



Nawigacja satelitarna

Plan wykładu :

1. Zadania systemów nawigacyjnych
2. Zasady wyznaczania pozycji
3. System GPS Navstar
 - architektura
 - zasady działania
 - dokładność i źródła błędów pomiaru
4. Glonass
5. Różnicowy GPS
6. EGNOS i WAAS
7. Galileo

Satelitarne systemy nawigacyjne

Global Navigation Satellite Systems (GNSS)

Zadania : określanie pozycji i czasu, ew. wielkości pochodnych, np. prędkości



Odbiorniki : cyfrowe mapy i oprogramowanie przetwarzające dane dla potrzeb :

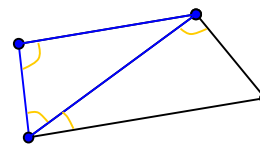
- nawigacji morskiej i lotniczej,
- geodezji,
- turystyki
- prowadzenia pojazdów w miastach

Systemy radiodifuzyjne
-> brak konieczności rejestracji w sieci

Określanie pozycji

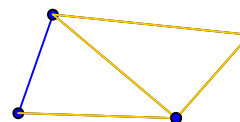
Triangulacja

-> wyznaczanie współrzędnych punktów na podstawie pomierzonych kątów

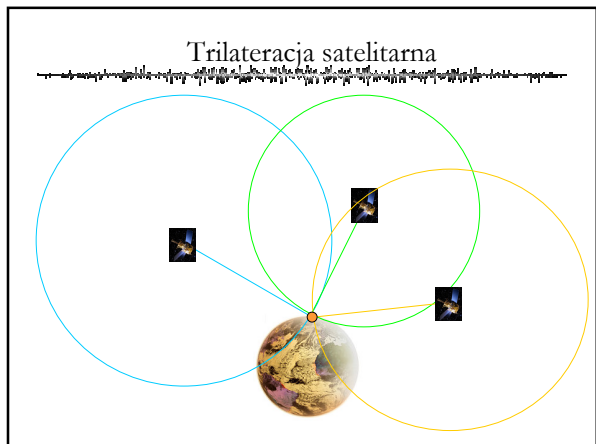


Trilateracja

-> wyznaczanie współrzędnych punktów na podstawie pomierzonych długości odcinków



Trilateracja satelitarna



Obliczanie pozycji odbiornika

$$d = c \cdot T_{\text{transmisji}} \longrightarrow d = c \cdot (T_{\text{szacowany}} + \Delta T)$$

$$d_1 = \sqrt{(x_1 - X)^2 + (y_1 - Y)^2 + (z_1 - Z)^2} + c \cdot \Delta T$$

$$d_2 = \sqrt{(x_2 - X)^2 + (y_2 - Y)^2 + (z_2 - Z)^2} + c \cdot \Delta T$$

$$d_3 = \sqrt{(x_3 - X)^2 + (y_3 - Y)^2 + (z_3 - Z)^2} + c \cdot \Delta T$$

$$d_4 = \sqrt{(x_4 - X)^2 + (y_4 - Y)^2 + (z_4 - Z)^2} + c \cdot \Delta T$$

GPS Navstar

NAVigation Satellite Timing And Ranging

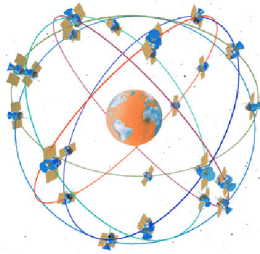
- sfinansowany i utrzymywany przez Departament Obrony USA

The mission of this Program is to:

1. Drop 5 bombs in the same hole, an
 2. Build a cheap set that navigate (< \$
- And don't you forget it!

- pierwsze satelity GPS na orbicie w roku 1978
- system w pełni funkcjonalny - 1995 rok

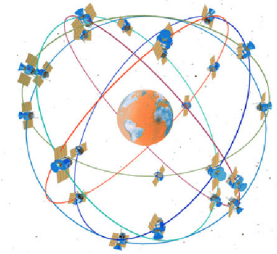
- 3 segmenty systemu : kosmiczny, kontrolny i użytkownika



Architektura Navstar

Segment kosmiczny
(space segment) :

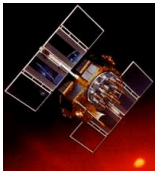
- 24 satelity na 6 orbitach
- wysokość orbit: 20 200 km
- inklinacja: 55°
- z każdego punktu Ziemi widocznych jest jednocześnie przynajmniej 5 satelitów z prawdopodobieństwem 99.96 %



Satelity Navstar

Blok I :

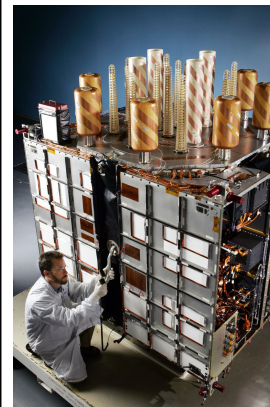
- umieszczane na orbicie w latach 1978 - 1985
- waga : 845 kg
- moc baterii słonecznych : 400 W
- przewidywany czas pracy : 4½ roku



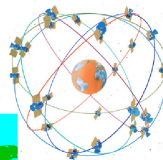
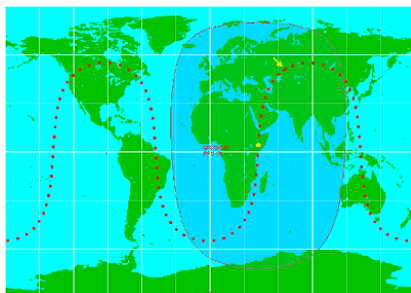
Blok II (II, IIA, IIR, IIR-M, IIF) :

- lata 1989 – 2005
- waga 1.5 – 2 tony
- moc baterii : 750 W
- czas pracy : 7½ roku
- Inter Satellite Links

Navstar IIR-M

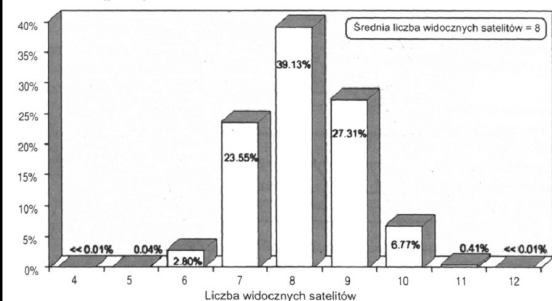


Satelity Navstar



Satelity Navstar

% czasu w ciągu doby



Segment kontrolny (control segment)

- centralna stacja nadzorcza - Colorado Springs
- 4 stacje kontrolne – wysyłanie danych efemeryd do 2 razy na dobę
- 6 dodatkowych stacji monitorujących działających od 2005 roku



Segment użytkownika (user segment)

Odbiornik GPS + oprogramowanie



Odbiornik "Pluggger" - 1993

Odbiornik "Manpack" - 1988



- śledzenie co najmniej 5, a najczęściej 12 satelitów
- mapy cyfrowe, usługi dodatkowe

Ustalanie pozycji i czasu

1. Odbiór informacji z co najmniej 4 satelitów:
 - pozycja każdego satelity
 - poprawki do tej pozycji
 - czas wysłania komunikatu
2. Obliczenia odbiornika:
 - aktualny czas i dokładna pozycja każdego satelity
 - odległość od satelity
 - własna pozycja
3. Operacje dodatkowe
 - obliczanie prędkości
 - wyrysowanie pozycji na mapie, itp.



Ustalanie pozycji i czasu

- Pomiar odległości do satelitów na podstawie czasu propagacji sygnału.
- Pomiar czasu propagacji na podstawie
 - Kodu C/A
 - Kodu P
 - Fazy fali nośnej (pomiar fazowy)
- Pomierzony czas opóźnienia jest podstawą do wyznaczenia pseudoodległości (pseudo, ponieważ zegar w odbiorniku posiada nieznaną błąd)

Częstotliwości sygnałów GPS

Wymagania :

- tłumienie fal EM rośnie z częstotliwością -> częstotliwość nie powinna być wyższa od 2 GHz
- efekty jonosferyczne wykluczają zakresy : $f < 100 \text{ MHz}$ i $f > 10 \text{ GHz}$
- prędkość rozchodzenia się fal EM w powietrzu jest tym mniejsza, im niższa jest częstotliwość fali -> niskie częstotliwości są niekorzystne
- wyższe zakresy częstotliwości to możliwość skorzystania z szerszego pasma -> większej szybkości transmisji
- niekorzystne są te zakresy, gdzie duży wpływ na propagację fal EM mają zjawiska troposferyczne takie jak : zachmurzenie, opady deszczu, śniegu

Transmisja sygnałów GPS

Atomowe zegary pokładowe – cezowe lub rubidowe :

- generują częstotliwość : $f_0 = 10.23 \text{ MHz}$
- stabilność : co najmniej 10^{-13} s

Dwie częstotliwości sygnału:

$$L1 = 1575.42 \text{ MHz} = 154 \cdot f_0 \quad (\text{sygnał SPS})$$

$$L2 = 1227.60 \text{ MHz} = 120 \cdot f_0 \quad (\text{sygnał PPS})$$

w przyszłości : $L5 = 1176.45 \text{ MHz}$



Zegar atomowy z szwajcarskiego muzeum Verkehrshaus

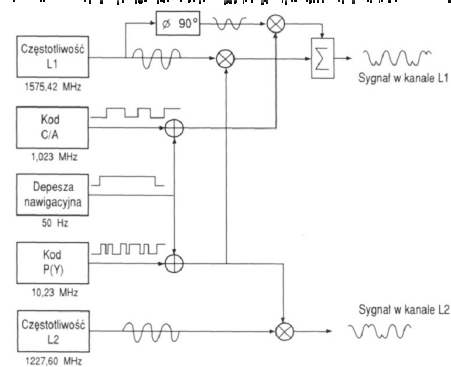
- technika wielodostępu: CDMA
- polaryzacja kołowa prawoskrętna
- moc układów nadawczych satelitów : 50 W
- poziom sygnału odbierany na powierzchni Ziemi : -160 dBW
- przeszkody dla propagacji : zabudowania, gęsty las, woda

Transmisja sygnałów SPS (L1)

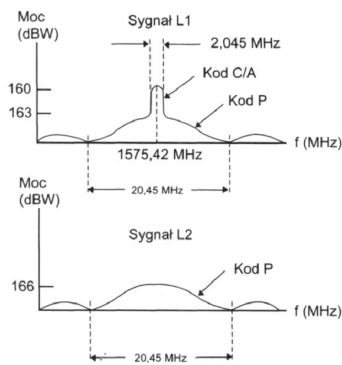
Suma "modulo 2" dwóch sygnałów :

- danych nawigacyjnych pochodzące ze stacji kontrolnych (NAV)
 - > 50 bit/s
- kodu C/A zdefiniowanego przez tzw. Pseudo Random Noise (PRN)
 - > unikalny PRN zawierający 1023 bity dla każdego satelity
 - > 1.023 Mbit/s
- modulacja BPSK, transmisja na nośnej 1575.42 MHz

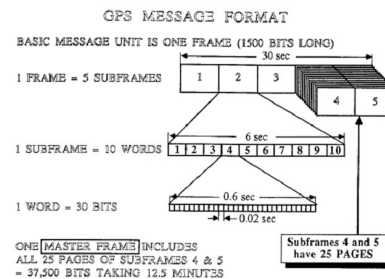
Transmisja sygnałów GPS



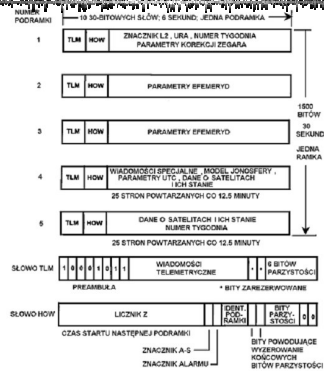
Widmo sygnałów GPS



Transmisja danych w GPS



Transmisja danych w GPS



Źródła błędów pomiaru pozycji

- Wpływ atmosfery
 - Błąd jonosferyczny
 - Błąd troposferyczny
- Wielodrogowa propagacja sygnału
- Efekty relatywistyczne
- Błędy zegarów satelitów
- Błędy położenia satelitów
- Zakłócanie (S/A)

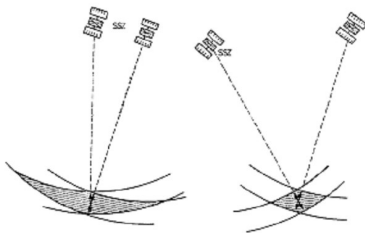
Błąd jonosferyczny

- zakrzywianie linii rozchodzenia się sygnału (satelity niższe niż 5 - 10° nie są obserwowane)
- Opóźnienia sygnału
 - w skrajnych warunkach błąd może dochodzić do 50m
- Opóźnienie można oszacować dokonując pomiarów jednocześnie na obydwu częstotliwościach nośnych.
- Poprawki jonosferyczne są zawarte w depeszy satelitarnej

Błąd troposferyczny

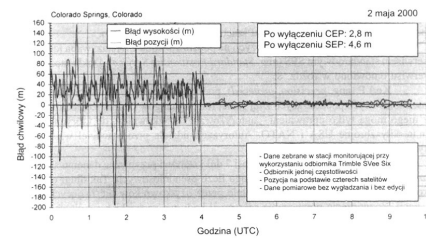
- Współczynnik refrakcji zależny od wysokości – ugięcie toru sygnału
- Opóźnienie sygnału
- Błąd:
 - 2-3 m dla satelity w zenicie
 - 20 m dla satelitów niżej niż 10°

Wpływ geometrii konstelacji



Zakłócanie S/A

- Dodatkowo wprowadzany błąd zegara
- Celowe obniżanie dokładności systemu
- W roku 2000 zaprzestano zakłócania

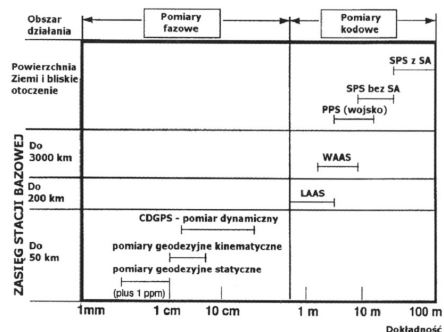


Błędy-podsumowanie

Źródła błędów :

- | | |
|--|-------------|
| - opóźnienia jonosferyczne | ± 7 m |
| - opóźnienia troposferyczne | ± 0.5 m |
| - błąd efermyd (niedokładne dane o położeniu satelity) | ± 2.5 m |
| - niedokładności zegarów satelitów | ± 2 m |
| - propagacja wielodrogowa (odbior sygnałów odbitych) | ± 1 m |
| - niedokładności procedur obliczeniowych | ± 1 m |
| - szумы w transmisji | |
| - Selective Availability (wylączone w maju 2000) | < 100 m |

Błędy-podsumowanie



Dokładność określania czasu i pozycji

Pierwotnie:

SPS - 340 nanosekund, 100 metrów,
156 metrów przy pomiarach trójwymiarowych
PPS - 100 nanosekund, 10 metrów,
27.7 metra przy pomiarach trójwymiarowych

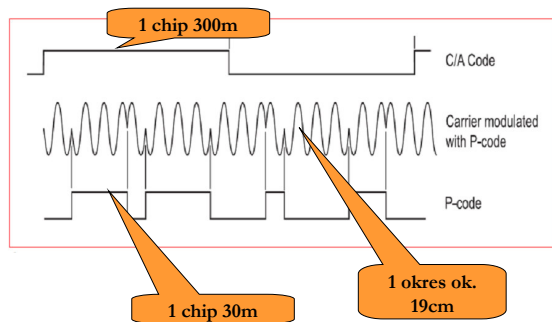
Obecnie:

- śledzenie większej niż 5 liczby satelitów
- wyłączone Selective Availability
-> dokładność około 15 metrów
- z poprawkami różnicowymi EGNOS/WAAS :
-> dokładność 3 - 5 metrów

Zwiększanie dokładności pomiarów

- pomiary różnicowe DGPS
 - systemy bliskiego zasięgu
 - Systemy o zasięgu kontynentalnym
- pomiary na wielu nośnych
- pomiary fazowe
- pomiary geodezyjne – postprocessing danych

Pomiary fazowe -idea



Pomiary fazowe -realizacja

1. Wstępny pomiar pozycji metodą Kodową (np. algorytmem korelacyjnym)
2. Dokładna pozycja pokrywa się z ilością Faz oznaczonych kreskami

Pomiary fazowe -realizacja

3. Pozycja leży w którymś z punktów Przecięcia czoł fali
4. Pojawienie się kolejnych satelitów zmniejsza liczbę potencjalnych przecięć

Pomiary fazowe -realizacja

5. Z upływem czasu konstelacja zaczyna się Obracać wokół docelowego punktu
- A reszta to już tylko odpowiednia obróbka statystyczna

GPS różnicowy (DGPS)

- założenie: podobieństwo błędów na niewielkim obszarze
- korekcja sygnałów satelitarnych przez odbiornik o znanej pozycji
- eliminacja błędów,
poprawa dokładności wyznaczania pozycji: 0.5-2 metry
- zasięg stacji różnicowych: 100 km

Polska: sieci stacji na Śląsku i koło Warszawy,
stacje na Wybrzeżu - Dziwnów i Rozewie

- zastosowania DGPS : nawigacja lotnicza i morską,
pomiar geodezyjne

Inicjatywy europejskie

“When you get a GPS navigation signal, how do you know you can trust it?”

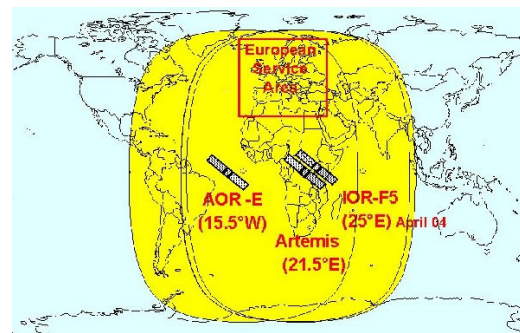
Laurent Gauthier – EGNOS project manager

EGNOS

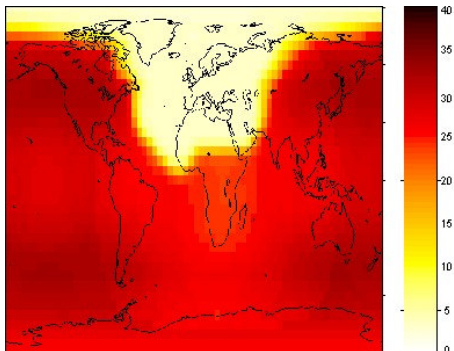


- koncepcja cywilnego systemu nawigacji satelitarnej
- 3 satelity geostacjonarne (15.5°W, 21.5°E i 25°E)
- naziemne stacje pomiarowe i kontrolne
- poprawa dokładności danych z sieci Navstar
- weryfikacja działania Navstar – aplikacje „Safety of Life”
- SISNET -> dane o wiarygodności systemów GPS/GLONASS przez Internet

Satelity EGNOS

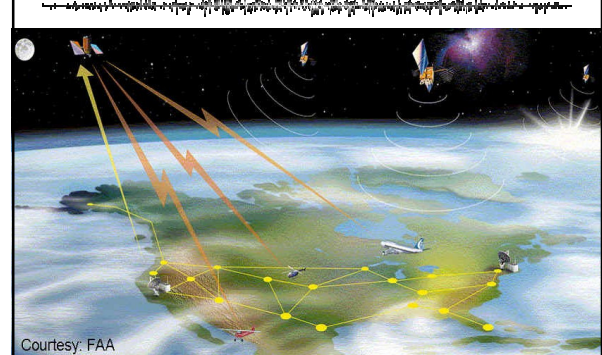


Dokładność danych GPS/EGNOS



WAAS

(Wide Area Augmentation System)



Courtesy: FAA

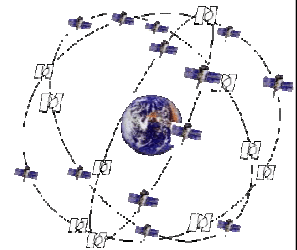
Przyszłość GPS Navstar

- satelity IIR-M i IIF
- druga stacja nadzorcza – Vandenberg Air Force Base, California
- dodatkowe stacje kontrolne – możliwość obserwacji każdego z satelitów z trzech stacji naziemnych jednocześnie
- zwiększona częstotliwość wysyłania danych efemeryd
-> nawet co 15 minut
- dodatkowe sygnały na częstotliwościach L1, L2 i L5
- konstelacja satelitów bloku III – planowana na rok 2030

Glonass

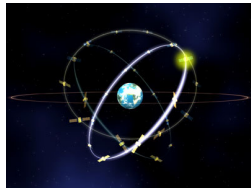
Globalnaja Nawigacjonaja Satelitarnaja Sistemma

- konstrukcja systemu podobna do Navstar :
 - 24 satelity ale na trzech orbitach
 - kanały standardowy i precyzyjny
- technika wielodostępu: FDMA
- początkowo większa dokładność kanału standardowego (60 m, 75 m) niż w Navstar
- współpraca z Unią Europejską
- niekompletna konstelacja



Projekt Galileo

- projekt kontrolowany przez Komisję Europejską i Europejską Agencję Kosmiczną (ESA)
- 30 satelitów – 3 orbity 23 222 km, inklinacja 56°, okres obiegu Ziemi – około 14 godzin
- naziemne stacje pomiarowe i kontrolne
– jedna w CBK w Warszawie

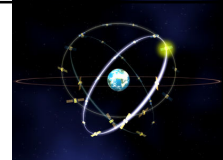


Projekt Galileo

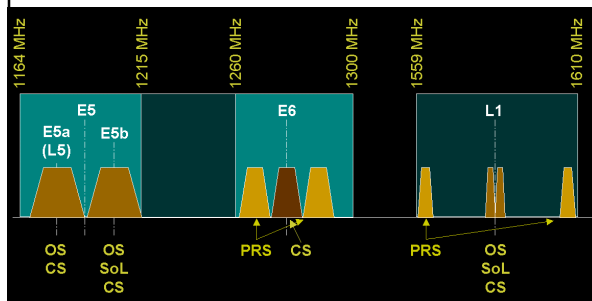
Usługi Galileo :

- Open Service (OS) :
wyznaczanie pozycji z dokładnością ± 15 m lub lepszą, czas ± 30 ns,
- Safety Of Life (SOL) : weryfikacja poprawności działania systemu,
- Commercial Service (CS) : dokładność poniżej 1 metra
- Public Regulated Service (PRS) : poprawa dostępności sygnału

- koszt budowy systemu : 3.2 G€
- koszt rocznego utrzymania : 220 M€
- planowany start systemu – rok 2012



Częstotliwości Galileo



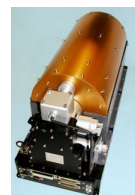
Galileo - testy

Budowa dwóch satelitów :

- Satelita Giove-A
 - zbudowany przez Surrey Satellite Technology Ltd (UK),
 - wystartował 28 XII 2005,
 - 12 I 2006 – naziemny odbiór pierwszych sygnałów,
 - wymiary : 1.3 m x 1.8 m x 1.65 m,
 - masa 600 kg, baterie słoneczne 700 W,
 - dwie częstotliwości sygnału,
 - zegar rubidowy.
- Drugi satelita w budowie (Galileo Industries)



Zegar rubidowy dla satelitów Galileo



Zegar wykorzystujący maser wodorowy

Dziękuję za uwagę