



## 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

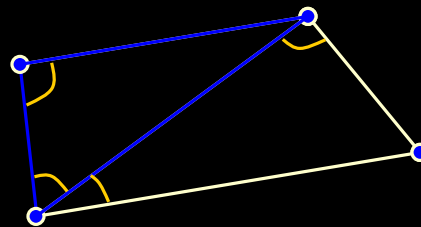
Systemy radiodifuzyjne

-> brak konieczności rejestracji w sieci

## Określanie pozycji

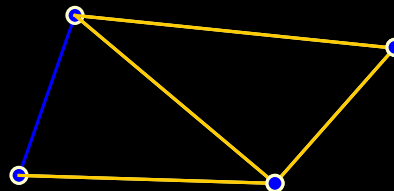
### Triangulacja

-> wyznaczenie współrzędnych punktów na podstawie pomierzonych kątów

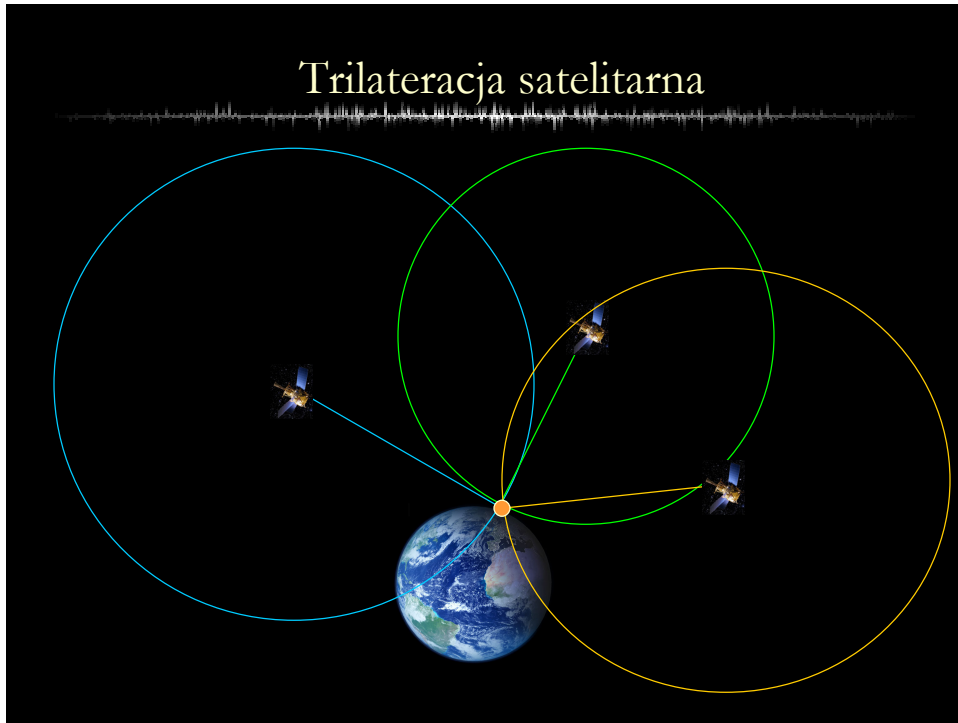


### Trilateracja

-> wyznaczenie współrzędnych punktów na podstawie pomierzonych długości odcinków



## Trilateracja satelitarna



## Obliczanie pozycji odbiornika

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



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

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

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

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



## GPS Navstar

NAVigation Satellite Timing And Ranging

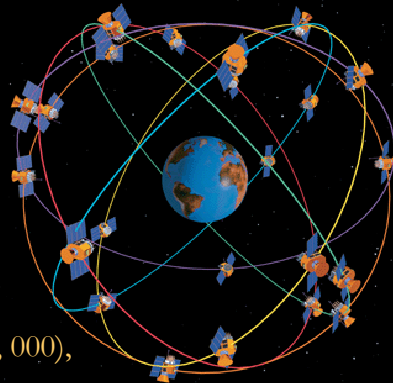
- sfinansowany i utrzymywany przez Departament Obrony USA

The mission of this Program is to:

1. Drop 5 bombs in the same hole, and
2. Build a cheap set that navigate (< \$ 10, 000),  
And don't you forget it!

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

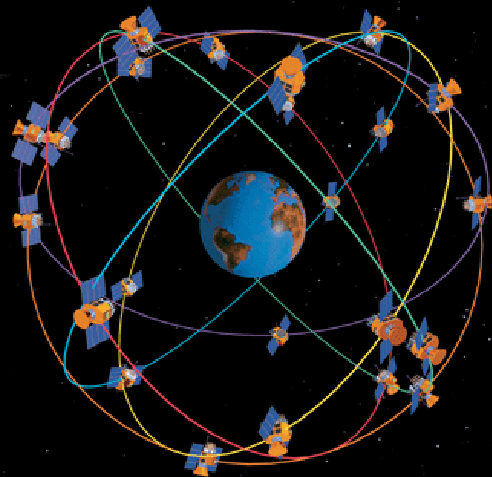
- 3 segmenty systemu : kosmiczny, kontrolny i użytkownika



## Architektura Navstar

Segment kosmiczny  
(space segment) :

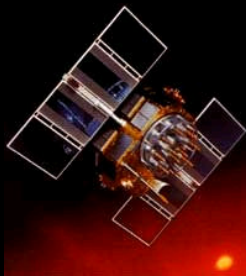
- 24 satelity na 6 orbitach
- wysokość orbit: 20 200 km
- inklinacja: 55°
- z każdego punktu Ziemi widocznych jest jednocześnie przynajmniej 5 satelitów z prawdopodobieństwem 99.96 %



## Satelite Navstar

### Blok I :

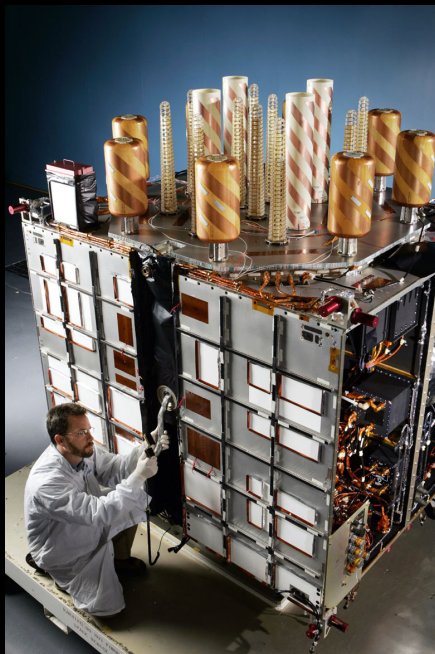
- umieszczane na orbicie w latach 1978 - 1985
- waga : 845 kg
- moc baterii słonecznych : 400 W
- przewidywany czas pracy : 4½ roku



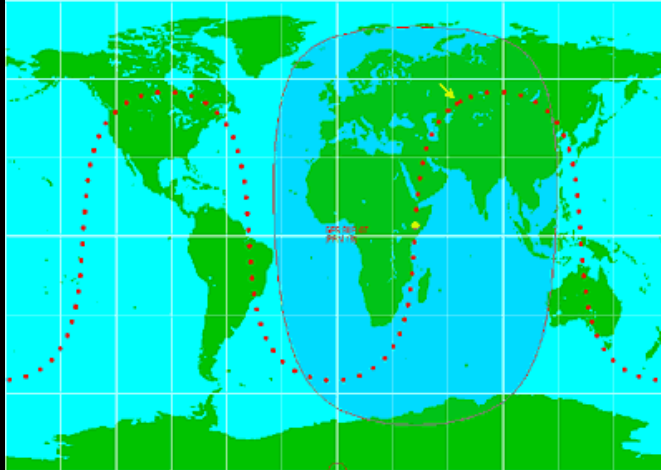
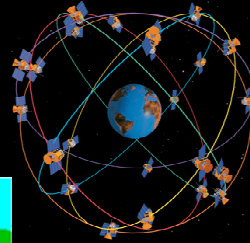
### Blok II (II, IIA, IIR, IIR-M, IIF) :

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

## Navstar IIR-M



# Satelite Navstar



## Segment kontrolny (control segment)

- centralna stacja nadzorcza - Colorado Springs
- 4 stacje kontrolne – wysyłanie danych efermyd 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.



## 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  $10^{-13} \text{ s}$

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 :  $L5 = 1176.45 \text{ MHz}$

- 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



Zegar atomowy z szwajcarskiego muzeum Verkehrshaus



## 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

## Błędy

Źródła błędów :

- |  |             |
|--|-------------|
| - opóźnienia jonosferyczne                             | $\pm 7$ m   |
| - opóźnienia troposferyczne                            | $\pm 0.5$ m |
| - błąd efemeryd (nieokładne dane o położeniu satelity) | $\pm 2.5$ m |
| - niedokładności zegarów satelitów                     | $\pm 2$ m   |
| - propagacja wielodrogowa (odbiór sygnałów odbitych)   | $\pm 1$ m   |
| - niedokładności procedur obliczeniowych               | $\pm 1$ m   |
| - szумы w transmisji                                   |             |
| - Selective Availability (wylączone w maju 2000)       | < 100 m     |

## 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

## 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

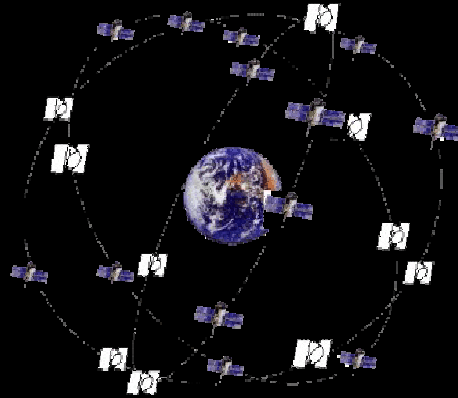
- konstrukcja systemu podobna do Navstar :
  - 24 satelity ale na trzech orbitach
  - kanały standardowy i precyzyjny

- technika wielodostępu: FDMA

- początkowo większa dokładność kanału standardowego (60 m, 75 m) niż w Navstar

- współpraca z Unią Europejską

- niekompletna konstelacja



## 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 morska,  
pomiar geodezyjne

## Inicjatywy europejskie

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

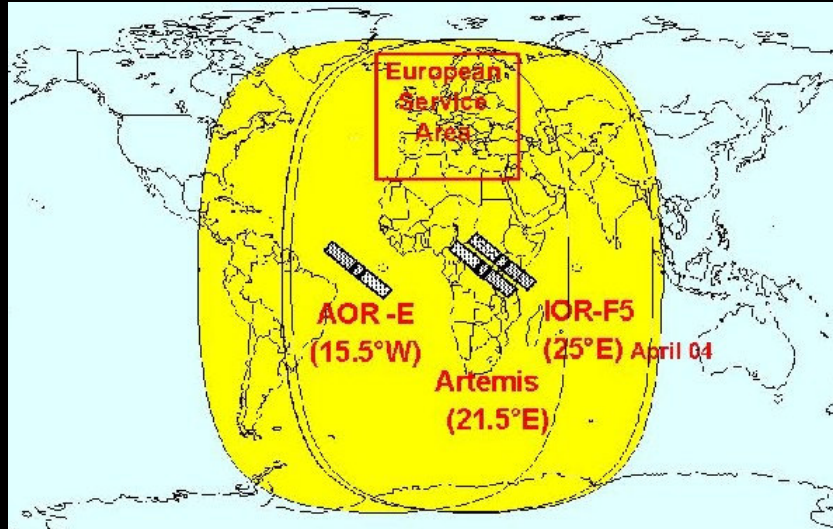
Laurent Gauthier – EGNOS project manager

## EGNOS

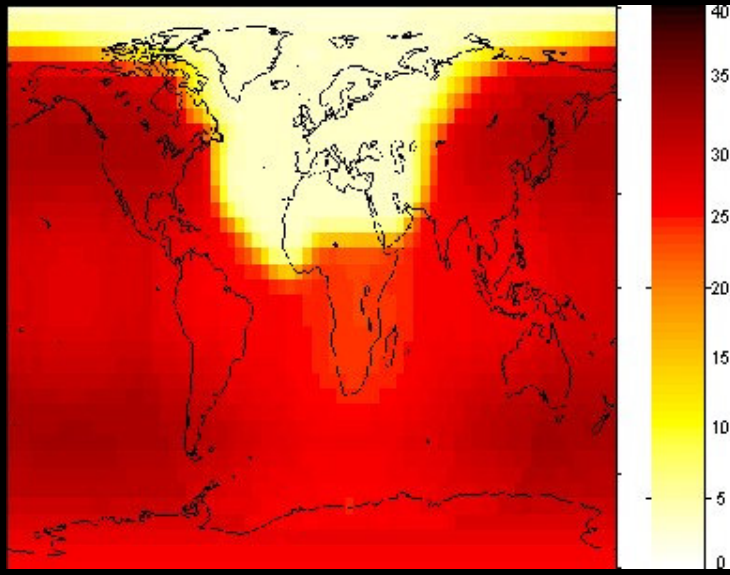


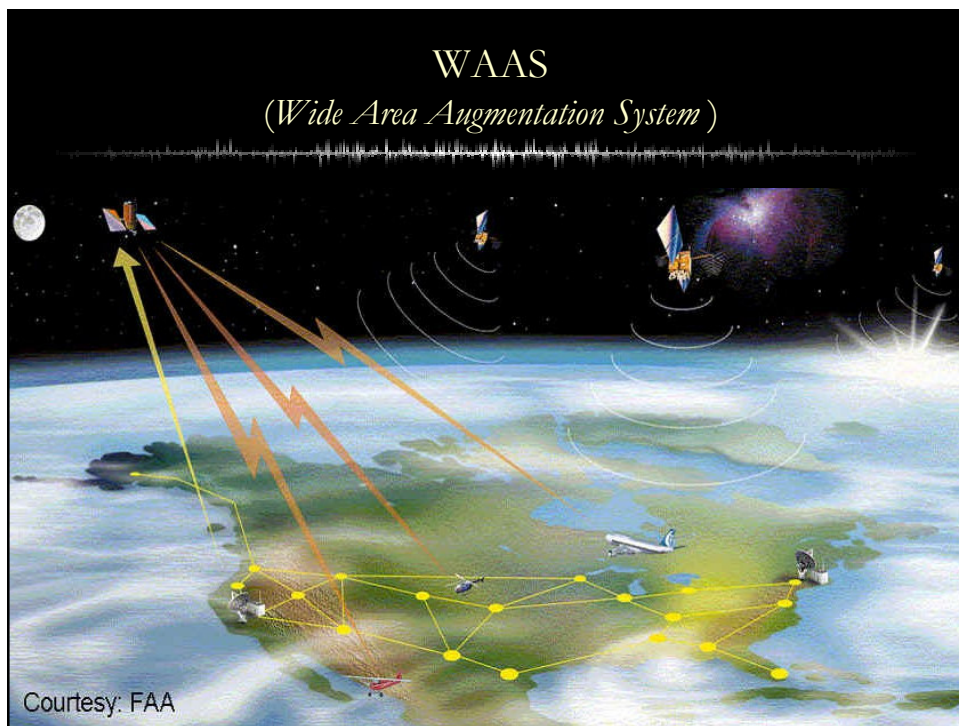
- koncepcja cywilnego systemu nawigacji satelitarnej
- 3 satelity geostacjonarne (15.5°W, 21.5°E i 25°E)
- naziemne stacje pomiarowe i kontrolne
- poprawa dokładności danych z sieci Navstar
- weryfikacja działania Navstar – aplikacje „Safety of Life”
- SISNET -> dane o wiarygodności systemów GPS/GLONASS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

## Satelite EGNOS



## Dokładność danych GPS/EGNOS



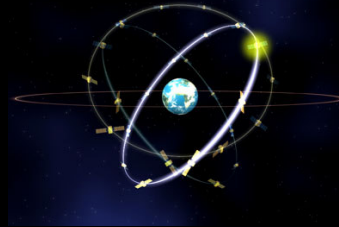


### Projekt Galileo

- 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 z nich w CBK w Warszawie



# Projekt Galileo

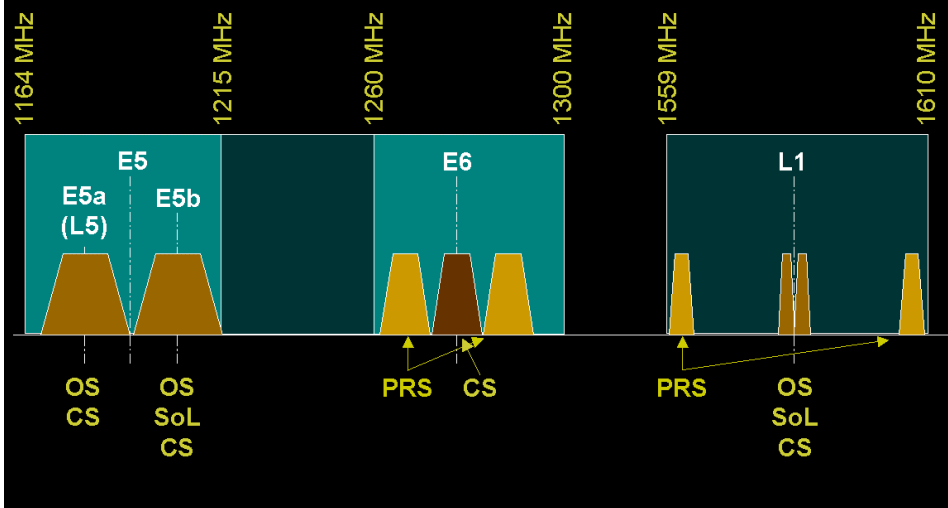


## Usługi Galileo :

- a. Open Service (OS) :  
wyznaczanie pozycji z dokładnością  $\pm 15$  m lub lepszą, czas  $\pm 30$  ns,
- b. Safety Of Life (SOL) : weryfikacja poprawności działania systemu,
- c. Commercial Service (CS) : dokładność poniżej 1 metra
- d. 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 :

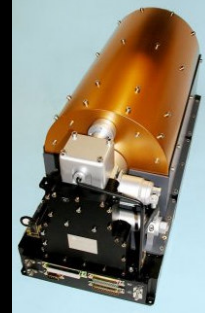
### 1. Satelita Giove-A

- zbudowany przez Surrey Satellite Technology Ltd (UK),
- wystrzelony 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.

### 2. Drugi satelita w budowie (Galileo Industries)



Zegar rubidowy  
dla satelitów  
Galileo



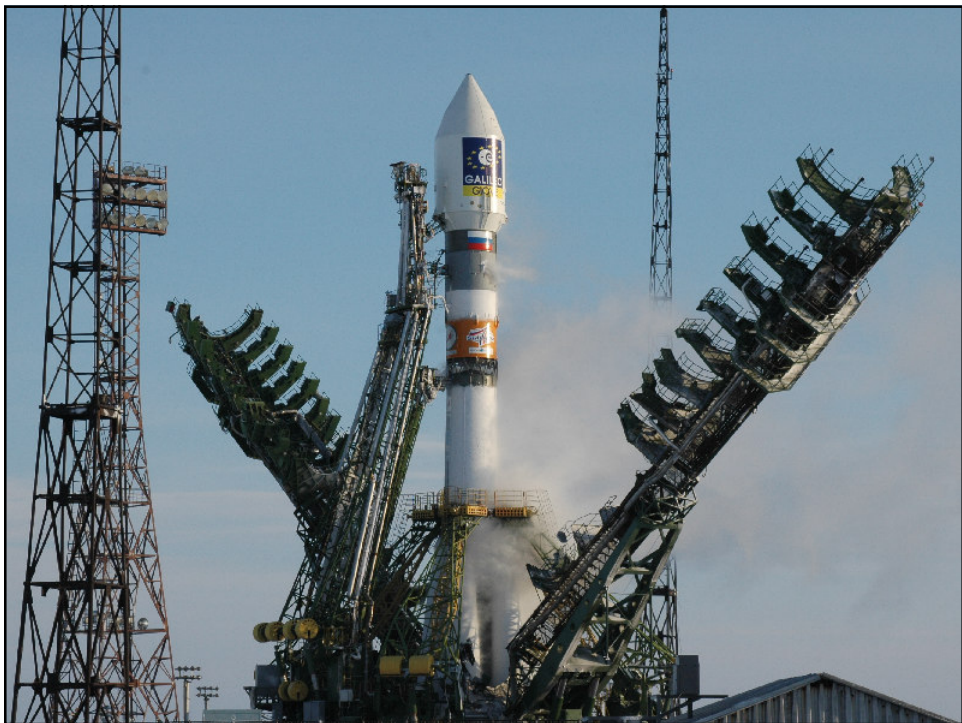
Zegar wykorzystujący  
maser wodorowy

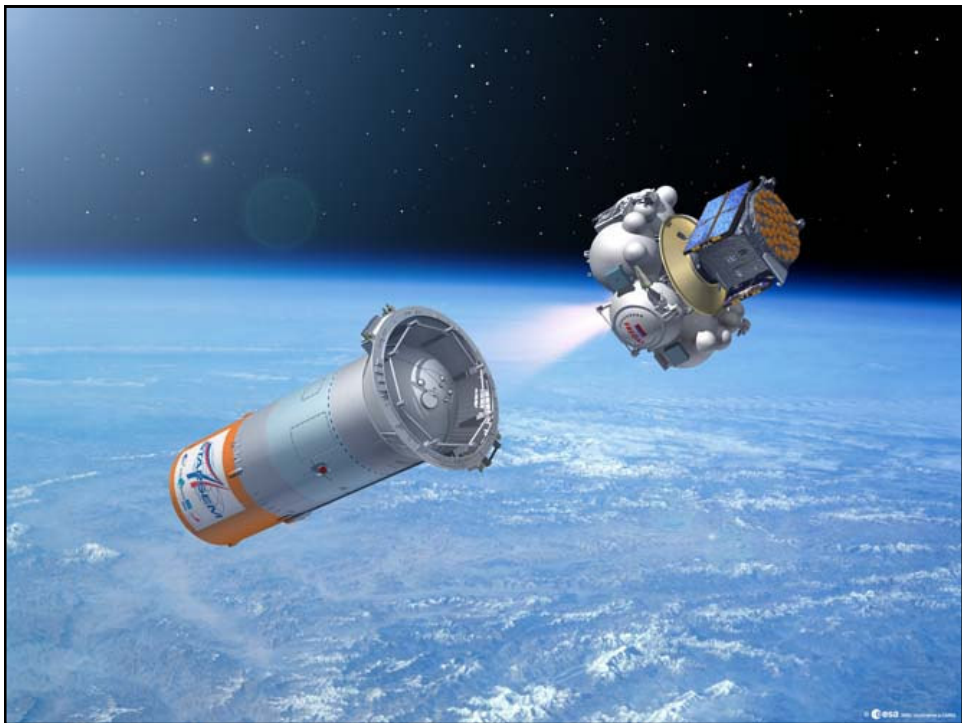


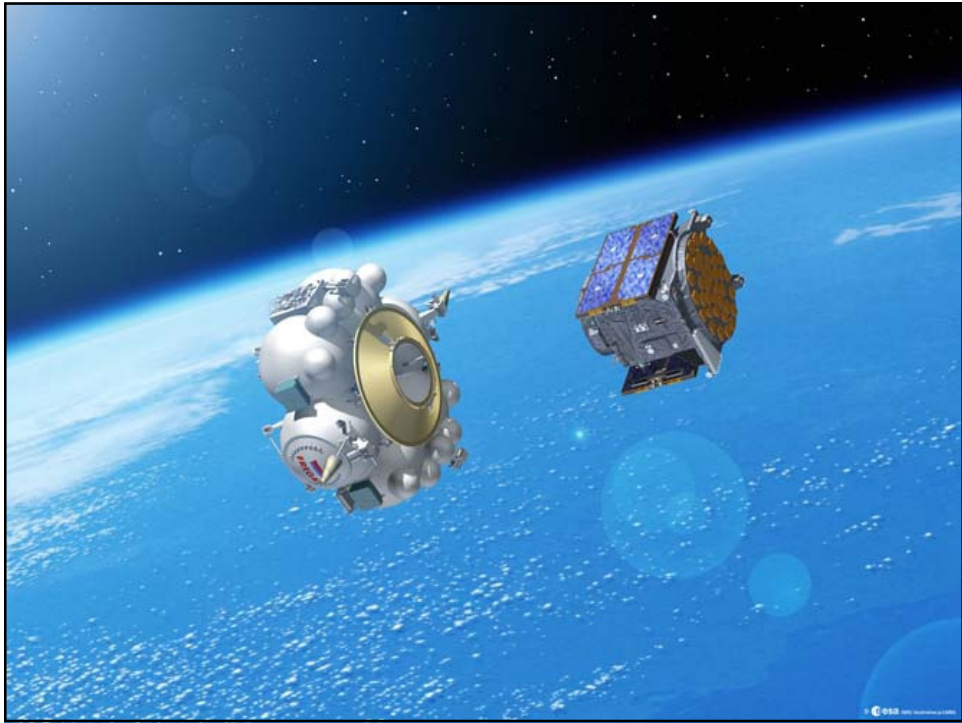














Dziękuję za uwagę