

Władysław Góral

Globalne systemy nawigacji satelitarnej

Acta Scientifica Academiae Ostroviensis nr 27, 27-34

2007

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

Władysław Góral

GLOBALNE SYSTEMY NAWIGACJI SATELITARNEJ

Wprowadzenie

W roku 2007 mija 50 lat od wprowadzenia na orbitę okołozemską pierwszego sztucznego satelity. Satelita ten o nazwie Sputnik 1 został wystrzelony przez były Związek Radziecki 4 października 1957 r. Wkrótce, bo z końcem stycznia 1958 r. również Amerykanie wprowadzili na orbitę okołozemską satelitę Explorer 1. Dąty te są uważane za początek ery kosmicznej. Sputnik 1 o masie 84 kg, w kształcie kuli pokrytej wypolerowanym aluminium, był widoczny na wieczornym i rannym niebie jako gwiazdka przesuująca się z prędkością ok. 1.5 stopnia na sekundę. Był on również zaopatrzony w nadajnik radiowy emitujący sygnały o częstotliwości 20 MHz. Amerykanie w ciągu kilku miesięcy zebrali znaczną liczbę pomiarów dopplerowskich sygnałów radiowych emitowanych przez sputnika. Na podstawie ich analizy zorientowano się, że pomiary takie z powodzeniem nadają się zarówno do wyznaczenia elementów orbity satelity (a tym samym określenia jego położenia i prędkości w czasie i przestrzeni), jak i określenia położenia obserwatora lub jego położenia i prędkości w układzie globalnym na powierzchni Ziemi. Intensywność prac w zakresie techniki kosmicznej na przełomie lat 50/60 XX w. była tak duża, że w ich wyniku już w 1964 r. zdolność operacyjną uzyskał pierwszy satelitarny system nawigacyjny TRANSIT, który bazował na pomiarach dopplerowskich. Był to pierwszy amerykański system satelitarny wspomagający realizowanie określonego zadania. Początkowo był on przeznaczony wyłącznie dla celów nawigacyjnych amerykańskiej marynarki wojennej, ale już w 1967 r. władze USA udostępniły system TRANSIT dla użytku cywilnego. System ten został w latach 90-tych wyłączony i zastąpiony przez znacznie doskonalszy system nawigacyjny GPS. Na zasadzie pomiaru efektu Dopplera rozwijany był również przez były ZSRR wojskowy system nawigacyjny Cikada, który później został zastąpiony przez GLONASS.

Zasada określania położenia punktu za pomocą aktualnych satelitarnych systemów nawigacyjnych: GPS, GLONASS i w przyszłości Galileo, sprowadza się do jednoczesnego pomiaru odległości do trzech, czterech lub większej liczby satelitów o znanych współrzędnych, obliczanych przez odbiornik na podstawie przesyłanej przez każdy z satelitów tzw. efemerydy pokładowej. Pomiar odległości między satelitą a anteną odbiornika opiera się na pomiarach kodowych i fazowych przesyłanych na co najmniej dwu falach o różnej częstotliwości. Aktualnie w systemie GPS wykorzystywane są dwie częstotliwości: $L_1=1572.42$ MHz ($\lambda_1=19$ cm) i $L_2=1227.60$ MHz ($\lambda_2=24$ cm).

Metoda absolutna stosowana w nawigacji bazuje na przestrzennym liniowym wcięciu wstecz i jest realizowana za pomocą jednego odbiornika. W geodezji znalazła zastosowanie tzw. metoda względna – różnicowa – wymagająca równoczesnej pracy dwu lub większej liczby odbiorników. Przy czym jeden z odbiorników sygnałów GPS umieszczony jest na punkcie o dokładnie znanych współrzędnych geodezyjnych. Dokładność wyznaczania współrzędnych za pomocą metody różnicowej jest o około 3 rzędy większa od dokładności uzyskanej za pomocą metody absolutnej w nawigacji.

System GPS składa się z trzech podstawowych segmentów: satelitarnego, kontrolno–sterującego i użytkowników. Zakres zadań segmentu kontrolno–sterującego jest bardzo obszerny; jest on odpowiedzialny za sprawność techniczną i niezawodność sygnału satelitarnego. W skład tego systemu wchodzi m.in. stacje o znanych współrzędnych w układzie WGS-84 (World Geodetic System 1984) – wykonujące ciągłe pomiary sygnałów GPS. Na ich podstawie obliczane są na bieżąco parametry orbitalne poszczególnych satelitów, oraz poprawki zegarów atomowych – względem systemu czasu GPS – umieszczonych na poszczególnych satelitach. Następnie dane te za pomocą specjalnych stacji są przekazywane do pamięci komputerów znajdujących się na pokładach poszczególnych satelitów. Zakres użytkowników wykorzystujących system GPS jest aktualnie bardzo obszerny. Są to zarówno służby wojskowe, jak i cywilne. System GPS znajduje szerokie zastosowanie w nawigacji morskiej, lądowej, lotniczej i kosmicznej. Z systemu GPS w dużym zakresie korzystają geodeci oraz wszyscy zainteresowani wyznaczeniem swojego aktualnego położenia.

System GPS ewolucja segmentu satelitarnego

Zastosowania nawigacyjne i geodezyjne systemu GPS w sposób zasadniczy zależą od liczby satelitów, ich konfiguracji przestrzennej oraz stopnia doskonałości i niezawodności aparatury umieszczonej na pokładzie satelity, a także oprogramowania. Obecna konfiguracja GPS składa się z 24 satelitów umieszczonych na 6 płaszczyznach orbitalnych nachylonych do płaszczyzny równika pod kątem 55° . Wysokość satelitów nad powierzchnią Ziemi wynosi około 20200 km i jest tak dobrana, aby zgodnie z trzecim prawem Keplera ich okres obiegu wynosił dokładnie pół doby gwiazdowej. Dzięki temu konfiguracja satelitów nad horyzontem dowolnego punktu na powierzchni Ziemi w dowolnym momencie czasu powtarza się po każdej dobie gwiazdowej ($\approx 23^{\text{h}} 56^{\text{m}}$). Obecna konfiguracja satelitów GPS zabezpiecza w dowolnym miejscu na Ziemi minimum 4 satelity powyżej 15° wysokości horyzontalnej. Powyżej 10° nad horyzontem może znaleźć się niekiedy 10 satelitów, a powyżej 5° nawet 12 [3]. Prace nad systemem GPS zostały formalnie zapoczątkowane w 1973 r. Podstawowym celem systemu było globalne zabezpieczenie nawigacyjne armii amerykańskiej. System miał w sposób niezawodny i ciągły w dowolnej chwili i w dowolnym miejscu na Ziemi umożliwić określenie położenia (lub dla obiektu w ruchu – położenia i prędkości) w skali globalnej w jednakowym układzie współrzędnych i jednolitym systemie czasu. W latach 1978-1985 wprowadzono na orbitę 10 satelitów bloku I. Satelity te o masie 845 kg stanowiły tzw. blok testowy. Ostatniego satelitę z tego bloku wyłączono pod koniec 1995 r. Satelity bloku I krążyły po orbitach o nachyleniu 63° i ich sygnały były w pełni dostępne dla użytkowników cywilnych. Jednak pierwszą operacyjną konstelację systemu GPS oparto na satelitach bloku II. Satelity te o masie ponad 1500 kg umieszczono na orbitach o nachyleniu 55° do płaszczyzny równika. Pierwszego satelitę bloku II wprowadzono na orbitę 14.II.1989 r. Średni czas ich życia – sprawności technicznej - początkowo określano na 6 lat. Satelity te wyposażono w mechanizm tzw. selektywnej dostępności (Selective Availability, SA), umożliwiający dysponentowi systemu sterowanie jego dokładnością. Z chwilą włączenia SA, dokładność wyznaczenia pozycji dla użytkowników cywilnych w trybie nawigacyjnym (absolutnym) zmniejszyła się o rząd. Był to wyraźny krok wstecz, z którego cywilni użytkownicy systemu GPS byli bardzo niezadowoleni.

Zmusiło to ich do budowania stacji referencyjnych wyznaczających poprawki, które częściowo eliminowały wpływ SA, oraz przyspieszenia prac nad integracją GPS z rosyjskim systemem GLONASS. Zostały również przyspieszone prace nad cywilnym zachodnio-europejskim systemem Galileo. Różnego rodzaju działania neutralizujące niekorzystne działanie SA, oraz poważne zagrożenie utraty monopolistycznej pozycji USA w tym zakresie spowodowało, że Amerykanie 2 maja 2000 r. wyłączyli SA. W roku 1983, decyzją prezydenta USA R. Reagana, tzw. standardowy serwis pozycyjny systemu GPS (SPS - Standard Positioning Service) został udostępniony służbom cywilnym. Umożliwiło to prowadzenie badań, oraz wykorzystanie systemu GPS m.in. w nawigacji i geodezji. Obecnie satelity II bloku są nadal modernizowane i kolejne ich udoskonalone wersje wprowadzane na orbity oznaczono przez IIA (Advanced) i IIR (Replenishment, Replacement). Satelity bloku IIA (wprowadzane na orbitę począwszy od 26.11.1990 r.) zaopatrzone w możliwość wzajemnej łączności radiowej, a niektóre z nich zaopatrzone w reflektory laserowe. Średni czas sprawności technicznej aktualnie wprowadzonych satelitów bloku IIR wynosi około 10 lat. Wszystkie składowe sygnału GPS są sterowane przez precyzyjne zegary atomowe. Satelity II bloku są zaopatrzone w 4 zegary atomowe (2 rubidowe i 2 cezowe) o dokładności $10^{-13} \div 10^{-14}$ s/dobę. Masery wodorowe instalowane w bloku IIR charakteryzują się dokładnością o rząd wyższą. Te stabilne wzorce częstotliwości są „sercem” generującym podstawową częstotliwość $f_0 = 10.23$ MHz. Częstotliwości fal nośnych powstają przez pomnożenie tej częstotliwości przez liczbę całkowitą. Dla L1 i L2 są to odpowiednio liczby: 154 i 120.

Od kilku lat prowadzona jest ożywiona dyskusja nad przyszłością systemu GPS. Z jednej strony plany wykorzystania systemu GPS dla celów militarnych stawały się coraz bardziej sprzeczne z planami wykorzystania systemu w służbach cywilnych (nawigacja pojazdów, nawigacja morska i lądowa). Zebrane doświadczenia pozwoliły na zaprojektowanie satelitów kolejnej generacji (bloku IIF - Follow on lub Future), które w drugiej dekadzie XXI w. zastąpią satelity bloku II. Docelowo liczba satelitów systemu GPS zostanie zwiększona z 24 do 33. Zostanie wprowadzony kod C/A na częstotliwości L2. Przewiduje się wprowadzenie dodatkowej częstotliwości dla użytkowników cywilnych.

W dniu 26 września 2005 r. rozpoczął pracę pierwszy satelita z bloku IIR-M zaopatrzonego w kod M (Military) na obu częstotliwościach z przeznaczeniem tylko dla celów wojskowych. Dotychczasowe satelity mają antenę skierowaną w dół, ku Ziemi. Przewiduje się w satelitach nowego typu skierowanie dodatkowej anteny ku „górze” tak, aby sygnały satelitów GPS mogły być odbierane przez satelity znajdujące się nad satelitami GPS, w tym przez geostacjonarne. W połowie stycznia 2007 r. na orbicie znajdowało się 31 satelitów GPS z następującym podziałem na bloki: II – 1, IIA – 15, IIR – 12, i IIR-M – 3 [1]. Na dwu satelitach GPS zainstalowano reflektory laserowe umożliwiające niezależny pomiar odległości za pomocą laserów satelitarnych.

System GLONASS, stan aktualny i perspektywy rozwoju

Równoległe z budową przez Stany Zjednoczone Globalnego Systemu Pozycyjnego GPS, w byłym Związku Radzieckim były prowadzone prace nad podobnym globalnym satelitarnym systemem nawigacyjnym o nazwie GLONASS. Zarówno skrót GLONASS jak i jego rozwinięcie – Globalnaja Nawigacjonnaja Sputnikowaja Sistiema oznaczają, że oba systemy miały rozwiązywać zadania nawigacyjne w skali globalnej. Oba systemy były rozwijane przez instytucje wojskowe i pierwszym etapie ich rozwoju miały one charakter tajny. Nominalna konfiguracja GLONASS składa się z 24 satelitów, równomiernie rozmieszczonych na 3 płaszczyznach orbitalnych nachylonych do płaszczyzny równika pod kątem 64.8° . Wysokość satelitów nad powierzchnią Ziemi wynosi około 19130 km, co odpowiada okresowi obiegu równym $11^{\text{h}} 15^{\text{m}} 44^{\text{s}}$. Dzięki temu położenie danego satelity nad horyzontem dowolnego punktu na powierzchni Ziemi powtarza się po 17 jego obiegach, co odpowiada 8 dobom gwiazdowym. W połowie stycznia 2007 jedynie 11 satelitów GLONASS było w pełni operacyjnych. System ten jest nadal modernizowany i w roku 2008 powinno znaleźć się na orbicie 18 aktywnych satelitów. Wszystkie satelity są wyposażone w reflektory, służące do ich śledzenia za pomocą dalmierzy laserowych. W okresie od października 1982 r. do maja 1988 r. wprowadzono na orbitę odpowiednio: 10 satelitów bloku I, 6 bloku II a, 12 II b, II c. Aktualnie wprowadzane satelity GLONASS należą do bloku II M (zmodernizowany). Prace nad systemem GLONASS początkowo były utajnione.

Dopiero w roku 1991 rząd radziecki zaoferował nieodpłatny dostęp do systemu oraz ujawnił więcej informacji na jego temat. W roku 1995 władze rosyjskie podjęły decyzję o udostępnieniu kodu C/A użytkownikom cywilnym. W kolejnych latach władze rosyjskie zadeklarowały chęć współpracy w zakresie uzgodnień udziału GLONASS w rozwijaniu globalnych systemów nawigacji satelitarnej (Global Navigation Satellite System - GNSS). Zostały opublikowane opisy poszczególnych segmentów systemu, w tym struktury sygnału oraz depeszy nawigacyjnej. W roku 2008 zapowiadane jest wprowadzenie na orbitę satelitów GLONASS kolejnej generacji K, transmitującej w swej depeszy również dane o integralności. Satelity bloku K będą dodatkowo zaopatrzone w nadajnik sygnałów o częstotliwości L3. Będzie to trzecia częstotliwość udostępniona użytkownikom cywilnym. Ich masa - 825 kg - będzie o połowę mniejsza niż satelitów bloku M, co umożliwi na wprowadzenie na orbitę okołoziemską równocześnie 6 satelitów za pomocą jednego startu rakiety Proton [5].

System Galileo

Aktualnie – obok dwu nadal intensywnie modernizowanych satelitarnych systemów nawigacyjnych GPS i GLONASS – kraje Unii Europejskiej (UE) prowadzą prace nad zbudowaniem trzeciego globalnego systemu nawigacji satelitarnej o nazwie Galileo, zarządzanego przez instytucje cywilne. Inicjatorem budowy tego systemu była Francuska Agencja Kosmiczna (CNES) [6]. Propozycję tę następnie podjęła Europejska Agencja Kosmiczna (ESA) a później kraje UE. Potrzebę utworzenia nowego systemu nawigacji satelitarnej zauważyła również Międzynarodowa Organizacja Lotnictwa Cywilnego (ICAO – International Civil Aviation Organization). Organizacja ta zaleciła również wdrożenie regionalnego systemu integrującego system GPS i GLONASS. Aktualnie kraje UE rozwijają Europejski System Wspomagania Satelitarnego EGNOS – (European Geostationary Navigation Overlay Service), który wyznacza i za pośrednictwem trzech satelitów geostacjonarnych (2 satelity typu INMARSAT-3 i jednego typu ARTEMIS) rozsyła poprawki różnicowe dla satelitów GPS i GLONASS, - a w przyszłości również dla satelitów Galileo. Jednym z celów EGNOS jest monitorowanie statusu GPS poprawianie ogólnej dokładności systemu przez przesyłanie odpowiednich poprawek

użytkownikom, w szczególności samolotom wykorzystującym sygnały GPS jako pomoc w końcowej fazie podejścia do lądowania w czasie rzeczywistym. Aktualnie w skład systemu wchodzi sieć złożona z 34 stacji RIMS - Ranging Integrity and Monitoring Stations. Wygenerowane przez system poprawki są przesyłane do w.w. satelitów geostacjonarnych, które z kolei przesyłają je do użytkowników w kierunku Ziemi. W dniu 28 grudnia 2005 r. na orbitę został wprowadzony pierwszy satelita testowy z budowanego systemu Galileo o nazwie GIOVE-A (www.giove.esa.int). Jednak ze względów technicznych i organizacyjnych przesuwane jest umieszczenie na orbicie kolejnego satelity testowego GIOVE-B. Opóźnienia te przesuwają obecnie termin osiągnięcia statusu operacyjnego systemu Galileo poza rok 2011. Przewiduje się, że za pomocą jednego startu na orbitę będzie wynoszone równocześnie 6 satelitów. Przy pomyślnej realizacji planów uruchomienia systemu Galileo oraz zmodernizowaniu systemu GLONASS, na początku drugiego dziesięciolecia XXI w. będą to dwa najbardziej nowoczesne systemy nawigacji satelitarnej o możliwościach większych niż również modernizowany system GPS. Na podkreślenie zasługują również prace prowadzące do integracji modernizowanych systemów: GPS, GLONASS i tworzonego Galileo. Dopiero tak zintegrowany system umożliwi w sposób zadawalający bezpieczną nawigację lotniczą i morską w warunkach zagrażających życiu.

Aspekt geodezyjny GNSS

Aktualny wysoki stopień doskonałości globalnych systemów nawigacji satelitarnej jest wynikiem intensywnych prac prowadzonych od pół wieku w zakresie wykorzystania technologii satelitarnej w nawigacji i geodezji. System nawigacyjny TRANSIT, a w szczególności GPS, został z powodzeniem wykorzystany do bardzo owocnych badań w zakresie geodezji. Obecnie intensywny rozwój geodezji jest w znacznym stopniu zależny od rozwoju GPS a w przyszłości również od GLONASS i Galileo. W latach 90-tych system GPS został powszechnie wprowadzony do praktyki geodezyjnej. Szerokie wprowadzenie technologii GPS do praktyki geodezyjnej jest wielkim osiągnięciem naukowym w zakresie wdrażania technik kosmicznych i satelitarnych, w tym satelitarnych systemów nawigacyjnych. Problematykę poruszoną w niniejszym artykule istotnie poszerzają ostatnie trzy pozycje ze spisu literatury, które są aktualnie dostępne na rynku księgarskim.

Literatura:

- 1 Dach R., Hugentobler U., Fridez P. Meindl M.: Bernese GPS Software, V. 5.0. , Astronomical Institute, University of Berne 2007.
- 2 Góral W., Szewczyk J.: Zastosowanie technologii GPS w precyzyjnych pomiarach deformacji, UWN-D AGH, Kraków 2004.
- 3 Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins I.: GPS, Theory and Practice, Springer-Verlag. 3rd ed. 1966.
- 4 Januszewski J.: Systemy satelitarne GPS Galileo i inne, PWN, Warszawa 2006.
- 5 Lamparski J.: GPS w geodezji, Wyd. Gall.