

Technologie mobilne

wykład 3

Nawigacja satelitarna

Global Positioning System

Technologie mobilne

wykład 3

Trochę historii podboju kosmosu

Loty orbitalne – prawdziwa epoka kosmiczna

- 4.10.1957 r. pierwszy sztuczny satelita Sputnik 1 na orbicie (ZSRR)
- 3.11.1957 r. pierwsza misja przewożąca zwierzęta kosmiczne – pies Łajka na pokładzie satelity Sputnik 2 (ZSRR)
- 2.01.1959 r. pierwszy pojazd kosmiczny przewożący ładunek na orbitę – Luna 1 (ZSRR)
- 13.09.1959 r. pierwszy pojazd kosmiczny przewożący ludzi na orbitę – Luna 2 (ZSRR)
- 19.08.1960 r. psy Biełka i Strelka powróciły na Ziemię na pokładzie satelity Sputnik 5 (ZSRR)
- 12.04.1961 r. pierwszy lot człowieka w przestrzeń kosmiczną – Jurij Gagarin na pokładzie pojazdu Wostok 1 (ZSRR)
- 18-19.03.1965 r. pierwszy spacer kosmiczny – Aleksiej Leonow z pokładu Woschod 2 (ZSRR)
- 21.07.1969 r. pierwsi ludzie na Księżycu – Neil Armstrong i Edwin „Buzz” Aldrin misja Apollo 11 (USA)
- 19.04.1971 r. pierwsza stacja kosmiczna na orbicie – Salut 1 (ZSRR)

Technologie mobilne

wykład 3

Trochę historii nawigacji satelitarnej

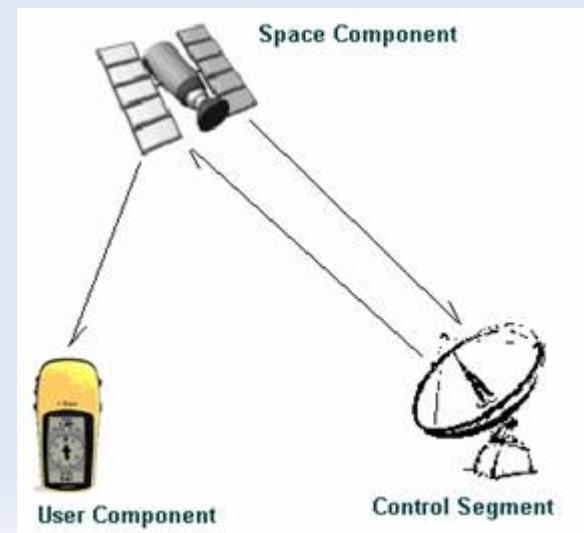
- Pierwszy system nawigacji *Transit* – SATNAV – stworzony w 1958 r. (USA)
 - używany w nawigacji morskiej US Navy
 - pomoc geodezyjna
 - źródło częstotliwości wzorcowej
 - stosowany do końca 1996 r.
- MOSAIC (*Mobile System for Accurate ICBM Control*)
 - miał określać koordynaty ruchomych wyrzutni rakiet Minuteman
 - nigdy nie uruchomiony (zawieszenie prac nad systemem rakietowym)
- SECOR (*Sequential Collation of Range*) - uruchomiony w kwietniu 1964
 - satelitarny system lokalizacyjny i nawigacyjny
 - stworzony na potrzeby wojsk lądowych USA
- CYKADA – pierwszy system nawigacji satelitarnej ZSRR

Technologie mobilne

wykład 3

NAVSTAR-GPS

- W 1973 r. powstaje projekt wszystkich rodzajów sił zbrojnych USA, służb kartograficznych oraz firm prywatnych – tworzony jest NAVSTAR (NAVigation Satellite Timing And Ranging), obecnie bardziej znany jako GPS (Global Positioning System)
 - 31 satelitów NAVSTAR
 - pierwszy satelita wystrzelony 22.02.1978 r.
 - system utrzymywany jest przez rząd USA
 - roczny koszt utrzymania to ok 400 milionów USD
 - od lat 80tych XX w. dostępny dla zastosowań cywilnych
- System składa się z trzech funkcjonalnych segmentów
 - segment satelitarny
 - segment naziemny (kontroli)
 - segment użytkownika

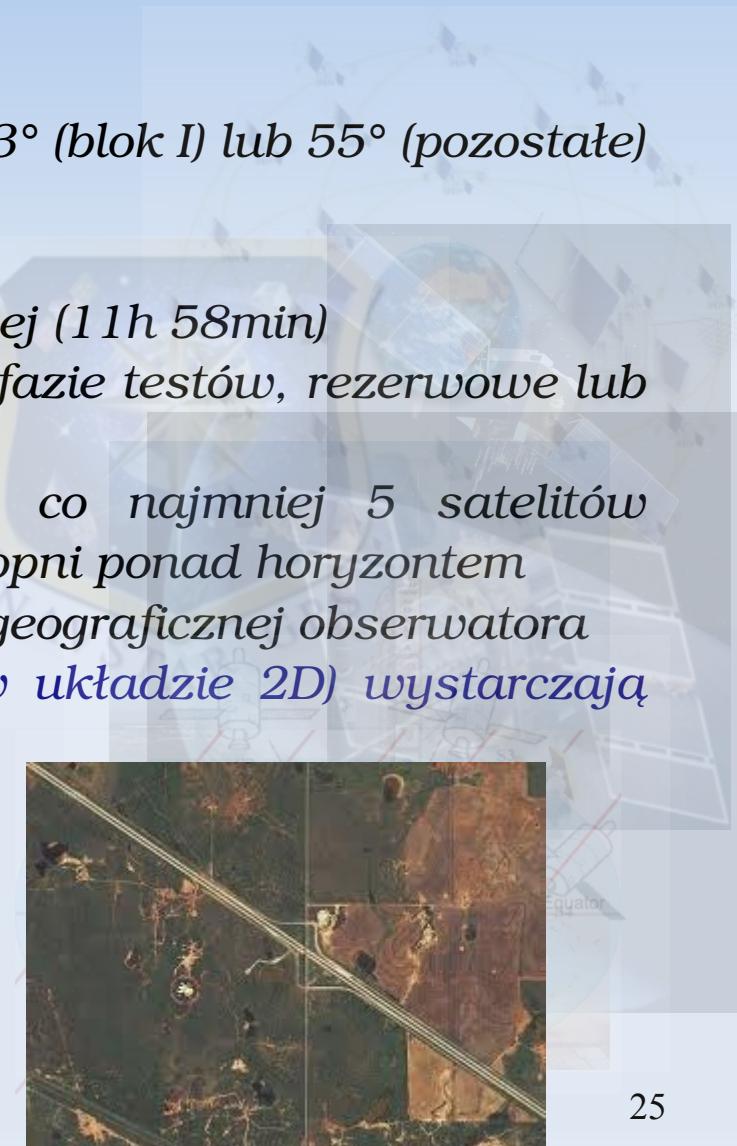


Technologie mobilne

wykład 3

Segment satelitarny NAVSTAR

- Składa się z 31 satelitów (stan z 09.2009 r.)
- Poruszają się po orbitach kołowych o nachyleniu 63° (blok I) lub 55° (pozostałe) względem płaszczyzny równika
- Krążą na wysokości ok. 20183 km
- Obieg Ziemi przez satelitę trwa pół doby gwiazdowej (11h 58min)
- Czynnych jest około 28 satelitów, pozostałe są w fazie testów, rezerwowe lub wyłączone z przyczyn technicznych
- W każdym punkcie Ziemi widać jednocześnie co najmniej 5 satelitów z prawdopodobieństwem 0.9996 i co najmniej 5 stopni ponad horyzontem
- Liczba widocznych satelitów zależy od szerokości geograficznej obserwatora
- Aby wyznaczyć pozycję na powierzchni Ziemi (w układzie 2D) wystarczą 3 satelity, w 3D minimum 4



Technologie mobilne

wykład 3

Segment satelitarny NAVSTAR

Generacje satelitów GPS

- *blok I (SVN1 – SVN11)*
 - pierwsza generacja – obecnie już niewykorzystywana
 - posiadały 3 zegary: 1 cezowy i 2 rubidowe
- *Blok II (SVN12-SVN21)*
 - silny sygnał
 - możliwość działania przez 14 dni bez kontaktu z naziemną stacją kontrolną
- *Blok IIA (SVN22-SVN-40)*
 - zdolność transmisji sygnału zdegradowanego SA i AS
 - możliwość działania przez 180 dni bez kontaktu z naziemną stacją kontrolną
 - posiadały 4 zegary atomowe: 2 cezowe i 2 rubidowe
 - przewidywana żywotność satelity: 9.6 - 10.23 lat

Technologie mobilne

wykład 3

Segment satelitarny NAVSTAR

Generacje satelitów GPS

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

Technologie mobilne

wykład 3

Segment satelitarny NAVSTAR

Budowa satelity NAVSTAR

- System wprowadzania na orbitę - rakieta nośna wprowadza satelitę na orbitę parkingową, w odpowiednim czasie zostaje skierowany na orbitę roboczą
- System kontroli wysokości i prędkości - odpowiedzialny za ułożenie korpusu satelity w odpowiednim położeniu względem Ziemi i Słońca; odpowiada za właściwe ukierunkowanie anten oraz ustawienie paneli słonecznych
- System nawigacyjny - odpowiada za podstawowe funkcje satelity Navstar, czyli generowanie depesz nawigacyjnych
- Atomowe wzorce czasu: dwa rubidowe i dwa cezowe, wzajemnie się synchronizujące
- System śledzenia i kontroli - odpowiedzialny za aktywną lokalizację satelitów, zdalne sterowanie z Ziemi oraz automatyczną kontrolę wewnętrznych systemów satelity; w skład tego podsystemu wchodzą również podzespoły telemetryczne
- System wykrywania wybuchów jądrowych NUDET - służy do wykrywania podstawowych zjawisk towarzyszących wybuchom jądrowym; służą do tego detektor impulsu elektromagnetycznego, radiometr optyczny i wykrywacz promieniowania X

Technologie mobilne

wykład 3

Segment satelitarny NAVSTAR

Budowa satelity NAVSTAR

- System kontroli termicznej - izoluje systemy satelity, by umożliwić im pracę w ekstremalnych warunkach panujących w kosmosie
- Blok zasilania – są to baterie słoneczne oraz akumulatory, które zapewniają zasilanie satelity w cieniu Ziemi

Technologie mobilne

wykład 3

Segment naziemny (kontroli) NAVSTAR

- Składa się z 12 stacji monitorujących
- Główne Centrum kontroli (MCS - Master Control Station) znajduje się w Schriever Air Force Base w Colorado Springs
- 5 stacji jest nadzorowanych przez USAF
- 6 stacji zarządzanych jest przez NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*)



Technologie mobilne

wykład 3

Segment naziemny (kontroli) NAVSTAR

- Zadaniem wszystkich stacji jest ciągłe monitorowanie ruchu satelitów
- Obserwacje są wysyłane do głównej stacji nadzoru, gdzie wyliczane są nowe parametry orbit satelitów
- Prognozowane efemerydy* są wysyłane do satelitów nie rzadziej niż co 48 godzin i przez nie retransmitowane
- Wyznaczanie i wysyłanie korekty zegara satelity
- Maksymalna liczba śledzonych przez każdą stację satelitów to 11
- *Raz w roku satelita jest nieaktywny przez 12 godzin - podlega korekcji położenia*

* efemerydy - dane, najczęściej tabelaryczne, dotyczące przebiegu przyszłego zjawiska astronomicznego, np. pozorne położenie Słońca, Księżyca i planet na niebie w określonym czasie i w określonym miejscu na Ziemi

Technologie mobilne

wykład 3

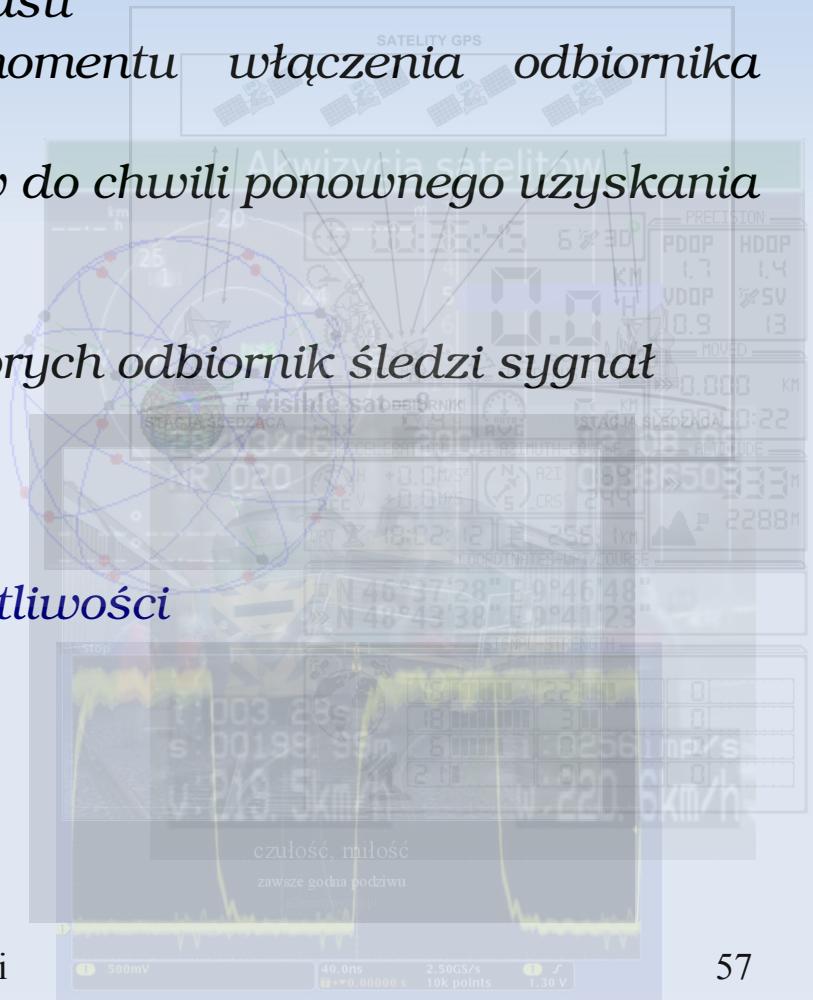
Segment użytkownika NAVSTAR

Podstawowe parametry techniczne odbiornika GPS

- Dokładność wyznaczania pozycji, prędkości i czasu
- Czas akwizycji - czas upływający od momentu włączenia odbiornika do pierwszego wyznaczenia pozycji
- Czas reakwizycji - po zaniku sygnału z satelitów do chwili ponownego uzyskania pozycji
- Liczba śledzonych satelitów
- Maksymalna prędkość i przyspieszenie, przy których odbiornik śledzi sygnał
- Czułość odbiornika
- Odporność na sygnały zakłócające
- Odporność na warunki środowiskowe
- Zegar kwarcowy stanowi wzorzec czasu i częstotliwości



dr inż. Andrzej Kużelewski



Technologie mobilne

wykład 3

Segment użytkownika NAVSTAR

Wybrane zastosowania

- Żeglarstwo, marynarka – nawigacja w praktycznie każdych warunkach
- Wędkarstwo, połowy ryb – zapamiętanie pozycji dobrych połowów
- Sport – planowanie i analiza czasów, prędkości itp. treningów
- Kierowanie pojazdem – wyszukiwanie tras, pozycjonowanie itp.
- Geodezja – wykonywanie dokładnych pomiarów, wyznaczanie podziałów, tworzenie map itp.
- Monitoring zwierząt – zarówno dzikich (gatunki na wymarciu, migracje ptaków), jak i gospodarskich (ustalanie pozycji stada np. w Australii)
- Harcerstwo, turystyka – pozycjonowanie, wyznaczanie marszrut itp.



dr inż. Andrzej Kużelewski

Technologie mobilne

wykład 3

Zasada działania

- Sygnał dociera do użytkownika na dwóch częstotliwościach nośnych
 - $L1 = 1575,42 \text{ MHz}$ (długość fali $19,029 \text{ cm}$)
 - $L2 = 1227,6 \text{ MHz}$ (długość fali $24,421 \text{ cm}$)
- Różnica faz obu sygnałów pozwala na dokładne wyznaczenie czasu propagacji
- Identyfikacja satelitów - podział kodu CDMA (Code Division Multiple Access)
 - wszystkie satelity emitują na tych samych częstotliwościach
 - sygnały są modulowane różnymi kodami
- *Kluczowym elementem jest dokładny pomiar czasu*

Technologie mobilne

wykład 3

Wyznaczanie pozycji użytkownika

Wyznaczenie pozycji użytkownika polega na:

- Odebraniu sygnałów z minimum 3 satelitów
- Wyznaczeniu lokalizacji każdego z satelitów w chwili nadania depeszy nawigacyjnej
- Wyznaczeniu czasu przebiegu sygnałów od każdego z satelitów do odbiornika
- Wyliczeniu pseudoodległości od każdego z satelitów

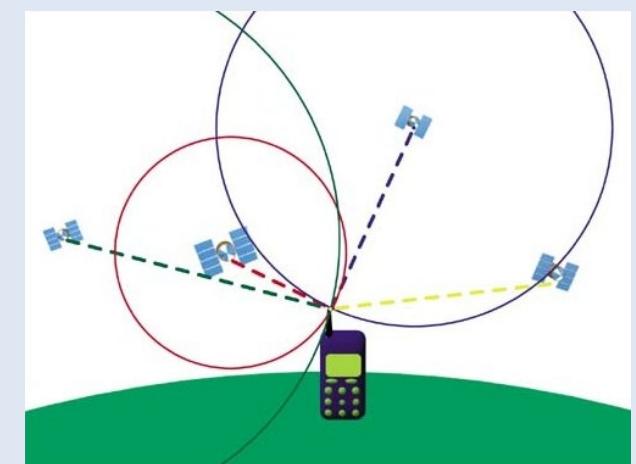
$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = c \Delta t_{ci}$$

x, y, z – pozycja odbiornika

x_i, y_i, z_i - pozycja i-tego satelity

c – prędkość światła w próżni

Δt_{ci} - całkowity czas przebiegu od i-tego satelity



- Wyznaczona wartość nazywana jest pseudoodległością i jest obarczona różnymi błędami

Technologie mobilne

wykład 3

Błędy wyznaczenia pozycji użytkownika

Dzielone są na

- **Błędy naturalne**
 - opóźnienie jonosferyczne - spowodowane opóźnieniem w propagacji fal radiowych przy przejściu przez jonosferę; szacowane jest na ok. 20 metrów w dzień i 3-5 metrów w nocy
 - opóźnienie troposferyczne - spowodowane zmianami temperatury, ciśnienia i wilgotności w dolnych warstwach atmosfery; szacowane na mniej niż 3 metry
- **Błędy techniczne**
 - błąd efemeryd - spowodowany różnicą w położeniu satelity pomiędzy danymi wyliczonymi, a pozycją rzeczywistą
 - błąd zegara satelity - spowodowany różnicą pomiędzy wskazaniem zegara satelity, a globalnym czasem GPS
 - błąd wielodrogowości - spowodowany dotarciem do anteny sygnałów odbitych od obiektów otaczających
 - błąd odbiornika - ich powodem mogą być: szum, dokładność oprogramowania, zakłócenia lokalne (nadajniki radiowe, telefony komórkowe i inne)
 - Selective Availability

Technologie mobilne

wykład 3

Błędy wyznaczenia pozycji użytkownika

Poziomy dokładności

- *Dokładny system nawigacji PPS (Precise Positioning System)*
 - wykorzystuje częstotliwości L1 i L2
 - początkowo dodatkowe kodowanie sygnału P (korzystało tylko wojsko)
 - obecnie korzysta armia USA, NATO, autoryzowani użytkownicy cywilni i wybrane agencje
 - dokładność: 2D 10 m, 3D 27,7 m, czasu 100 ns
- *Standardowy system nawigacji SPS (Standard Positioning System)*
 - wykorzystywana tylko częstotliwość L1
 - wykorzystywana powszechnie przez użytkowników całego świata
 - bezpłatna
 - dokładność: 2D 15 m, 3D 156 m, czasu 340 ns

Technologie mobilne

wykład 3

Różnicowy GPS

DGPS (Differential Global Positioning System)

- Dokładność cywilnej wersji GPS jest niewystarczająca w
 - precyzyjnych pomiarach geodezyjnych
 - wsparciu dla niewidomych
 - w nawigacji przybrzeżnej
 - wspomaganiu lądowań samolotów
- Duża koncentracja błędów na znacznym obszarze
- W miejscu o dokładnie znanych współrzędnych – stacja referencyjna wyposażona w wysokiej jakości odbiornik GPS
- Na podstawie sygnałów z satelity NAVSTAR wyznacza pozycję i na jej podstawie wylicza poprawkę referencyjną
- Poprawka jest wysyłana do odbiorników w terenie (najczęściej radiowo)
- Odbiorniki uwzględniają poprawkę – duża dokładność lokalizacji



Technologie mobilne

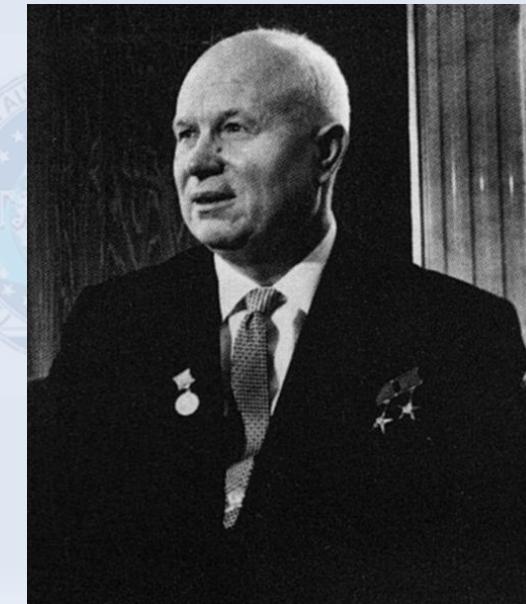
wykład 3

GLONASS

- GLObalnaja NAwigacionnaja Sputnikowaja Sistemi - powołany do życia 1.12.1976, dekretem Komitetu Centralnego Partii Komunistycznej i Rady Ministrów Związku Socjalistycznych Republik Radzieckich
- Rozpoczął pracę 12.10.1982 r.
- Pełna gotowość 1.01.1996 r.
- Planowane pełne obsadzenie satelitami – do końca 2010 r.
- Informacje o systemie są dużo mniej znane w porównaniu z GPS – nawiąz historyczny



dr inż. Andrzej Kużelewski

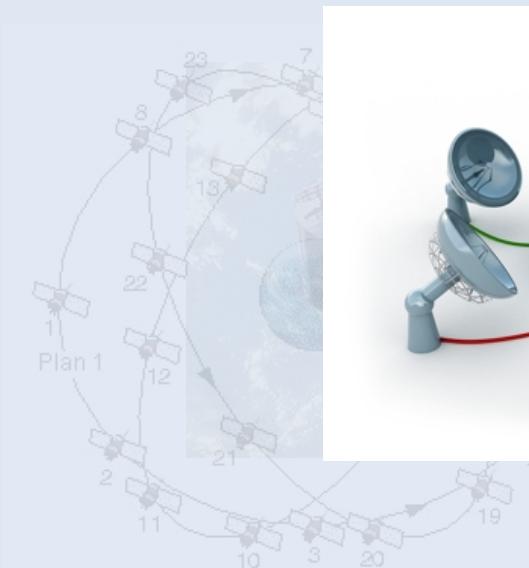


Technologie mobilne

wykład 3

GLONASS – segment kosmiczny

- Z założenia składa się z 24 satelitów (8.04.2010 r. 21 operacyjnych, 2 rezerwowe)
- Pełne obsadzenie satelitami ma być osiągnięte do końca 2010 roku
- Nachylenie orbit $64,8^\circ$ - lepsze pokrycie okolic podbiegunowych (ważne dla okrętów marynarki rosyjskiej)
- Orbita prawie kołowa, wysokość 19100 km
- Okres obiegu Ziemi 11,25 h
- Co 17 okrążeń każdy satelita pojawia się nad tym samym punktem na Ziemi



dr inż. Andrzej Kużelewski

Technologie mobilne

wykład 3

GLONASS – segment kosmiczny

- *Charakterystyka sygnału*

- każdy satelita transmituje sygnał na innej częstotliwości
 - częstotliwości L1:

$$f_{L1} = 1,602 \text{ MHz} + k * 0,5625 \text{ MHz}$$

$k=1,2,\dots,12$ - w latach 1998-2005

$k=-7\dots+6$ po 2005 roku

- częstotliwości L1 i L2 są związane zależnością

$$f_{L1} / f_{L2} = 9 / 7$$

- pomiar na dwóch częstotliwościach usuwa błąd jonosferyczny (PPS)
 - wszystkie satelity transmitują taki sam kod (FDMA)
 - każdy satelita nadaje swoją precyzyjną pozycję na pełne pół godziny
 - sygnały czasu są odniesione do systemu czasu UTC_{SU} (uniwersalny czas koordynowany byłego Związku Radzieckiego)
 - system nie stosuje żadnych zakłóceń
 - dokładność (SPS): pozioma 57-70 m, pionowa 70 m, prędkość 15 cm/s

Technologie mobilne

wykład 3

GLONASS – segment naziemny

- Główna stacja kontrola w Moskwie
- 5 stacji monitorujących: w Rosji (Sankt Petersburg, Jenisejsk, Komsomołsk nad Amurem), Tarnopol na Ukrainie, Neustrelitz w Niemczech
- Centralnego zegar systemu
- System monitoringu sygnału nawigacyjnego

Technologie mobilne

wykład 3

GLONASS – segment użytkownika

- Dość słabo rozwinięty (w porównaniu z GPS)
 - zwykłe odbiorniki produkcji rosyjskiej
 - większość typu wojskowego lub morskiego
 - niektórzy producenci zachodni rozpoczęli produkcję odbiorników uniwersalnych GPS+GLONASS



dr inż. Andrzej Kużelewski

Technologie mobilne

wykład 3

GALILEO

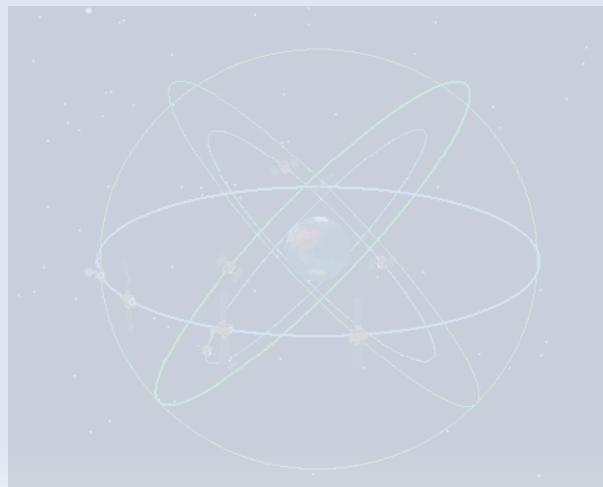
- Europejski cywilny system niezależny od wojskowych GPS i GLONASS
- Geostacjonarne satelity różnicowe
- Segment satelitarny
 - 30 satelitów (27 operacyjnych, 3 zapasowe)
 - wysokość orbity 23616 km
 - nachylenie orbity (kąt inklinacji) 56°
 - transmisja: danych pozycyjnych, dokładnego czasu, informacji o wiarygodności danych, informacji o awariach
- Pełną operacyjność założono na 2012 rok – już teraz wiadomo, że się nie uda

Technologie mobilne

wykład 3

Beidou (Wielka Niedźwiedzica) - Compass

- Chiński system – skąpe informacje, to za mało powiedziane
- Docelowo globalny system 35 satelitów: 5 geostacjonarnych, 30 na orbitach o średniej wysokości
- Dokładność lokalizacji użytkowników cywilnych ok. 10 m, prędkości 20 cm/s
- Służy do
 - nawigacji
 - świadczenia usług telekomunikacyjnych
 - monitoring pogody
 - może czegoś jeszcze?



dr inż. Andrzej Kużelewski

