

Władysław Góral

GPS W ZASTOSOWANIACH GEODEZYJNYCH U PROGU TRZECIEGO TYSIĄCLECIA

Streszczenie

Szerokie wprowadzenie technologii GPS do praktyki geodezyjnej jest wielkim osiągnięciem naukowym lat dziewięćdziesiątych XX wieku. Niejednokrotnie była ona określana jako technologia XXI w. W referacie na wstępie przedstawia się aktualny status systemu GPS w aspekcie zastosowań geodezyjnych. Omawia się przewidywaną ewolucję rozwoju segmentu satelitarnego systemu GPS, w tym propozycję włączenia do systemu dodatkowej częstotliwości. Dyskutuje się koncepcje poszerzenia systemu GPS o inne systemy satelitarne. Omawia się integrującą funkcję systemu GPS. Przewiduje się, że technologia GPS będzie nadal jedną z najdynamiczniej rozwijających się technologii geodezyjnych, które w istotny sposób będą zmieniały „filozofię” geodezji.

1. Wstęp

Aktualny wysoki stopień doskonałości Globalnego Systemu Pozycyjnego (GPS) jest wynikiem intensywnych prac prowadzonych od ponad 40 lat w zakresie wykorzystania technologii satelitarnej w nawigacji i geodezji. Czynnikiem istotnie przyspieszającym te badania było wprowadzenie przez byłe ZSRR Sputnika 1 na orbitę okołoziemską co miało miejsce 4 października 1957 r. Amerykanie w ciągu kilku miesięcy zebrali ponad 40 tysięcy 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. Intensywność prac w zakresie techniki kosmicznej na przełomie lat 50/60 XX w. była tak duża, że w ich wyniku w 1963 r. zdolność operacyjną uzyskał pierwszy satelitarny system nawigacyjny TRANSIT, który bazował na pomiarach dopplerowskich. Był to pierwszy amerykański system satelitarny wspomagający realizowanie określonego zadania. System ten został w latach 90-tych wyłączony i zastąpił go znacznie doskonalszy system GPS. Zarówno 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. Należy podkreślić, że zarówno TRANSIT jak i GPS były realizowane jako systemy nawigacyjne o przeznaczeniu wojskowym. Jednak ich możliwości potencjalne oraz nacisk międzynarodowej społeczności

cywilnej spowodował, że dysponent systemu – Departament Obrony USA – udostępnił częściowo oba systemy służbom cywilnym. W latach 90-tych system GPS został powszechnie i wszechstronnie wprowadzony do praktyki geodezyjnej.

2. Ewolucja segmentu satelitarnego.

Zastosowanie nawigacyjne i geodezyjne systemu GPS w sposób zasadniczy zależy od liczby satelitów, ich konfiguracji przestrzennej oraz stopnia doskonałości i niezawodności aparatury umieszczonej na pokładzie satelity oraz 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 ($\approx 23^h 56^m$). 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. Prace nad 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 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. Warto zauważyć, że niektóre z satelitów tego bloku były operacyjnie sprawne przez 10 lat, mimo, że średni czas ich życia wynosił 4.5 roku. 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° . Pierwszego satelitę bloku II wprowadzono na orbitę 14.II.1989 r. Średni czas ich życia początkowo określano na 6 lat. Satelity te wyposażono w mechanizmy tzw. selektywnej dostępności (Selective Availability) umożliwiające dysponentowi sterowanie dokładnością systemu. Z chwilą włączenia S.A. 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 tworzenia stacji referencyjnych wyznaczających poprawki które częściowo eliminowały wpływ S.A. oraz przyspieszenie prac nad integracją GPS z rosyjskim systemem GLONASS oraz prac nad niezależnym zachodnio-europejskim systemem GALILEO. Różnego rodzaju działania neutralizujące niekorzystne działanie S.A. oraz poważne zagrożenie utraty monopolistycznej pozycji USA w tym zakresie spowodowało, że Amerykanie na początku maja 2000 wyłączyli S.A. 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 oraz niektóre z nich zaopatrzone w reflektory laserowe. Średni czas życia aktualnie wprowadzanych satelitów bloku IIR wynosi ok. 10 lat. Wszystkie składowe sygnały GPS są sterowane przez precyzyjne zegary atomowe. Satelity II bloku są zaopatrzone w 4 wzorcowe zegary atomowe (2 rubidowe i 2 cezowe)

o dokładności (10^{-13} - 10^{-14}) s/dobę. Zaś masery wodorowe instalowane w bloku IIR charakteryzują się o rząd wyższą dokładnością. Te stabilne wzorce częstotliwości są „sercem” generującym podstawową częstotliwość $f_0=10.23$ MHz. Częstotliwości fali 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 (nawigacji pojazdów, nawigacji morskiej i lotniczej). Satelity początku XXI w., to satelity bloku oznaczone kryptonimem IIF (Follow on). 14 lutego 1999 r. minęło 10 lat doświadczeń w zakresie eksploatacji satelitów bloku II. Zebrane doświadczenia pozwoliły na zaprojektowanie satelitów kolejnej generacji (bloku IIF), które w pierwszej dekadzie XXI w. zastąpią satelity bloku II. Przewiduje się, że satelity te będą wprowadzane sukcesywnie na orbitę po roku 2001. Docelowo liczba satelitów systemu GPS zostanie zwiększona z 24 do 33. Zostanie wprowadzony kod C/A na częstotliwości L2. Przewiduje się dodatkowe częstotliwości dla użytkowników cywilnych. Gotowa jest również koncepcja wprowadzenia nowego kodu (tzw. v-kodu) na obu częstotliwościach z przeznaczeniem tylko dla celów militarnych. 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. Czas „życia” nowych satelitów przekroczy 10 lat.

3. Geodezyjne aspekty systemu GPS.

W miarę rozwijania nawigacyjnych systemów satelitarnych o przeznaczeniu wojskowym były równolegle prowadzone przez cywilne ośrodki uniwersyteckie i naukowo badawcze prace nad wykorzystaniem ich do celów cywilnych. Sytuacja polityczna stwarzała dodatkowe utrudnienia uniemożliwiające dostęp do tajnych danych technicznych rozwijanych systemów. Zmusiło to naukowców do prowadzenia badań nad możliwością wykorzystania w geodezji systemu GPS bez dostępu do kodów satelitarnych. Korzystając z doświadczeń w zakresie interferometrii długobazowej zbudowano już na początku lat 80-tych pierwsze prototypy odbiorników. Te doświadczenia i częściowe odtajnienie systemu GPS umożliwiło zbudowanie pod koniec lat 80-tych pierwszych odbiorników sygnałów GPS dla potrzeb cywilnych, zarówno nawigacyjnych jak i geodezyjnych. Pierwsza wersja odbiorników użytecznych w pracy geodezyjnej pojawiła się na rynku na przełomie lat 80/90. Na początku lat 90-tych odbiorniki geodezyjne sygnałów GPS uzyskały portatywne rozmiary. Ich cena znacznie spadła. Konfiguracja satelitów systemu była stale powiększana i ulepszana. Zniesiono również embargo. Splot tych czynników umożliwił ośrodkom uczelnianym i naukowo-badawczym w Polsce zakup pierwszych odbiorników i rozpoczęcie na szeroką skalę prac badawczych w zakresie wykorzystania GPS w geodezji. W pierwszej połowie lat 90-tych zbudowano na podstawie pomiarów sygnałów GPS polską sieć geodezyjną POLREF, którą nawiązano do sieci zachodnio-europejskiej EUREF. Dzięki czemu Polska uzyskała nowoczesną i precyzyjną podstawową osnowę geodezyjną. W połowie lat 90-tych pojawiły się odbiorniki nowej technologii tzw. RTK. W końcu XX w. odbiorniki GPS stały się w Polsce jednym z podstawowych instrumentów geodezyjnych. Wpływ wprowadzenia technologii GPS do geodezji można ocenić jako rewolucyjny. W klasycznej geodezji system wysokości był rozłączny z systemem współrzędnych poziomych. Dzięki GPS oba systemy zostały

zintegrowane w postaci geodezji trójwymiarowej. Uzyskano jednolity układ w skali globalnej o początku w środku masy Ziemi co umożliwiło integrację poszczególnych układów lokalnych (państwowych) do układu światowego. Dzięki wprowadzeniu pomiarów fazowych względnych (z minimum dwu odbiorników GPS pracujących równocześnie) uzyskano w trybie geodezyjnym dokładność wyznaczenia pozycji o 3-4 rzędy wyższą niż w trybie nawigacyjnym (absolutnym) bazującym na pomiarach kodowych. Dużą zaletą technologii GPS jest niezależność pomiarów od wzajemnej widoczności punktów. W triangulacji klasycznej zarówno stanowiska pomiarowe jak i cele musiały być ulokowane na wzniesieniach (wieżach triangulacyjnych). Osnowa GPS jest zakładana na punktach o odkrytym horyzoncie, najlepiej z możliwością dojazdu do punktu samochodem. Kolejną zaletą technologii GPS jest jej łatwa integracja z innymi technologiami pomiarowymi. Szczególnie cenne jest łączenie pomiarów GPS z pomiarami niwelacyjnymi. Pomiary takie umożliwiają wyznaczenie zarówno składowych odchylenia pionu jak i odstępów między elipsoida a geoidą w danym punkcie. Praktycznie możliwe jest łączenie wszystkich znanych klasycznie pomiarów geodezyjnych z pomiarami GPS. Zarówno pomiary sygnałów GPS jak i ich opracowanie są w pełni zautomatyzowane. Pomiary takie można praktycznie realizować w każdych warunkach atmosferycznych niezależnie od pory roku i dnia.

4. Uwagi końcowe.

Remondi w roku 1991 charakteryzując system GPS stwierdził, że odpowiada on na pytania: jaki jest moment czasu, jaka jest pozycja obserwatora i jaka jest jego prędkość w sposób szybki dokładny i tani w dowolnym miejscu na Ziemi i dowolnym czasie. Zmodernizowany system GPS będzie musiał dodatkowo odpowiedzieć na pytanie: jaka jest dokładność wyznaczonych parametrów nawigacyjnych. System ma stać się niezawodnym instrumentem wspomagającym nawigację w warunkach zagrożenia życia. Dzięki integracji GPS z GLONASS wraz z planowanym uruchomieniem do 2008 r. systemu GALILEO i jego integracją z dwoma pozostałymi należy spodziewać się w geodezji uzyskania dokładności na poziomie milimetrowym w ciągu kilku sekund pomiarów.

5. Literatura

1. R. Conley, *Results of the GPS IPO's GPS Performance Baseline Analysis: The GOSPAR Project*;
2. *Proceedings of ION GPS – 99*, Institute of Navigation;
3. B. Hoffman-Wellehmhof, H. Lichtenegger, J. Collins, *Global Positioning System, Theory and Practise*, Springer Verlag 1992;
4. O. Martens, D. Latterman: *Stewardship and GPS Modernisation. One Step on the Road to the Future*, *Proceedings of ION GPS – 99*, Institute of Navigation;
5. S. H. Rughan, J. K. Holmes, S. Lazar, M. Bottjer: *Tricode Hexaphase Modulation for GPS*, *Proceedings of ION GPS – 99*, Institute of Navigation..

Recenzował: prof. dr hab. inż. Józef Jachimski