

Patrycja Kryj

Ogólne zasady funkcjonowania Globalnego Systemu Pozycyjnego GPS

Acta Scientifica Academiae Ostroviensis nr 30, 19-32

2008

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.

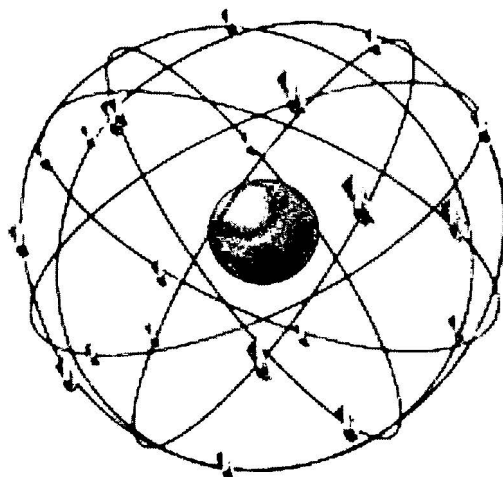
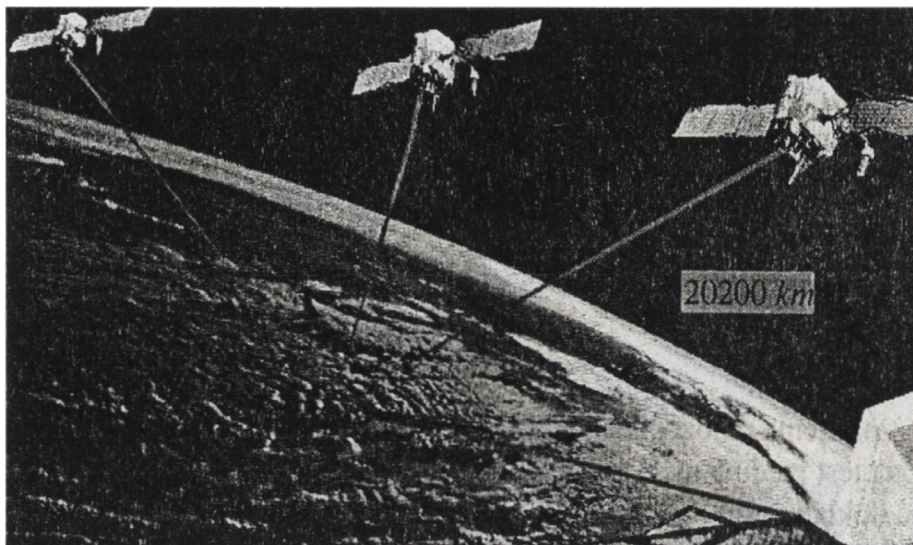
Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

Patrycja Kryj

OGÓLNE ZASADY FUNKCJONOWANIA GLOBALNEGO SYSTEMU POZYCYJNEGO GPS

Globalny system Pozycyjny – GPS (Global Positioning System) jest to system nawigacji satelitarnej obejmujący zasięgiem całą kulę ziemską. Służy on do wyznaczenia przestrzennego położenia (lokalizacji) punktów, na których jest ustawiona aparatura służąca do odbioru sygnałów radiowych wysyłanych przez sztuczne satelity Ziemi. System ten jest utrzymywany i zarządzany przez Departament Obrony USA. Korzystać z jego usług może w zasadzie każdy - wystarczy tylko posiadać odpowiedni odbiornik. System wielu nadajników jest bardzo kosztowny. Amerykanie ciągle muszą umieszczać na orbicie kolejne, aby zastąpić te, które uległy awarii lub zeszyły z właściwej orbity. Ze względu na zyski dla światowej gospodarki, a szczególnie amerykańskiej, jest on nieodpłatnie udostępniony dla zastosowań cywilnych. Ciekawostką jest fakt, że na każdym odbiorniku umieszczona jest aparatura szpiegowska NUDET (**N**uclear **D**etection), mająca na celu natychmiastowe wykrywania wybuchów nuklearnych na Ziemi.

GPS składa się z 27 satelitów (24 czynne i 3 rezerwowe). Liczba 24 satelitów jest minimum wymaganym do osiągnięcia pełnej operacyjności systemu, czyli daje 99,96% prawdopodobieństwa zaobserwowania przynajmniej 5 satelitów w dowolnym punkcie na kuli ziemskiej, z wyłączeniem okolic biegunów. Wszystkie satelity wchodzi w skład systemu o nazwie NAVSTAR (**N**avigation **S**ystem with **T**ime and **R**aning). Satelity poruszają się z dużą prędkością, ok. 4 km/s w odległości ok. 20200 km od powierzchni Ziemi po sześciu prawie kołowych orbitach, które są równomiernie rozmieszczone w przestrzeni i nachylone w stosunku do równika pod kątem 55° (rysunki poniżej).



Wynika stąd, że na wybranej orbicie krążą najmniej 4 satelity. Każdy z nich obiega Ziemię w ciągu 12 godzin i jest widoczny nad horyzontem (z dowolnego jej punktu) przez ok.5 godzin. To sprawia, że w każdym momencie można jednocześnie odbierać sygnały od 4 do 10 satelitów. Konstelacja satelitów dzieli się na zespoły zwane blokami generacji o oznaczeniach: I, II, II a, III. Satelity z poszczególnych bloków różnią się wieloma cechami, np. masą, wielkością, wzorcem częstotliwości i in.

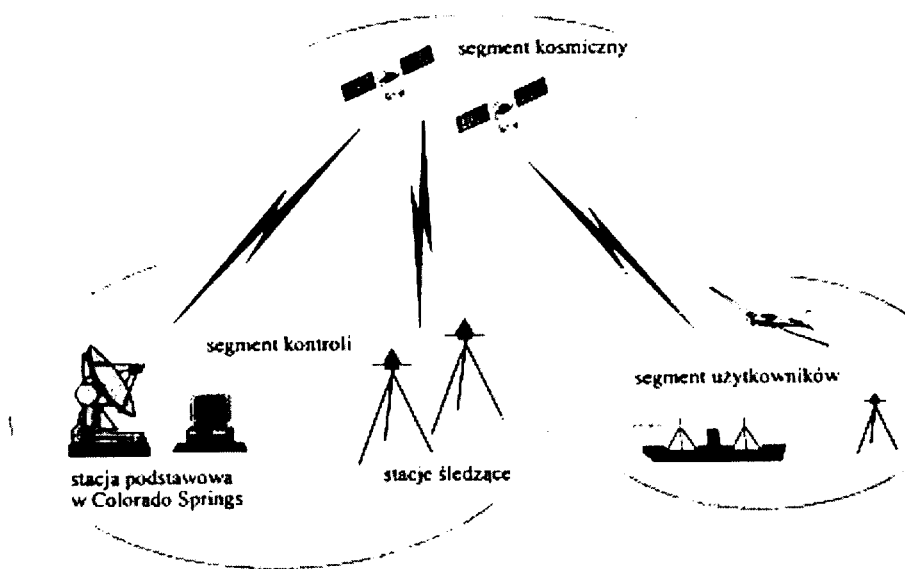
Zasada działania systemu polega na określeniu położenia danego punktu naziemnego poprzez pomiar czasu dotarcia sygnału radiowego z satelitów do odbiornika. Znając prędkość fali elektromagnetycznej, można obliczyć odległość od odbiornika do satelity.

Mając wpisane w pamięć urządzenia położenie satelitów w czasie, mikroprocesor odbiornika może obliczyć aktualny czas GPS z dokładnością do jednej milionowej sekundy w każdym miejscu na Ziemi oraz pozycję geograficzną (długość, szerokość geograficzną oraz wysokość elipsoidalną) w układzie WGS-84. Wyznaczone w tym układzie współrzędne x , y , z są następnie przeliczane do układu geodezyjnego obowiązującego w danych kraju. Każdy z satelitów systemu emituje pewne, wysoko stabilne częstotliwości pomiarowe, transmituje sygnały czasu swojego zegara, retransmituje pewne informacje efemerydalne, które dotyczą położenia satelity w przestrzeni, oraz pewne informacje identyfikacyjne (tego satelity i systemu).

System GPS dzieli się na 3 części, zwane segmentami lub członami. Są to:

- segment kontrolny,
- segment kosmiczny,
- segment użytkowników GPS.

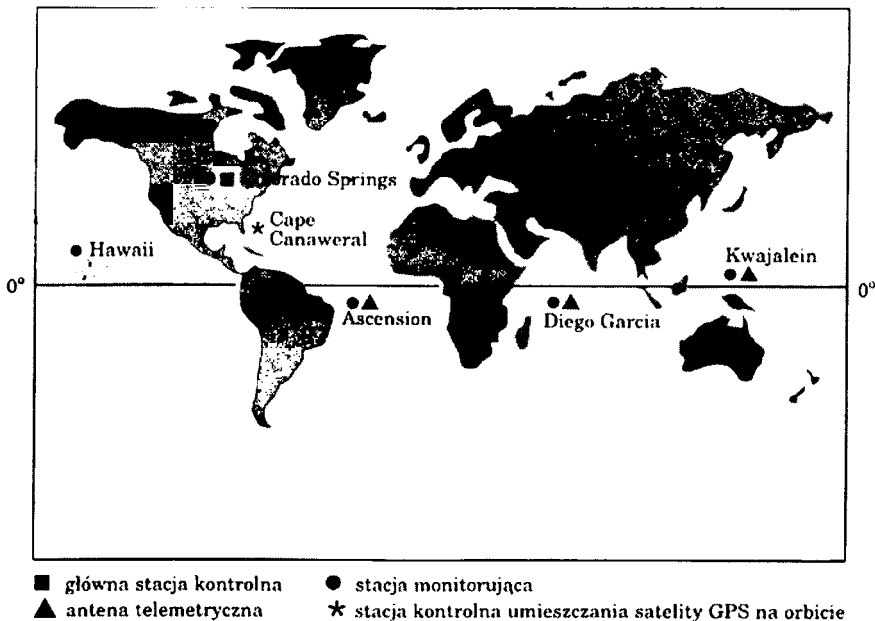
Schemat systemu łączności pomiędzy poszczególnymi segmentami przedstawia rysunek poniżej:



Schemat systemu GPS

Segment kontrolny (naziemny) – utworzony jest przez obserwacyjne stacje naziemne, które podzielone są na:

- 1 główną stację kontrolną zlokalizowaną przy Zjednoczonym Dowództwie Kosmicznym w bazie AF Falcon w Colorado Springs, która analizuje stan techniczny satelitów i decyduje o koniecznych korektach,
- 3 stacje kontrolne, posiadające anteny telemetryczne służące do utrzymania łączności z satelitami (przesyłają dane aktualizujące pamięć satelitów i inne komendy dotyczące ich funkcjonowania),
- 5 stacji monitorujących (śledzących), które są w miarę równomiernie rozmieszczone na ziemskim globie. Stacje te mieszczą się w Colorado Springs (USA) oraz na wyspach: Wniebowstąpienia (Ascension) na południowym Atlantyku, Hawajach, Diego Garcia na Oceanie Indyjskim i atolu Kwajalein wchodzącym w skład Wysp Marshalla na zachodnim Pacyfiku. Rozmieszczenie stacji przedstawia poniższy rysunek:



Rozmieszczenie stacji segmentu kontrolnego

Stacje śledzące są bezzałogowe. Mają one wcześniej wyznaczone współrzędne geocentryczne w układzie WGS – 84. Wyznaczenie współrzędnych odbywa się najpierw za pomocą metod fotogrametrycznych, potem dopplerowskich i laserowych, a niektóre z nich to stacje VLBI. Stacje monitorujące wyposażone są w precyzyjne wzorce cezowe oraz odbiorniki, mające możliwość generowania kodu P. Stacje te wykonują nieprzerwanie obserwacje wszystkich satelitów systemu i co 1,5 s rejestrują kolejne pomiary. Obserwacje te tworzą 15-minutowe zbiory i są przesyłane przez satelitarny wojskowy system łączności (DSCS) do głównej stacji kontrolnej. Jest ona bezpośrednio powiązana ze służbą czasu w waszyngtońskim US Naval Observatory. Centrum obliczeniowe w głównej stacji wyznacza przewidywane elementy orbity każdego satelity i poprawki pozwalające na wyznaczenie pozycji satelity w momencie obserwacji. Te przewidywane elementy orbity (ekstrapolowane za pomocą modelu pola grawitacyjnego Ziemi) oraz poprawki do zegara poszczególnego satelity stanowią podstawową część tzw. depeszy satelitarnej. Depesza owa zapisywana jest w pamięci komputera pokładowego satelity, po czym retransmitowana jest w postaci tzw. efemeryd pokładowych (broadcast ephemeris lub broadcast message) i przesyłana do trzech stacji kontrolnych, które mają bezpośrednią łączność z satelitami. Obecnie dodanych zostało 6 stacji NIMA i planuje się dodanie kolejnych 6. W rezultacie wszystkie satelity będą widzialne przez minimum dwie stacje śledzące, co pozwoli zwiększyć dokładność kontrolowania parametrów pracy systemu.

Segment kosmiczny (satelitarny) – w jego skład wchodzi 30 satelitów (stan z 14.08.2007r.), które poruszają się na półsynchronicznych orbitach kołowych. Czas obiegu Ziemi przez satelitę trwa 11h 58min (pół doby gwiazdowej), dzięki temu codziennie, prawie o tej samej porze (dokładnie 4 minuty wcześniej) można obserwować z Ziemi tą samą konstelację satelitów. Około 28 satelitów jest stale czynnych, reszta z nich jest testowana lub wyłączona z przyczyn technicznych (stan na sierpień 2007r.). Każdy z satelitów nadaje z pokładu 2 częstotliwości radiowe z kodowanymi informacjami o czasie oraz depeszę satelitarną. Informacje te służą do identyfikacji satelity i ustalenia położenia satelity na orbicie.

Generacje satelitów GPS:

- Satelity bloku I (SVN1 – SVN11):
 - już nie istnieją (ich umieszczanie na orbitach rozpoczęto od 22.02.1978r, satelity te posiadały „żywność” określoną na 4.5 roku),
 - posiadały 3 zegary: 2 rubidowe i 1 cezowy,
 - kąt nachylenia do płaszczyzny równika 63° ,
- Satelity bloku II (SVN13 – SVN21):
 - posiadają silny sygnał,
 - ich konstrukcja umożliwiała działanie przez 14 dni, bez potrzeby kontaktu ze stacją kontrolną,
- Satelity bloku IIA (SVN22 – SVN40):
 - zdolność transmisji sygnału zdegradowanego przez degradację SA i AS,
 - posiadały 4 zegary atomowe: 2 cezowe i 2 rubidowe,
 - działanie 180 dni bez potrzeby kontaktu ze stacjami kontrolnymi (degradacja danych nawigacyjnych),
 - żywotność satelity: 9.6 - 10.23 lat,

Satelity bloków II i IIA umieszczane są na orbitach od marca 1994 roku.

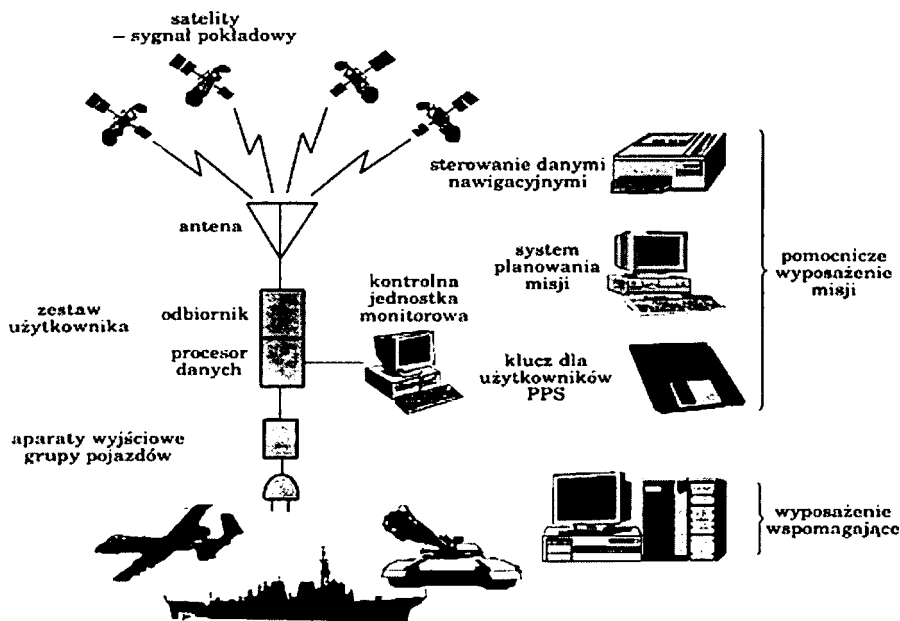
- Satelity bloku IIR (SVN41 – SVN62):
 - działanie bez kontaktu ze stacjami kontrolnymi, w przypadku korzystania z systemu autonomicznej nawigacji – 14 dni,
 - możliwość łączności i pomiaru odległości między satelitami,
 - 3 zegary rubidowe,
 - zdolność transmisji sygnału zdegradowanego przez degradację SA i AS,
 - żywotność satelity: 8.57 - 10.62 lat,
- Satelity bloku IIR-M:
 - dużo lepsza jakość sygnału,
 - lustra laserowe,
 - integracja z innymi technikami (inercjalnymi),
 - możliwa wzajemna łączność i wzajemny pomiar odległości,
 - żywotność satelity: 11.35 lat.

Satelity bloków IIA, IIR, IIR-M posiadają kąt nachylenia względem płaszczyzny równika równy 55° .

Segment użytkowników obejmuje instytucje i osoby korzystające z systemu oraz posiadaną przez nie aparaturę odbiorczą wyposażoną w anteny do odbioru sygnałów satelitarnych i przetwarzających je komputerów. Użytkowników można podzielić na 2 grupy:

- PPS (Precise Positioning Service) – mają dostęp do dokładnych, nie zakodowanych informacji satelitarnych (najczęściej to użytkownicy militarni)
- SPS (Standard Positioning Service) – korzystający z zakodowanych informacji satelitarnych (wszyscy użytkownicy cywilni).

Elementy zestawu użytkowego przedstawia rysunek poniżej:



Podstawowe elementy zestawu użytkowego (militarnego)

Główni użytkownicy systemu to służby wojskowe. Odbiorniki wojskowe są umieszczane na samolotach, czołgach, okrętach, samochodach i helikopterach. Używają ich także wojskowe służby topograficzne. Obecnie są wykorzystywane przez armię amerykańską i armie państw NATO oraz Australii. W większości są to odbiorniki dające możliwość natychmiastowego wyznaczenia pozycji z dokładnością do 10 m. Odbiorniki GPS zaprojektowane są tak, by odbierać, dekodować i przetwarzać sygnały GPS oraz wykonywać obliczenia, w celu ustalenia wymaganych parametrów nawigacyjnych (nawigacja powietrzna, morska, lądowa), takich jak pozycja, prędkość, kurs itp. Zastosowania obejmują także transfer czasu, pomiary geodezyjne i wiele innych. Odbiorniki te funkcjonują samodzielnie lub wbudowane są w inne systemy.

Ze względu na różnorodne zastosowanie, odbiorniki różnią się funkcjami i konstrukcją. W zależności od przeznaczenia, wszystkie odbiorniki można podzielić na:

- nawigacyjne (o małej dokładności),
- geodezyjne (dokładne),
- specjalne (o wysokiej dokładności).

Użytkownicy nie mają wpływu na pracę systemu, gdyż przesyłanie danych jest jednokierunkowe czyli do użytkownika. Satelity są wyposażone w anteny do wysyłania i odbierania fal radiowych oraz w bardzo dokładne zegary atomowe (rubinowo -cezowe) wytwarzające wysokostabilną częstotliwość $f_0 = 10,23$ MHz, która jest podstawową częstotliwością systemu. Odpowiednie pomnożenie tej częstotliwości daje 2 częstotliwości:

- $L_1 = 1575,42$ MHz – jest to pierwsza częstotliwość nośna odpowiadająca długości fali $\sim 19,05$ cm,
- $L_2 = 1227,6$ MHz zwana drugą częstotliwością nośną odpowiadającą długości fali 24,45cm.

Fale tych częstotliwości należą do fal ultrakrótkich, które najmniej ulegają zakłóceniom w atmosferze ziemskiej. Sygnał przesyłany jest do użytkownika na obu częstotliwościach.

Częstotliwość podstawowa f_0 formułuje kod C/A, dostępny dla wszystkich użytkowników, powtarzający się co 1 milisekundę. Oprócz kodu C/A są jeszcze:

- kod P - powtarzający się co 267 dni i nie udostępniony dla wszystkich użytkowników (na jego wykorzystanie potrzebowano kiedyś specjalnego zezwolenia Departamentu Obrony USA),
 - kod Y – tajny, używany przez służby wojskowe Departamentu Obrony USA.
- Kody C/A i P są generowane binarnie w formie tzw. pseudo-przypadkowego szumu. Kody są co tydzień resynchronizowane z systemem czasu GPS, co przyczyniło się do powstania nowej jednostki czasu GPS, zwanej tygodniem GPS. Sygnały wysyłane przez satelity są zniekształcane dwoma sposobami:

- SA (Selective Availability)
- A – S (Anti-Spoofing)

SA jest włączone zawsze, zniekształca część sygnału satelitarnego tworząc przez równania DOP limitowaną dokładność wyznaczeń nawigacyjnych użytkowników nie posiadających odpowiedniego sprzętu, który może odszyfrowywać SA.

A-S odmiennie niż SA włączany jest tylko w razie takiej potrzeby. Szyfruje on kod P czyli przekształca go w kod Y. Anti-Spoofing stosowany jest w środowisku militarnym i ma za zadanie udaremnić przeciwnikom zakłócenie sygnału przez fałszowanie sygnału, który jest bezpośrednio odbierany przez użytkowników.

Oprócz częstotliwości (sygnałów pomiarowych), satelity transmitują także 30-sekundowe depesze z danymi nawigacyjnymi (tzw. depesze nawigacyjne), które składają się z pięciu 6-sekundowych tablic zawierających:

- dane do obliczenia poprawek i współczynniki do wyznaczenia opóźnień w propagacji sygnału spowodowanych wpływami jonosferycznymi (tablica 1),
- ekstrapolowane efemerydy orbitalne satelity nadającego depeszę, potrzebne do wyznaczenia jego położenia w chwilowym układzie związanym z Ziemią (tablice 2 i 3),
- dane alfanumeryczne informujące o całym systemie – zakodowane (tablica 4),
- almanach, tzn. zbiór danych o jednym z satelitów systemu (część tablicy 4 i tab. 5).

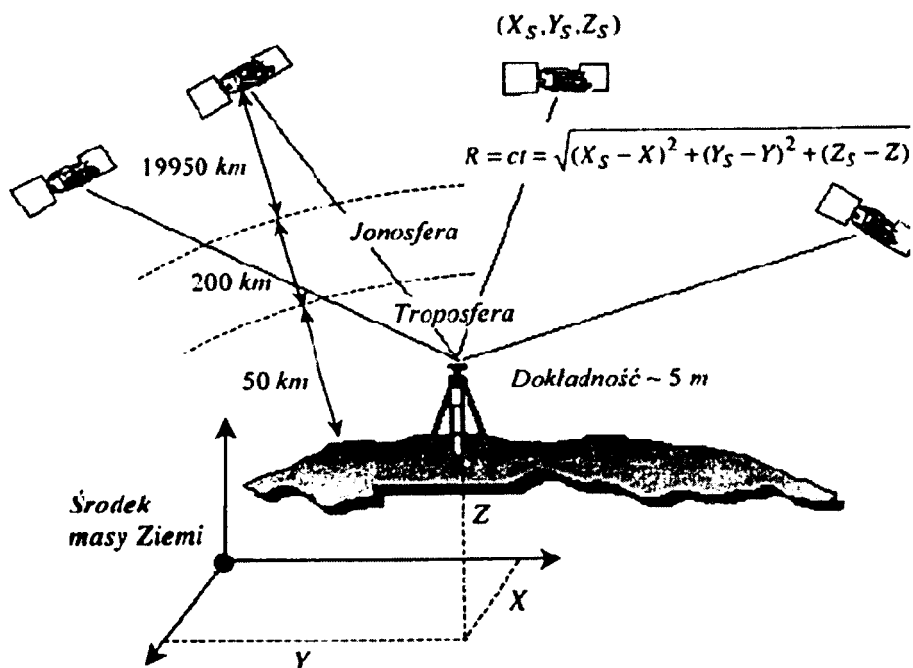
Aby zebrać informacje o wszystkich satelitach potrzebne jest 12,5 minuty obserwacji.

Informacje uzyskane z satelitów można podzielić na kilka typów, które mieszczą się w 2 kategoriach: *pomiary pseudoodległości* i *pomiary fazy*.

Metoda pomiaru pseudoodległości (kodowa) polega na porównaniu (korelacji) kodu C/A i P generowanych przez satelitę na jednej lub dwóch częstotliwościach L1 i L2 z sygnałami generowanymi przez odbiornik, które noszą nazwę replica code. Gdy tylko odbiornik zidentyfikuje kod satelity, rozpoczyna jego generowanie (kod odbiornika oparty jest na częstotliwości kwarcowego oscylatora tegoż odbiornika), a następnie przesuwanie aż do momentu maksymalnej zgodności z kodem odebrany z satelity. Pomiar przesunięcia danych kodów daje czas Δt przebiegu sygnału od satelity do odbiornika, na tej właśnie zasadzie oparte jest wyznaczenie współrzędnych geocentrycznych X,Y,Z punktu nad którym ustawiony jest odbiornik GPS.

Wyznaczenie niewiadomych czyli poprawki zegara i trzech współrzędnych sprowadza się do jednoczesnego pomiaru odległości R od punktu anteny odbiornika do minimum czterech satelitów o znanych współrzędnych X_S, Y_S, Z_S . Szukana odległość R to iloczyn czasu przebiegu sygnału Δt i prędkości światła c: $R = c \cdot \Delta t$.

Szukane współrzędne geocentryczne otrzymuje się poprzez rozwiązanie układu równań odległości R , które wiążą szukane współrzędne ze znanymi współrzędnymi satelitów X_S, Y_S, Z_S . Rysunek poniżej interpretuje geometrycznie pomiar tego typu.

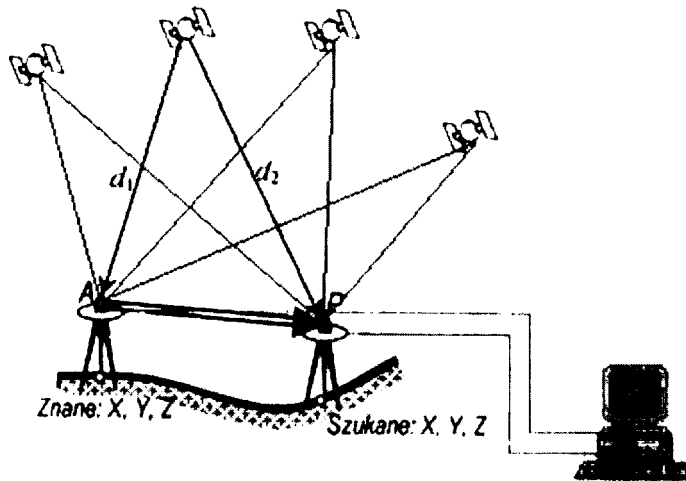


Ze względu na niekorzystny wpływ środowiska (refrakcja jonosferyczna i troposferyczna oraz odbicie od przeszkód), na bieg sygnałów pomiarowych, dokładność tej metody jest rzędu 5 m – jest to za mała dokładność dla potrzeb geodezji, natomiast dla celów nawigacyjnych jest wystarczająca.

Metoda fazowa polega na wykorzystaniu minimum dwóch odbiorników, za pomocą których wykonywane są jednoczesne obserwacje do tych samych satelitów, czego efektem jest obliczenie różnicy odległości do obydwu punktów od tego samego satelity.

Różnicę tą oblicza się na podstawie opóźnienia sygnałów kodowych lub różnic faz fal nośnych wysyłanych przez tego samego satelitę do obu odbiorników. Mając różnice odległości można obliczyć położenie jednego odbiornika względem drugiego, a jeśli dodatkowo znamy współrzędne jednego z odbiorników i możemy obserwować przynajmniej trzy satelity,

to na podstawie tych obserwacji możemy obliczyć współrzędne drugiego odbiornika (rysunek poniżej).



Metoda fazowa jest dokładniejsza (dokładność rzędu 5 mm), dlatego najczęściej stosowana jest w geodezji.

Dokładność wyznaczenia pozycji nie zależy tylko od metody pomiaru, ale także od odbiornika. Dokładne odbiorniki (geodezyjne) powinny pracować na 2 częstotliwościach, odbierać różne kody, działać w systemie RTK, zapewniać rejestracje danych i posiadać odpowiednie oprogramowanie, gdyż daje to możliwość stosowania różnych metod pomiaru pseudoodległości. Odbiorniki, ze względu na konstrukcję, dzielą się na:

- kodowe (nawigacyjne)
- kodowo – fazowe

Odbiorniki kodowe oparte są na pomiarze opóźnienia kodów (C/A, P). Są to odbiorniki szybko działające i dokładne (dokładność rzędu kilku metrów). Stosuje się je w lotnictwie, marynarce, podczas monitoringu transportu, zabezpieczając go przed kradzieżą itp.

Parametry odbiornika kodowego pozwalające ocenić jego działanie to:

- dokładność wyznaczenia: pozycji, prędkości, czasu,
- ilość śledzonych satelitów – minimum 5: 4 śledzone + 1 zapasowy; najlepszą opcją jest możliwość śledzenia wszystkich widocznych satelitów,

- dopuszczalne przyspieszenie (dynamika), z jakim można śledzić sygnał bez jego zarwania,
- czas akwizycji – do pierwszego wyznaczenia pozycji,
- czas reakwizycji – jaki upływa do wznowienia pomiarów po krótkim zaniku sygnału,
- czułość odbiornika, a co najważniejsze minimalny stosunek sygnału do szumu przy którym odbiornik właściwie śledzi sygnał,
- odporność na sygnały zakłócające.

Odbiorniki kodowo – fazowe – rejestrują zarówno opóźnienie kodowe, jak i przesunięcie fazowe fal nośnych, co dzięki zastosowaniu metody różnicowej pozwala osiągnąć dokładności wymagane w geodezji. Odbiorniki można podzielić także ze względu na odbierane częstotliwości, czyli na odbiorniki jednoczęstotliwościowe i dwuczęstotliwościowe.

Odbiorniki jednoczęstotliwościowe odbierają tylko pierwszą częstotliwość nośną L_1 . Stosuje się je do pomiarów statycznych przy odległościach pomiędzy punktami, które nie przekraczają 20 km. Odbiorniki te mają prostą budowę i w porównaniu z odbiornikami dwuczęstotliwościowymi są mniej dokładne.

Odbiorniki dwuczęstotliwościowe, jak nazwa wskazuje odbierają sygnały o dwóch częstotliwościach: L_1 i L_2 , co sprawia, że wykorzystywane są one w geodezji do metody różnicowej. Ich zaletą jest eliminowanie zakłóceń wywołanych przez jonosferę, co sprawia, że podczas długich sesji pomiarowych można korelować dane na punktach oddalonych od siebie o tysiące kilometrów. Wadą odbiorników jest ich cena - są one droższe od jednoczęstotliwościowych.

Odbiorniki wykorzystywane w geodezji są zautomatyzowane (sterowane przez mikrokomputery i wyposażone w odpowiednie oprogramowanie), co sprawia, że operator sprzętu musi tylko ustawić instrument, pomierzyć wysokość anteny odbiornika i wpisać dane do pamięci przyrządu. Reszta pracy wykonywana jest automatycznie przez urządzenie. Mikrokomputer, według ustawionych wcześniej parametrów, kieruje pracą odbiornika oraz kontroluje jakość i dokładność obserwacji. Operator, dzięki wyświetlanym na ekranie urządzenia informacjom o przebiegu sesji, jakości sygnałów i dokładności wyznaczenia położenia anteny, może sprawdzać efekty pracy odbiornika.

Rezultaty pracy odbiornika są zapisywane w jego pamięci, której pojemność starcza na zapisanie kilkudziesięciu godzin obserwacji.

W dzisiejszych czasach odbiorniki GPS są bardzo często używane (nie tylko do celów geodezyjnych czy wojskowych), ponieważ wyposażone są w wiele funkcji, takich jak:

- określenie współrzędnych w różnych układach odniesienia (najczęściej WGS – 84),
- rejestrowanie śladu,
- nawigacje "po trasie" i "do punktu" ,
- track back (czyli powrót "tą samą trasą" do miejsca początku obserwacji),
- wyznaczenie pola powierzchni (np. działki),
- pomiar odległości,
- obliczanie pór księżyca oraz wschodów i zachodów słońca,

a w szerzej rozbudowanych odbiornikach:

- komunikacja przez Bluetooth i port szeregowy (RS232/USB) z innymi urządzeniami elektronicznymi (Palm, PPC, PC, elektroniczna mapa morska ECDIS),
- autorouting, czyli wyznaczanie automatycznej trasy "po drogach",
- wyświetlanie map i nawigacja na mapach warstwowych.

Odbiorniki przeznaczone do eksploatacji na statkach mają bardzo rozbudowane możliwości nawigacyjne. Te przeznaczone do wykorzystania na lądzie mogą posiadać lekkie odbiorniki przenośne oraz cyfrowe mapy terenu. Niektóre odbiorniki mogą określać pozycje za pomocą innych systemów, takich jak GLONASS, czy Loran C.

Popularne stają się palmtopy / PDA z wbudowanym odbiornikiem GPS. Są to urządzenia typu „wszystko w jednym”. Ich zaletą jest niska cena i możliwości wyboru takiego oprogramowania, które będzie najlepiej spełniało oczekiwania użytkownika. Urządzenie posiada oprogramowania zarówno do nawigacji samochodowej (np. Navigo, Automapa), morskiej, jak i specjalistyczne programy (np. do pomiaru powierzchni).

Literatura:

1. Czarnecki K., *Geodezja współczesna w zarysie*, Wiedza i Życie, Warszawa 1997.
2. Jagielski A., *Geodezja II*, Wyd. Stabil, Kraków 2003.
3. Lamparski J., *Navstar GPS od teorii do praktyki*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2001.
4. Osada E., *Geodezja*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
5. www.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System.
6. System nawigacyjny Galileo. Aspekty strategiczne, naukowe i techniczne, Wyd. Komunikacji i Łączności, W-wa