadłuba:
P — antena główna, S — antena pomocnicza [1]

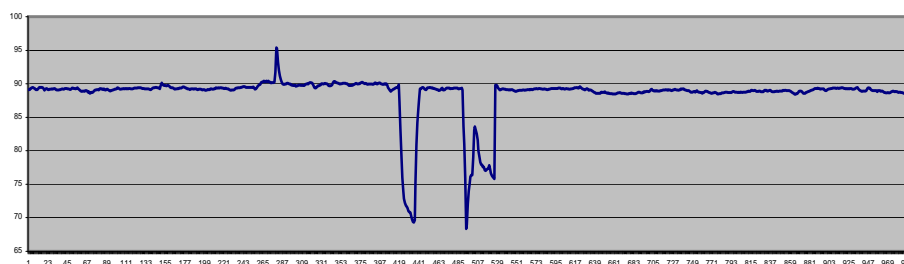
WYNIKI BADAŃ STATYCZNYCH

Autorzy artykułu eksperymenty z urządzeniem Vector 100 rozpoczęli latem 2008 roku. W pierwszym etapie prowadzono je przy domyślnych ustawieniach przyrządu. Dalej przedstawione są wyniki badań przeprowadzonych w warunkach stacjonarnych. Prezentowane spostrzeżenia wynikają z analizy około 25 000 pomiarów wykonanych w odstępach 1 sekundy (około 7 godzin). Średnia wartość kursu z całej populacji wyniosła $87,74842^\circ$, a odchylenie standardowe dla tej populacji $1,35542^\circ$. Wykres zmian rejestrowanego kursu przedstawiono na rysunku 4. Należy zauważyć, iż wartość błędu pomiaru odbiega od danych ze specyfikacji, przy czym jest ona większa z powodu kilkukrotnych, gwałtownych odchyień od wartości średniej wynikających z niekorzystnej konfiguracji satelitów. Jest to związane z tym, że pomiary były prowadzone w obszarach zurbanizowanych. Możliwe, iż w warunkach odkrytego horyzontu takie przypadki nie miałyby miejsca, jednak trzeba mieć świadomość, że podobne sytuacje mogą wystąpić również na statku z powodu wpływu infrastruktury statkowej przy niekorzystnym umiejscowieniu anteny.



Rys. 4. Przebieg zmian kursu w trakcie rejestracji

Typowy przykład zmian wskazań przyrządu w trakcie trwania niekorzystnej konfiguracji satelitów przedstawiono na rysunku 5. Wynika z niego, że odchylenia te trwają krótko, przeciętnie w granicach do 30 sekund. Prawdopodobnie odpowiedni dobór stałej filtracji oraz uwzględnienie układów wspomagających (żyroskop i akcelerometr) umożliwią wyeliminowanie lub zmniejszenie tego zjawiska.

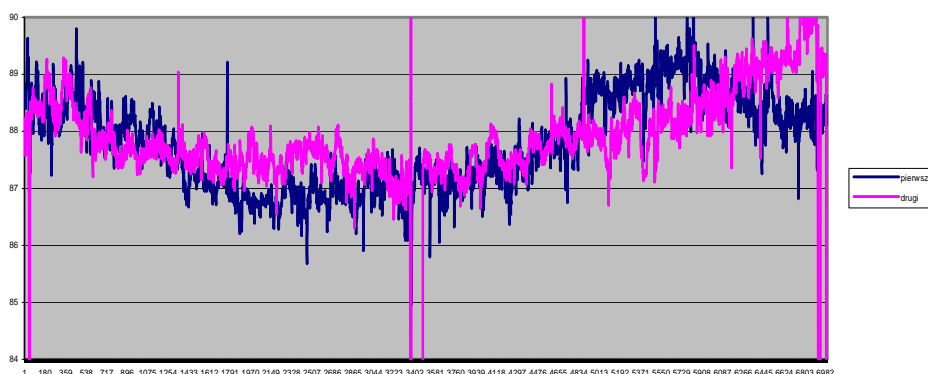


Rys. 5. Przykład krótkoterminowych odchyień kursu w wyniku niekorzystnej konfiguracji satelitów

Uważna analiza zmian kursu przedstawiona na rysunku 4. kaže dostrzec występowanie wolno-zmiennej oscylacji wskazań kursu. Nie jest jasna przyczyna tych zmian — zjawisko wymaga dalszych analiz, jednak warto zwrócić uwagę na to, że dostrzegalny jest okres wahań, około 3000 sekund (rys. 6.). Zwrócono także uwagę na fakt, iż analiza zmian rejestrowanego kursu w krótszych przedziałach czasowych powoduje uzyskanie wartości odchylenia standardowego na poziomie poniżej $0,5^\circ$ (tabela 2.), co jest bliskie wartościom deklarowanym przez producenta, a znaczne zwiększenie tej wielkości dla całej populacji wynika zarówno z gwałtownych odchyień wywołanych niekorzystną konfiguracją satelitów, jak i wspomnianymi wolno-zmiennymi oscylacjami.

Tabela 2. Wartości średniej i odchylenia standardowego dla różnych fragmentów zbioru

Lp.	Część zbioru	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
1	1–1000	87,76433	0,334042
2	1001–2000	88,03077	0,320943
3	2001–3000	88,26229	0,399755
4	3001–4000	87,32702	0,464898
5	4001–5000	86,85011	0,248155
6	1–25000	87,74842	1,35542



Rys. 6. Przebieg zmian kursu w dwóch przedziałach o długości 7000 sek.

WNIOSKI

Powszechne wprowadzenie do praktyki kompasów satelitarnych, które zdaniem autorów nastąpi w najbliższych latach (choćby w związku z ich niewielką ceną) wymaga poznania specyfiki tych urządzeń. Z pierwszych doświadczeń wynika, że

funkcjonowanie kompasu satelitarnego w istotnym stopniu zależy od konfiguracji satelitów, co w praktyce oznacza wymóg zachowania szczególnej troski przy wyborze miejsca instalacji anteny. Nawet wspomaganie go dodatkowymi elementami, takimi jak żyroskopy, dla zniwelowania tego zjawiska nie zawsze jest wystarczające. Prawdopodobnie wymaga to specyficznych regulacji na jednostce — kompas satelitarny nie może być traktowany jak bezobsługowe urządzenie gotowe do eksploatacji po włączeniu zasilania (*Plug and Play*). Badania w warunkach statycznych dowodzą, że informacje producentów na temat dokładności wyznaczeń kursu w praktyce nie w pełni się potwierdzają. Dane te dotyczą krótkich przedziałów czasu, jednak błędy wydają się mieć również składową o niskiej częstotliwości, co niekiedy może być zinterpretowane po prostu jako błąd stały. Dalszych analiz wymaga wyjaśnienie przyczyn pojawiania się oscylacji o długim czasie trwania, rzędu 100 lub więcej minut, a także poznanie charakteru błędów w warunkach dynamicznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Crescent V100 Series User Guide, Hemisphere Part, No 875-0174-000 Rev.A1.
- [2] Czarniecki K., *Geodezja współczesna w zarysie*, Wydawnictwo Wiedza i Życie, Warszawa 1997.
- [3] Specht C., *System GPS*, Wydawnictwo Bernardinum, Pelplin 2007.
- [4] www.marinelink.com
- [5] www.sperrymarine.northropgrumman.com
- [6] www.hemispheregps.com

ABSTRACT

For several years the application of so-called satellite compasses on ships has become more and more often. These are the specific, multi-antenna receivers of the satellite system which, apart from the standard functions, enable to measure the angles of the orientation of the hull. In the simplest variants this measurement is synonymous to the heading. In the report the construction of such devices and first observations of their behavior are presented.

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