

prof. dr hab. inż. Jacek Matyszkiewicz
KATEDRA ANALIZ ŚRODOWISKOWYCH, KARTOGRAFII I GEOLOGII
GOSPODARCZEJ

Kartografia - wykład

Systemy nawigacji satelitarnej
i ich wykorzystanie w kartografii

Systemy nawigacji satelitarnej – historia (początki)

1957 – Sputnik – (ZSRR) „towarzysz podróży”, pierwszy sztuczny satelita Ziemi;



Systemy nawigacji satelitarnej – historia (początki)

1958 – Explorer I – (USA) pierwszy amerykański satelita w kosmosie;



Systemy nawigacji satelitarnej

- **1973 – NAVSTAR GPS** (Navigation Signal Timing and Ranging – Global Positioning System) – (USA)
Departament Obrony podejmuje decyzje o połączeniu programów militarnych US Navy – TIMACTION oraz US Air Force – 621B w celu stworzenia NAVSTAR GPS;
- **1978 – NAVSTAR GPS** – (USA)
wystrzelenie pierwszego satelity.

17 lipiec 1995 r. – pełna operacyjność systemu



Systemy nawigacji satelitarnej

1994 – NAVSTAR GPS –
(USA) osiągnięcie pełnej
zdolności operacyjnej

2000 – NAVSTAR GPS –
wyłączenie zakłócania
sygnałów GPS (SA)

SA (Selective Availability) – od roku 1996
do 1 maja 2000 zakłócenie polegające na celowym
obniżeniu dokładności GPS, wyznaczenie położenia
z dokładnością do 100 m.



Systemy nawigacji satelitarnej

Struktura systemu

System składa się z trzech segmentów:

- **Kosmicznego** (satelity nadające sygnał GPS)
- **Naziemnego** (stacje naziemne, koordynacja czasu GMT *Greenwich Mean Time*)
- **Użytkownika** (odbiorniki GPS)

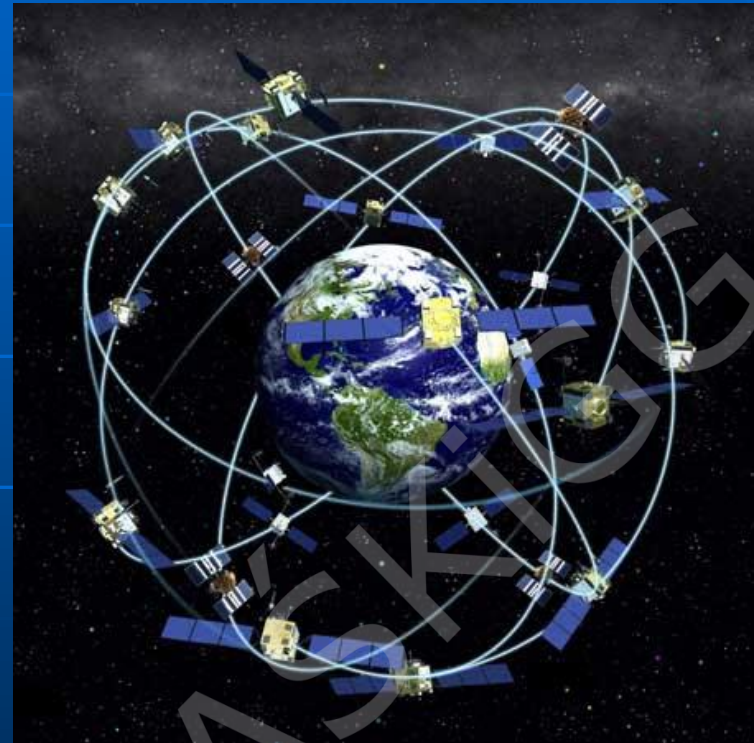


Systemy nawigacji satelitarnej

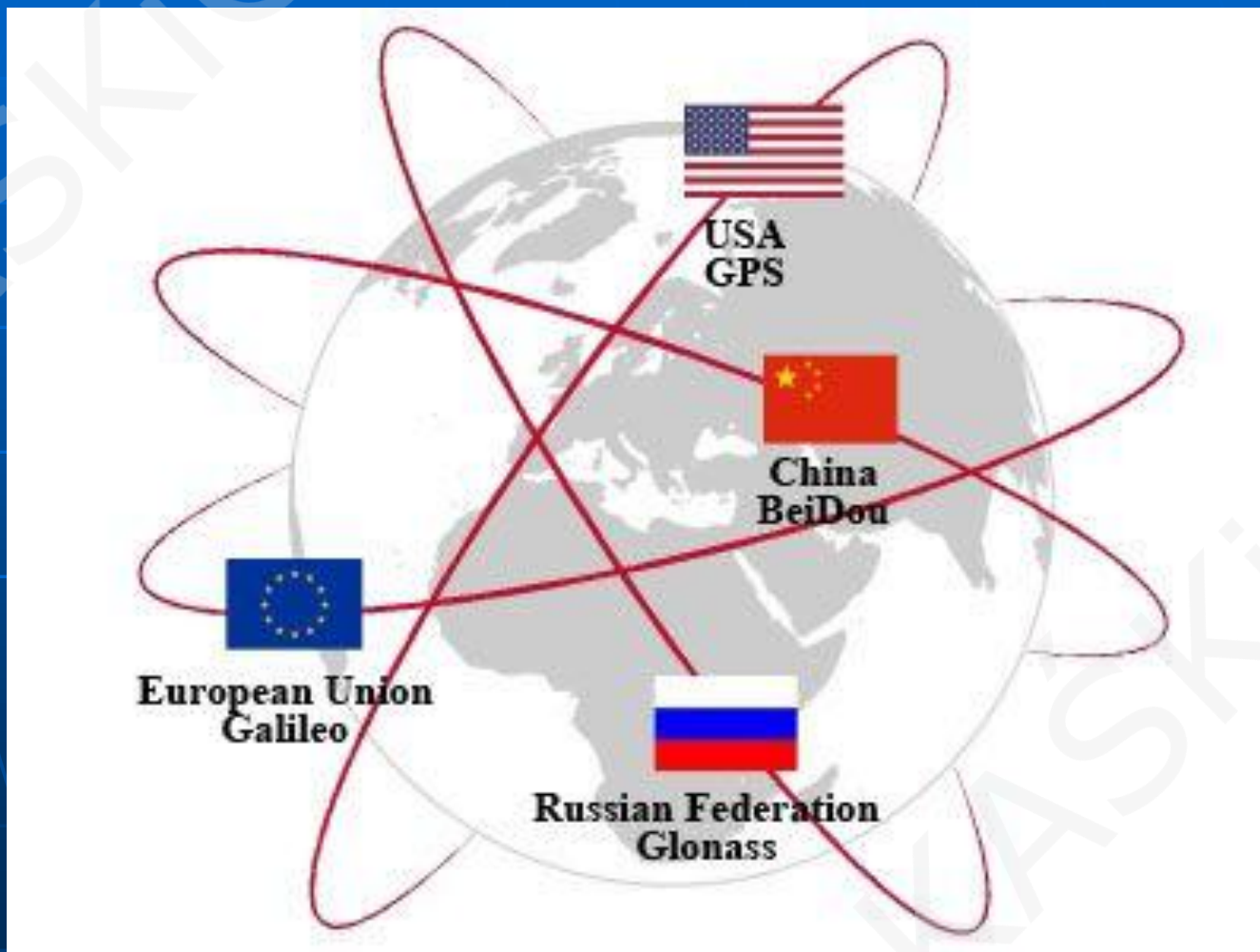
NAVSTAR GPS dziś:

- 24 h, ogólnoswiatowy zasięg;
- duża dokładność, określenie pozycji 3D;
- określanie prędkości poruszania się obiektu;
- określanie dokładnego czasu;
- jednolity układ współrzędnych dla całego świata WGS 84.

Aktualna liczba satelitów: 31



Systemy nawigacji satelitarnej



Systemy nawigacji satelitarnej

Global Navigation Satellite System

Symmetricon®

GNSS	GPS	GLONASS	GALILEO	COMPASS (Beidou2)
Country	 	 	 	
Satellites + Spare (Plan)	27 + 3 (1993)	21 + 3 (2012)	26 + 4 (201x)	30 + 5 GEO (2015)
Satellites in Constellation	31 (2009)	19 (2009) 24 (2012) 3Y	2 (2009) 4 (2011) 2Y 18 (2013) 4Y	2(2009) 12 (2011) 2Y 30 (2015) 6Y
Orbital height	20180 km	19100 km	23222 km	21500 km
Orbital period	11:58 h	11:15 h	14.05 h	12:35 h
System Control	Military	Military	Civil	Military
Timing Services	Yes	Yes	Yes	Yes
Clocks	Cs, Rb	Cs	PHM, Rb	Rb
TimeScale	TAI-19	UTC-3 hours	TAI	
Time Offset transmission	GGTO GPS/Galileo Time Offset		GGTO GPS/Galileo Time Offset	
Open service / 95%	100 ns	100 ns	30ns	50ns
Open service / 95%	28m		35m	50m

RNSS Regional Navigation Satellite Systems: QZSS (Japan), IRNSS (India) and Beidou1 (China)

Systemy nawigacji satelitarnej

1982 – GLONASS (Globalna Nawigacyjna Satelitarna Sistiema) – (ZSRR) wystrzelenie pierwszych trzech satelitów.

Docelowa konfiguracja systemu GLONASS:

- **24 aktywne orbitujące satelity (30),**
- **3 kołowe płaszczyzny orbitalne,**
- **wysokość 19,100 km,**
- **nachylenie 64,80 stopnia.**

Systemy nawigacji satelitarnej

GLONASS – status konstelacji (na dzień 5 maja 2016):

- 28 sprawnych satelitów na trzech orbitach;
- **8 grudnia 2011 r.** pełna operacyjność systemu



Systemy nawigacji satelitarnej



Systemy nawigacji satelitarnej



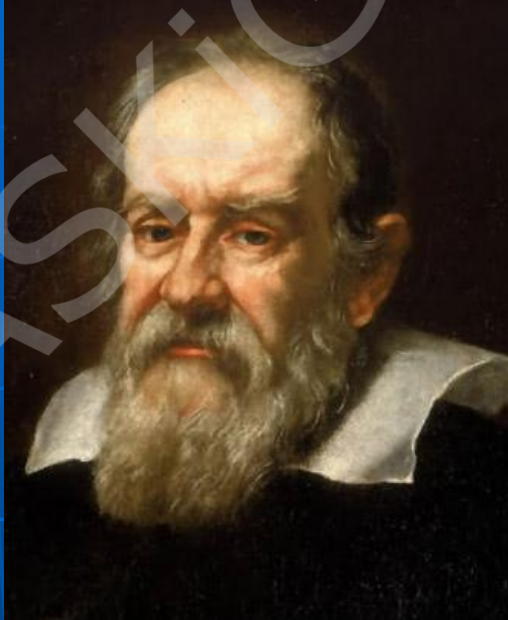
Systemy nawigacji satelitarnej

W latach osiemdziesiątych w Europie zrodził się pomysł budowy własnego systemu nawigacyjnego.

Główną przyczyną był brak zaufania do istniejących systemów, które mogły być w każdej chwili wyłączone lub zakłócone przez ich właścicieli - Departament Obrony USA i Ministerstwo Obrony ZSRR (później Rosji) oraz ograniczona dokładność tych systemów.

Miał on być równoważną alternatywą dla amerykańskiego systemu NAVSTAR GPS i rosyjskiego GLONASS, lecz w przeciwieństwie do nich, kontrolowany przez instytucje cywilne.

Systemy nawigacji satelitarnej



Galileo

(GNSS Global Navigation Satellite System)

**Wspólna inicjatywa Unii Europejskiej
i Europejskiej Agencji Kosmicznej**

Systemy nawigacji satelitarnej

Docelowo:

- **30 satelitów** na trzech orbitach (w tym 3 zapasowe);
- **2 centra kontrolne**, zlokalizowane na terenie Europy (GALILEO Control Centers);
- **światowa sieć stacji Up-link** – transfer danych do i od satelitów;
- **stacje nadzoru** – rozmieszczone na całym globie, monitorują jakość sygnału do GCC (integracja informacji).

Systemy nawigacji satelitarnej

Galileo

Kraj rozwijający system: Unia Europejska

Docelowa liczba satelitów: 30

15.12.2016 r. – inicjalna operacyjność pierwszych usług systemu

Stan na 01.01.2017 r. – 18 satelitów

2020 r. – pełna operacyjność systemu



Systemy nawigacji satelitarnej



Galileo

Fazy rozwoju systemu Galileo

1. Faza definiowania systemu (1999-2000)

2. Faza rozwoju systemu (2001-2008)

- zestawienie wymogów misji
- rozwój satelitów i komponentów naziemnych
- atestacja systemu na orbitach

28 grudnia 2005 r. umieszczenie prototypu satelity na orbicie

Galileo

Fazy rozwoju systemu Galileo

3. Faza rozwoju (2008-2012)

- konstrukcja i uruchomienia satelitów
- kompletna instalacja segmentu naziemnego

4. Faza użytkowania i komercyjnego działania (od 2012 roku)

15.12.2016 r. – działanie systemu

Aktualna liczba satelitów: 18
(stan na 1 stycznia 2017 r.)

Galileo

Segment kosmiczny

- 30 satelitów, 3 orbity; Inklinacja orbity: 56° ; Wysokość orbity: 23 616 km; Okres obiegu Ziemi: 14 godzin 21 min; promień orbity większy niż w GPS – dobra jakość systemu pomiarowego



Galileo

Segment naziemny

2 niezależne komponenty

- **GCS (Ground Control System)**
podsystem kontroli satelitów

utrzymywanie konstelacji i kontrolowanie stanu technicznego wszystkich satelitów, opracowywanie strategii ich napraw, ciągłe zarządzanie systemem w celu jego poprawnego funkcjonowania

- **MCS (Mission Control System)**
podsystem kontroli całości misji systemu

konserwacja serwisów oferowanych przez system, monitorowanie jego funkcjonowania, analizowanie emitowanych przez satelity sygnałów oraz rozprzestrzenianie danych systemu

Galileo

System użytkownika

- eksploatacja stworzonego systemu (odbiorniki Galileo)



Galileo

Zalety:

- Lepsza dokładność (1 m – zwykłe zastosowania; 10 cm – komercyjne zastosowania, płatne)
- Mocniejszy sygnał (w budynkach, tunelach, wysokich górach)

Systemy nawigacji satelitarnej

BeiDou Navigation Satellite System – BDS

(do 2012 r. Compass)

Kraj rozwijający system: Chiny (2017 r. - planowane ogłoszenie operacyjności)

System obejmuje całe Chiny oraz część Azji Południowo-Wschodniej.

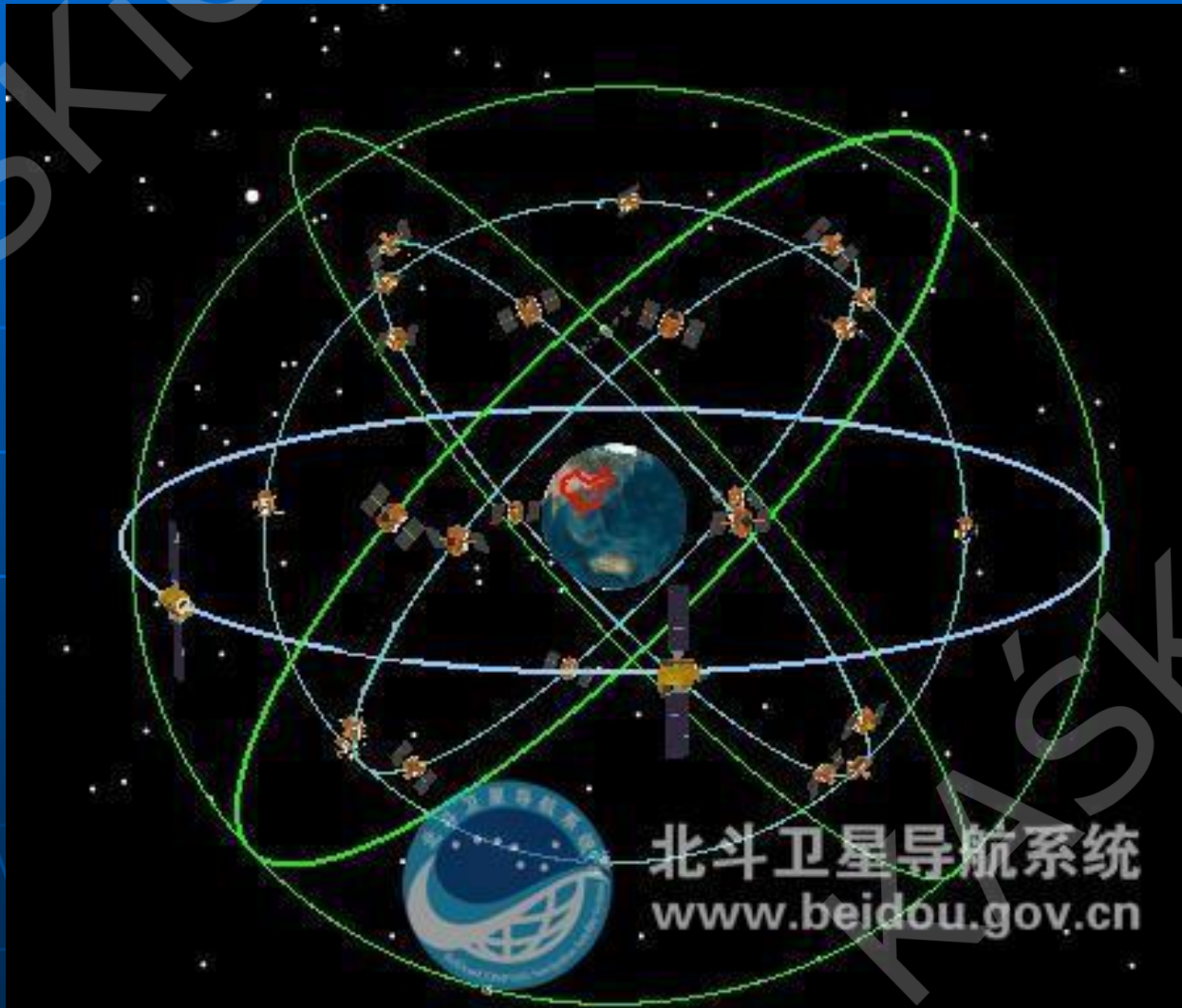
Docelowa liczba satelitów: 35

Stan na 05.05.2016 r. – 22 satelitów

Od 2020 r. zasięg na cały świat



Systemy nawigacji satelitarnej



Systemy nawigacji satelitarnej

IRNSS

(Indian Regional Navigational Satellite System)

Kraj rozwijający system: Indie, projekt uchwalony w 2006 r.

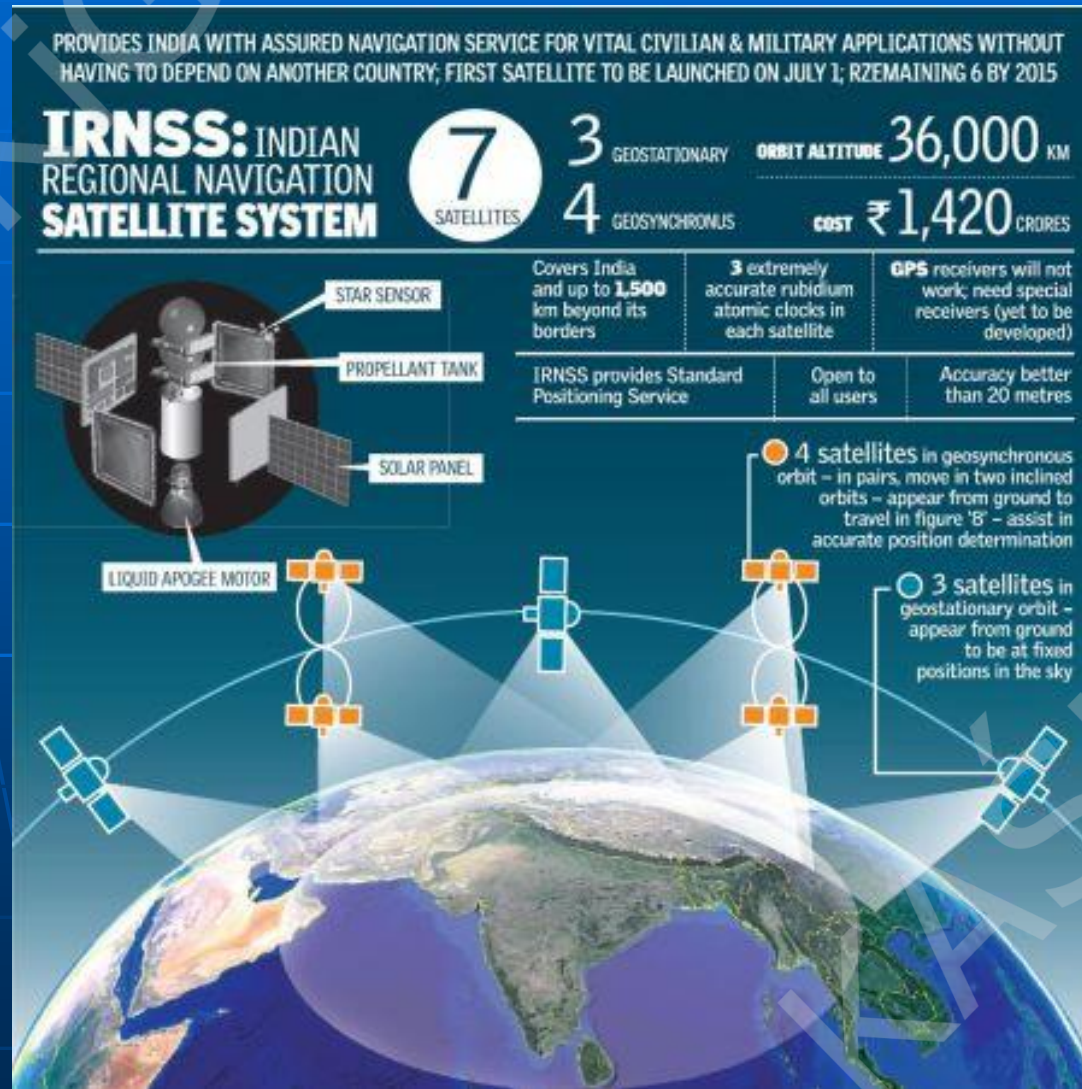
czerwiec 2016 r. - planowane ogłoszenie pełnej operacyjności,

28 kwiecień 2016 r. – wystrzelanie ostatniego satelity

Docelowa liczba satelitów: 7



Systemy nawigacji satelitarnej



Systemy nawigacji satelitarnej

QZSS (Quasi-Zenith Satellite System)

Kraj rozwijający system: Japonia

11 września 2010 – wystrzelenie pierwszego satelity

Docelowa liczba satelitów: 4



GPS – ZASTOSOWANIE

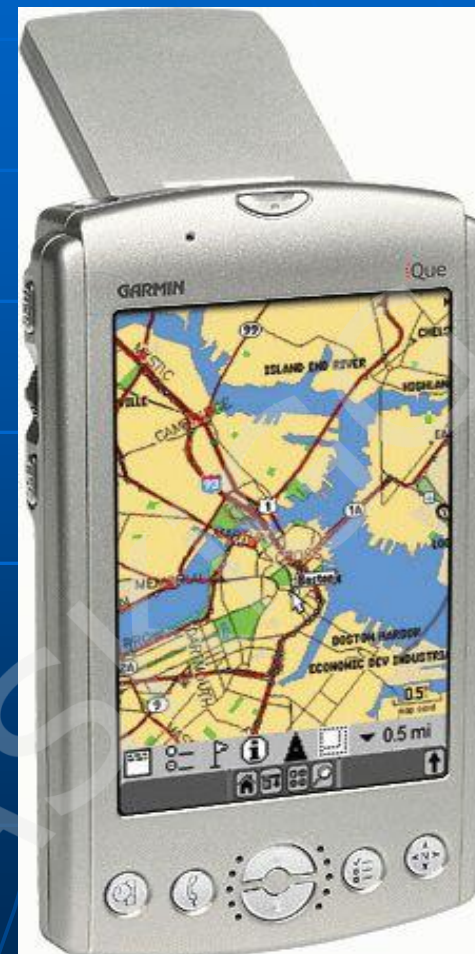
System GPS służy do:

- określania współrzędnych punktu, na którym się znajdujemy (długość i szerokość geograficzna). Współrzędne nanosimy w terenie na mapę lub wprowadzamy do pamięci odbiornika celem dalszej obróbki komputerowej.



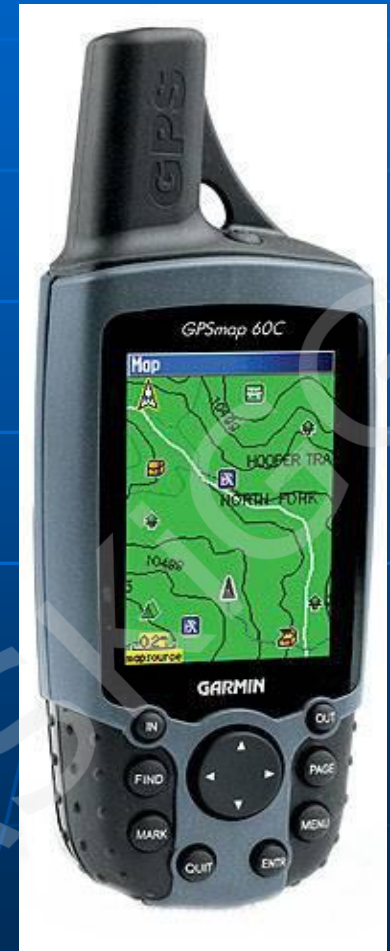
GPS – ZASTOSOWANIE

- nawigacji czyli dotarcia do celu o znanych współrzędnych pieszo, samochodem, statkiem. W tym celu oprócz współrzędnych odbiornik podaje chwilowy kurs i prędkość, obliczane ze zmiany pozycji w czasie;



GPS – ZASTOSOWANIE

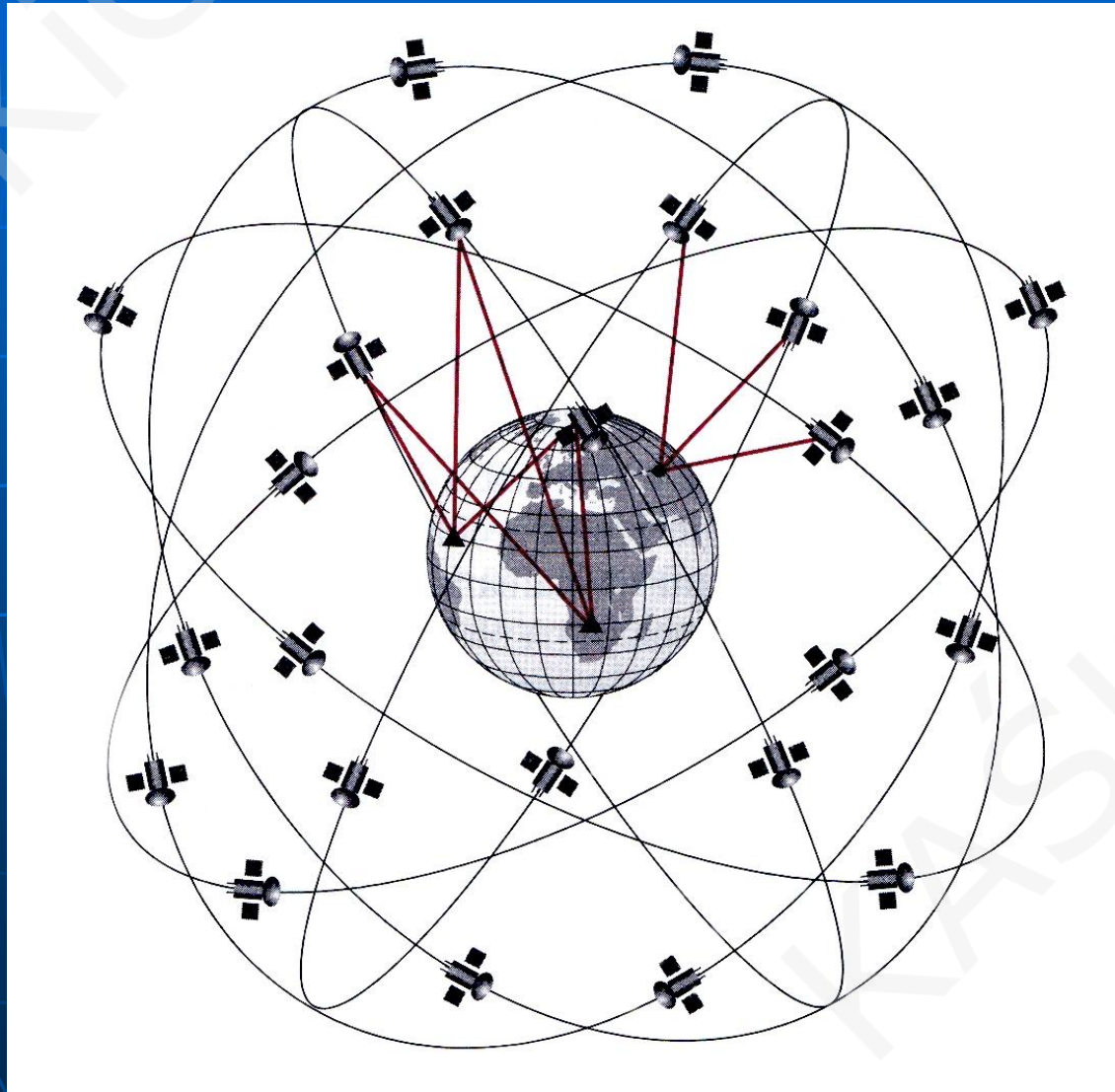
- dystrybucji wzorców czasu i częstotliwości dla celów użytkowych - czas UTC (*Universal Time Coordinated*), który od Międzynarodowego Czasu Atomowego (TAI) różni się w skali roku o pojedyncze sekundy przestępne dodawane dla wyrównania z czasem słonecznym.



GPS - ISTOTA SYSTEMU

GPS (Global Positioning System) służy do określania położenia przestrzennego obiektów w oparciu o pomiar odległości od satelitów (**SVs - S[pace]V[ehicle]s**) Navstar, których położenie w danym momencie czasu jest bardzo dokładnie określone. Jest to przestrzenne wcięcie wstecz, do czego potrzebne są min. 3 odległości do 3 równomiernie rozłożonych satelitów, które nie mogą być w linii.

Satelitarny system wyznaczania pozycji na powierzchni Ziemi



GPS - ISTOTA SYSTEMU

Miarą odległości jest czas wędrówki sygnału radiowego satelitów na Ziemię. Trzeba pamiętać, że:

- czas wędrówki sygnału ok. 6/100 s;
- błąd pomiaru czasu rzędu $1/1\ 000\ 000$ s x 300 000 km/s daje już błąd odległości 300 m;
- osiągnana obecnie dokładność pomiaru (bez dodatkowych korekcji) wynosi kilka metrów.

Satelity (orbita na wysokości 20200 km) mają po dwa zegary atomowe na pokładzie, natomiast odbiorniki tylko zwykłe kwarcowe. W praktyce tego czasu nie da się zmierzyć.

Wylicza się go jako poprawkę, do czego jest potrzebny sygnał od 4 satelity.

GPS – ZASADA DZIAŁANIA

Do pomiaru wykorzystuje się fale radiowe emitowane przez satelity z orbity o promieniu 20200 km na 2 częstotliwościach **L1** i **L2** (obie powyżej 1 GHz).

Na powierzchni Ziemi fale te są bardzo słabe, nawet 30x słabsze od szumu odbiorników starszych typów. Gęste listowie i solidniejsze przeszkody terenowe utrudniają ich odbiór. Aby można było je odczytać wykorzystuje się specjalną technologię, której istotę stanowi tzw. rozpraszanie fali kodem pseudolosowym (**PRN** – *Pseudo Random Noise*).

GPS – ZASADA DZIAŁANIA

W GPS istnieją dwie częstotliwości nośne:

Fala L1 (1575,42 MHz) jest rozpraszana kodami: **C/A** (cywilnym kodem szerokiego dostępu czyli *Coarse Availability*) i **P** (precyzyjnym kodem wojskowym *Precision Code*) często dodatkowo szyfrowanym do postaci oznaczanej **Y**.

Fala L2 (1227,60 MHz) jest rozpraszana kodem **P** (ewent. **Y**). Dopiero tak spreparowana fala nośna (*carrier*) jest modulowana depeszą nawigacyjną i wysyłana. PRN często funkcjonuje zamiast numeru satelity w nadawanych z kosmosu komunikatach i przetwarzających je programach.

Dla użytkowników zwykłych istotny jest kod C/A.

GPS – STOSOWANE UKŁADY ODNIESIENIA I UKŁADY WSPÓŁRZĘDNYCH

Wszystkie podstawowe obliczenia wykonuje się w **geocentrycznym układzie ortogonalnym XYZ (ORTOKARTEZJAŃSKIM)**.

Układ ortokartezjański – od poprzednio stosowanych w geodezji układów odniesienia różni się zwłaszcza punktem zaczepienia w środku masy a nie w środku geometrycznym (będącym środkiem elipsoidy będącej akurat w użyciu). Nieco inne są też parametry geometryczne, jak spłaszczenie elipsoidy i długość półosi.

GPS – STOSOWANE UKŁADY ODNIESIENIA i UKŁADY WSPÓŁRZĘDNYCH

Układ WGS 84 – globalny geodezyjny system odniesienia bazujący na elipsoidzie WGS 84 wyznaczonej technikami satelitarnymi. Elipsoida **WGS 84** jest umieszczona centrycznie w bryle Ziemi, tak że jej krótsza oś pokrywa się ze średnim położeniem ziemskiej osi biegunowej.

STOSOWANE UKŁADY ODNIESIENIA i UKŁADY WSPÓŁRZĘDNYCH

GPS – WGS 84

(World Geodetic System–84)

Glonass – PZ 90

(Parametry Zemli 1990)

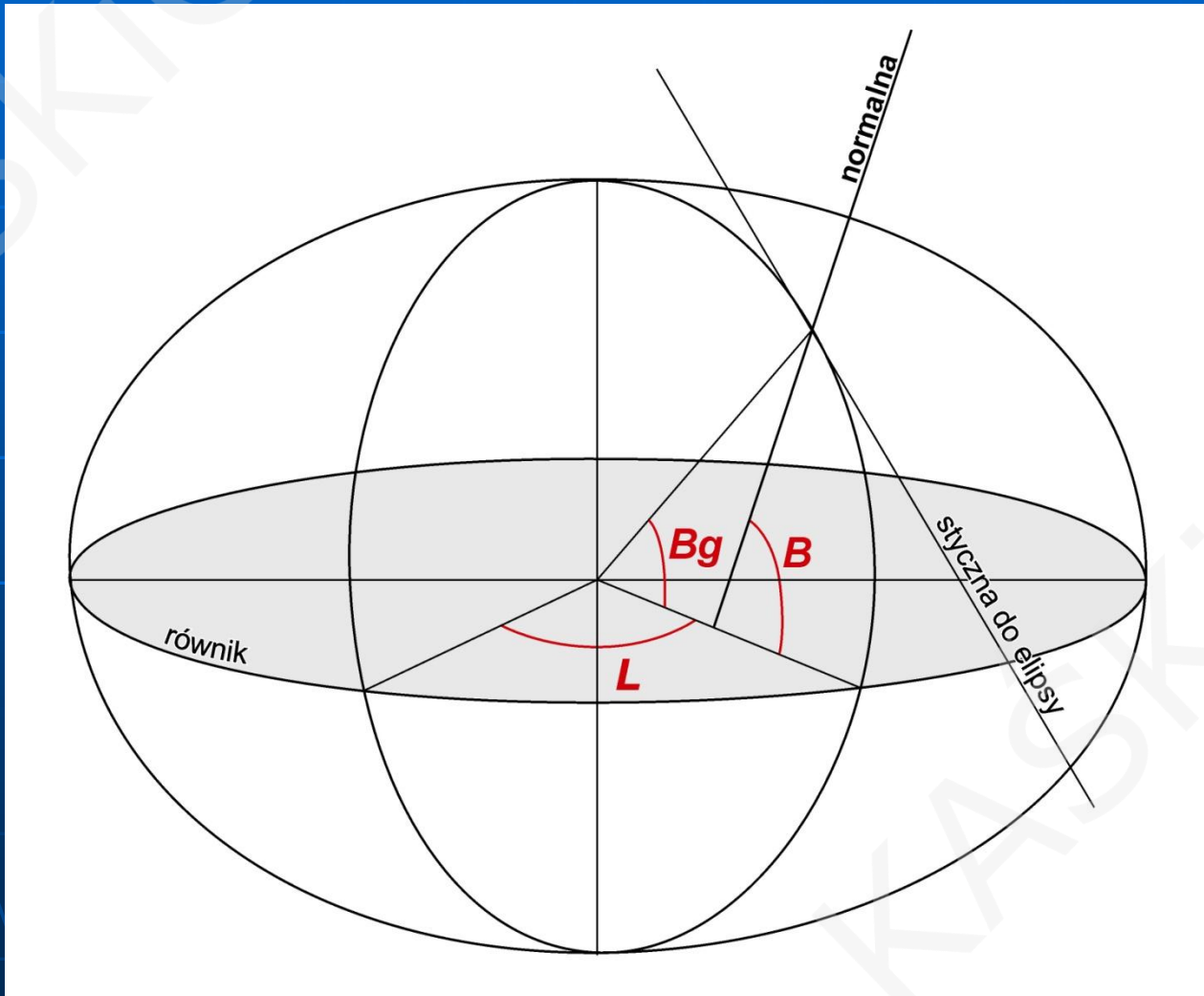
Galileo – GTRF

(Galileo Terrestrial Reference Frame)

Parametry elipsoid aproksymujących bryłę Ziemi

Autor elipsoidy	Data obliczenia	Duża półoś a w [m]	Mała półoś b w [m]	Splaszczenie (a-b)/a
J.B. Delambre	1800	6 375 653	6 356 564	1:334,0
F.W. Bessel	1841	6 377 397	6 356 079	1:299,2
A.R. Clarke	1880	6 378 249	6 356 515	1:293,5
J.F. Hayford	1909	6 378 388	6 356 912	1:297,0
F.N. Krasowski	1940	6 378 245	6 356 868	1:298,3
Międzynarodowa Unia Geodezji i Geofizyki	1979	6 378 137	6 356 752	1:298,257

Geograficzne współrzędne geodezyjne



GPS – STOSOWANE UKŁADY ODNIESIENIA I UKŁADY WSPÓŁRZĘDNYCH

- Współrzędne ortogonalne XYZ są przeliczane na dowolne współrzędne:
 - **kątowe** (szerokość i długość geograficzna);
 - **liniowe** (inaczej płaskie, czyli siatka kilometrowa) stosowane na mapach.

GPS – ZASADA DZIAŁANIA

Odbiorniki GPS podają współrzędne katowe odniesione do elipsoidy **WGS 84**, a współrzędne liniowe w odwzorowaniu tejże elipsoidy na płaszczyznę określanym jako UTM.

Jeśli mapa jest wykreślona w oparciu o inne elipsoidy niż WGS 84 (lub jej pierwsza wersja GRS 80) to bezpośrednie zastosowanie współrzędnych GPS będzie obarczone dużym błędem w przypadku współrzędnych katowych.

W Polsce na mapach wykreślonych na elipsoidzie Krasowskiego (układy 1965 i 1942) błąd wynosi 50-150 m, czasem nawet do 300 m.

GPS – ZASADA DZIAŁANIA

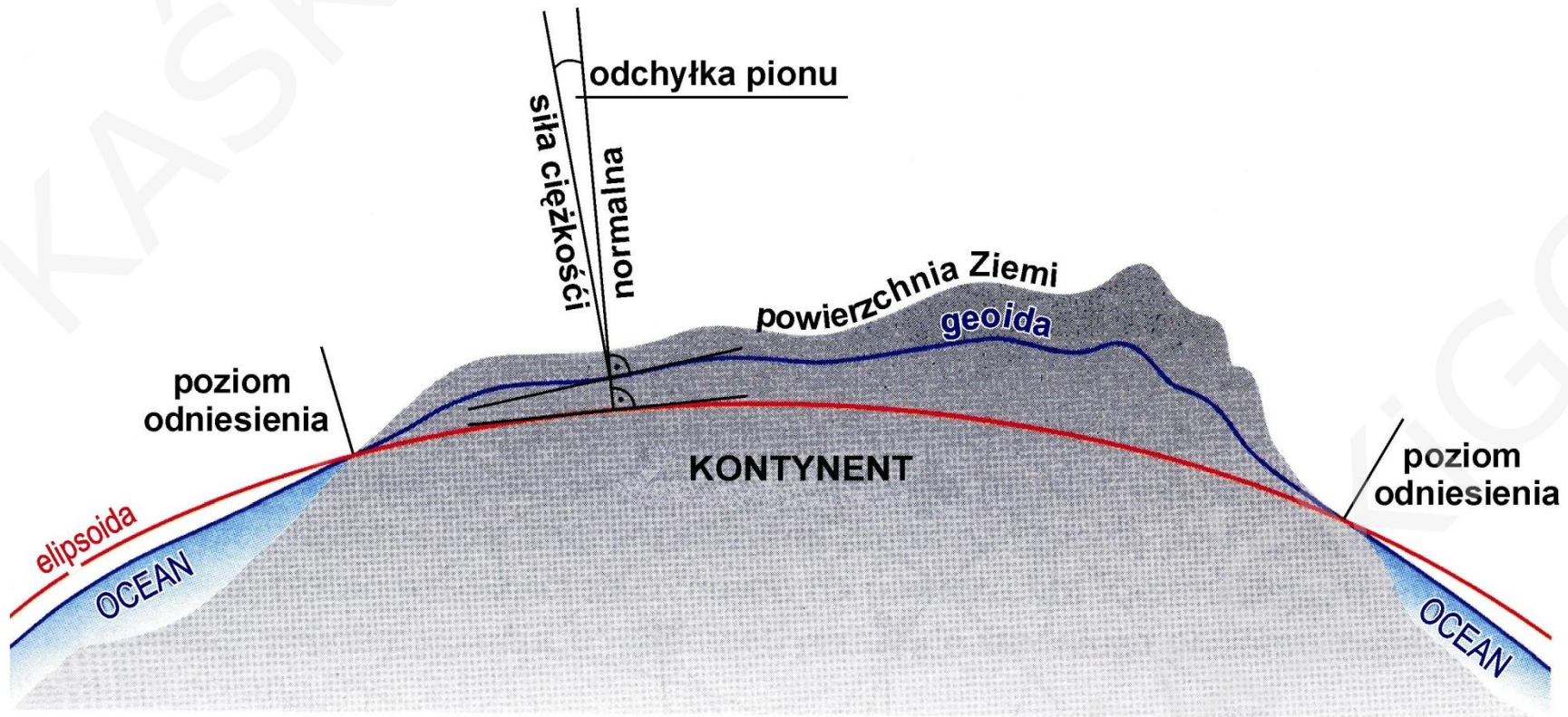
Jeśli mapa jest wykreślona w oparciu o inne elipsoidy niż WGS84 (lub jej pierwsza wersja GRS80) to bezpośrednio zastosowanie współrzędnych GPS da wynik absurdalny w przypadku współrzędnych liniowych.

Siatka kilometrowa każdego układu współrzędnych płaskich jest inna. Niektóre da się łatwo przeliczyć na GPS-owe za pomocą prostych współczynników, możliwych do wprowadzenia do pamięci odbiornika. Dotyczy to polskiego układu 1992. Inne wymagają przeliczeń w komputerze, zwłaszcza **układ 1965.**

GPS – ZASADA DZIAŁANIA

WYSOKOŚĆ danego punktu obliczona ze współrzędnych XYZ jest przeliczana na wysokość elipsoidalną tj. wysokość nad elipsoidą WGS 84, podczas gdy na mapach mamy wysokość nad geoidą (wysokość niwelacyjną, czyli nad poziomem morza). Ta ostatnia jest w Polsce 26 do 43 m mniejsza, niż elipsoidalna (w Krakowie ok. 40 m).

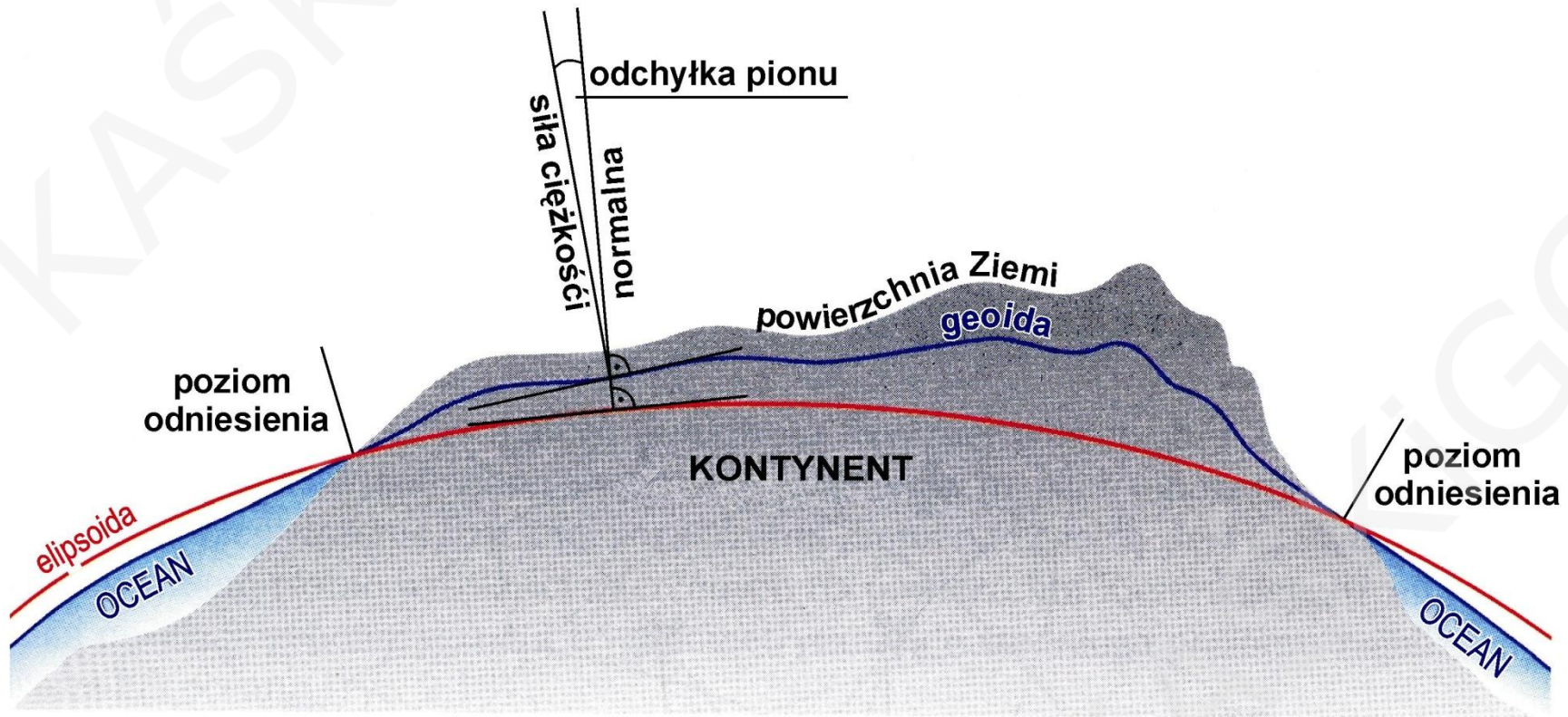
Powierzchnia poziomu, geoida i elipsoida



Powierzchnia poziomu, geoida i elipsoida

Powierzchnia poziomu – powierzchnia prostopadła do lokalnego pionu, przebiegająca na średnim poziomie niewzburzonych oceanów, przedłużonych pod powierzchnią lądów.

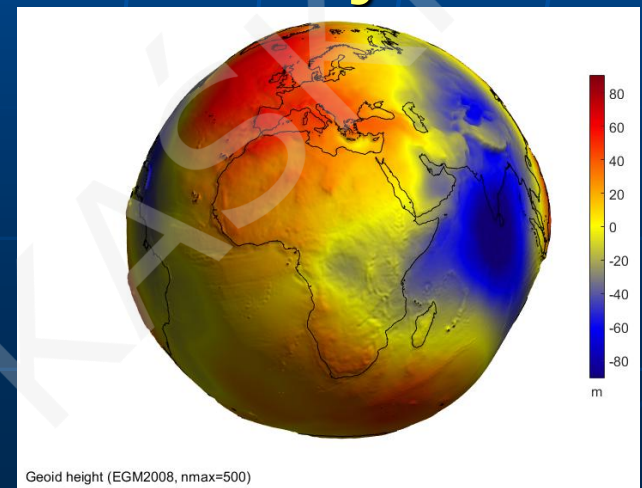
Powierzchnia Ziemi, geoida i elipsoida



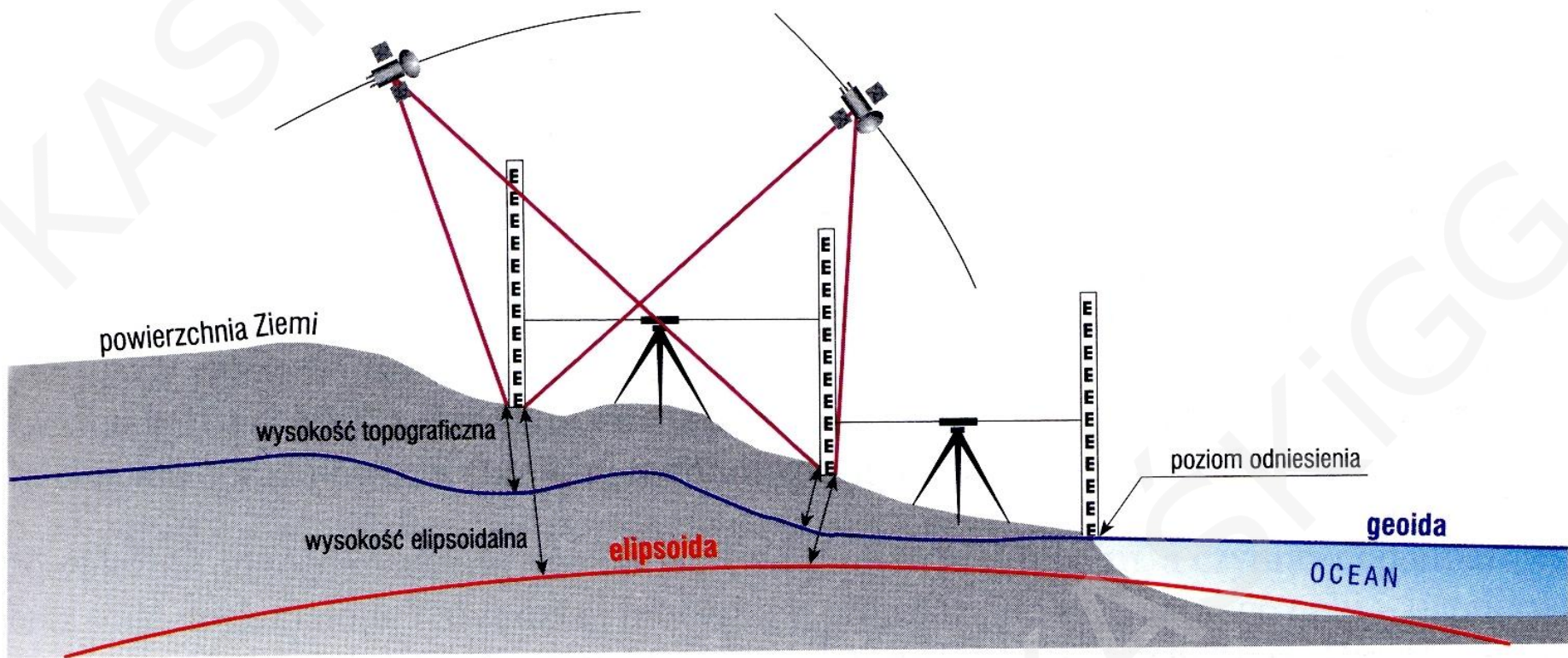
Powierzchnia poziomu, geoida i elipsoida

Geoida – bryła ograniczona przez powierzchnię poziomu.

Nierównomierne rozmieszczenie mas w skorupie ziemskiej powoduje, że piony ulegają odchyleniu, a prostopadła do nich powierzchnia geoidy nie tworzy jednolitej powierzchni. **Geoida** jest odchylona od **elipsoidy** o 50 do 100 m.



Zasada pomiaru wysokości topograficznej i elipsoidalnej



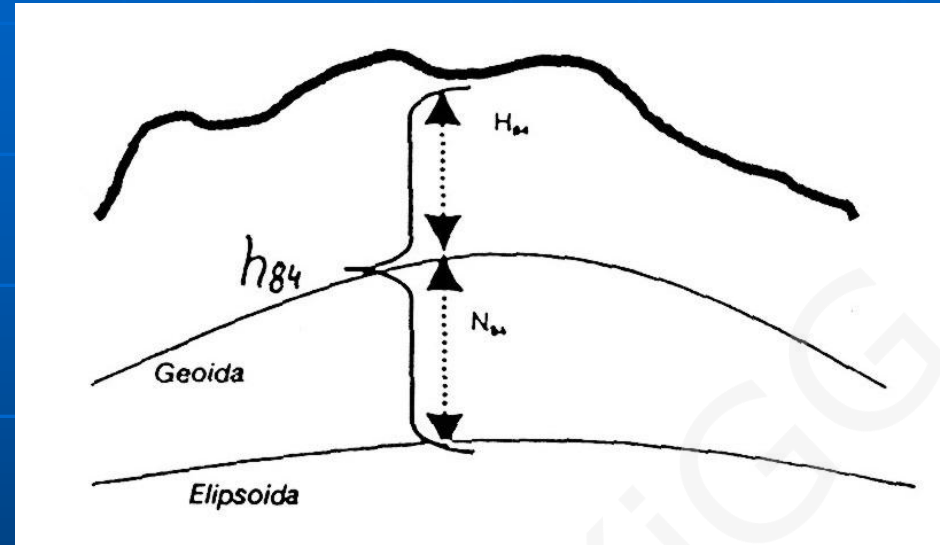
ZALEŻNOŚĆ POMIĘDZY POWIERZCHNIAMI ODNIESIENIA

Różnice wysokości między przedstawionymi na rysunku powierzchniami są wyznaczane ze wzoru:

$$h_{84} = H_{84} + N_{84}$$

gdzie:

- h_{84} – wysokość elipsoidalna
- H_{84} – odstęp geoidy od elipsoidy odniesienia
- N_{84} – wysokość niwelacyjna



GPS – UKŁADY ODNIESIENIA I ODWZOROWANIA

W pełni kompatybilny z GPS jest przyjęty obecnie dla Polski **Państwowy Układ Współrzędnych Geodezyjnych 1992**, bazujący na elipsoidzie GRS 80 i odwzorowaniu Gaussa-Krügera.

Aby skorzystać z jego siatki kilometrowej (co jest wygodniejsze) trzeba wpisać w odbiorniku jedynie odpowiednie przeliczniki do siatki użytkownika (Units – Position Format – User Grid). Oblicza się je od parametrów podstawowych układu 1992 i wynoszą one: » »

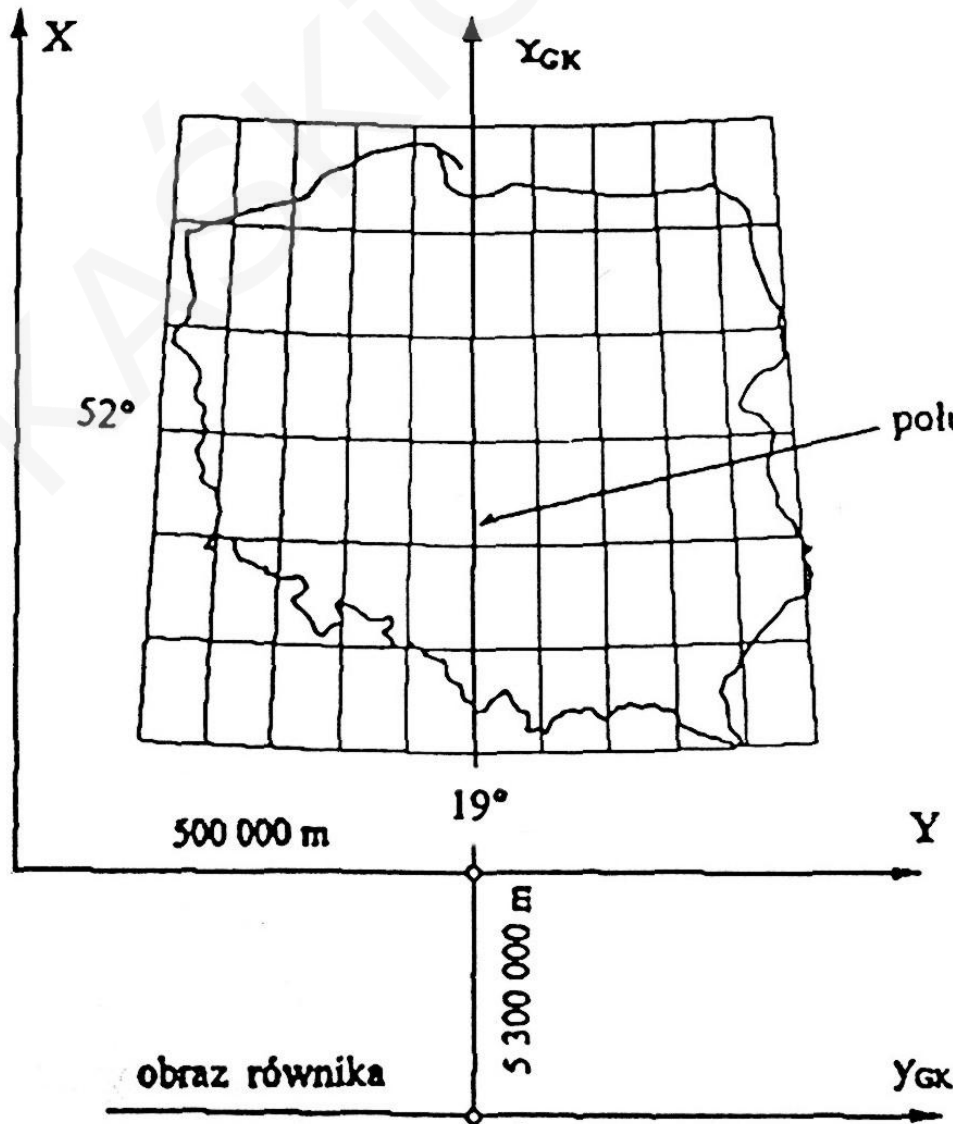
GPS – UKŁADY ODNIESIENIA I ODWZOROWANIA

- **Południk główny E 19°** (dla UTM 21° w tym sektorze);
- **Skala 0,9993** (dla UTM 0,9996 – współczynnik pomniejszenia południka głównego wskutek poprowadzenia walca odwzorowania siecznie).

GPS – UKŁADY ODNIESIENIA I ODWZOROWANIA

- **False Easting** + 500 000 metrów (liczba metrów na południku głównym, taka sama jak w UTM);
- **False Northing** (minus!) - 5 300 000 metrów (UTM liczy Northing od równika jako 0 m dla półkulipółnocnej);
- W **map datum** trzeba ustawić WGS 84.

UKŁAD „1992” – jednostrefowe odwzorowanie GAUSSA-KRÜGERA dla obszaru Polski



$$X_{1992} = m_0 \cdot X_{GK} + x_0, \quad x_0 = -5\,300\,000 \text{ m}$$

$$Y_{1992} = m_0 \cdot Y_{GK} + y_0, \quad y_0 = 500\,000 \text{ m}$$

$$m_0 = 0.9993$$

GPS – DOKŁADNOŚĆ POMIARÓW

Dokładność gwarantowana przez system GPS – jest lepsza niż 22 m (2D – w poziomie) dla odbiorników cywilnych i 16 m (3D) dla wojskowych.

W praktyce, przy dobrych warunkach pomiaru, jest ona dużo lepsza ale może też być dużo gorsza, co zależy głównie od: >> >>

GPS – DOKŁADNOŚĆ POMIARÓW

- **typu odbiornika** - odbiorniki geodezyjne (fazowe) pozwalają na pomiar z dokładnością rzędu milimetrów. Lepsze odbiorniki kartograficzne (kodowo-fazowe) mają dokładność 20-40 cm, tańsze kodowe około 1 m. Odbiorniki nawigacyjne (turystyczne) około 15 m;

GPS – DOKŁADNOŚĆ POMIARÓW

- **liczby i rozmieszczenia satelitów na niebie** – średnio na nieboskłonie „widać” 6-8 satelitów, czasem nawet 11 ale zdarza się, że na krótko są 3-4. Jeśli wzniesienie lub budynek zasłoni fragment nieba, pomiar może być niemożliwy (15-20 minut 1 do 2 razy na dobę);

GPS – DOKŁADNOŚĆ POMIARÓW

- **stopnia zasłonięcia nieboskłonu** - przez las, domy, skały, zbocza dolin i wąwozów. Praca w cieniu tych obiektów jest niemożliwa (wąwóz, budynek) lub mocno utrudniona, co oznacza bardzo duży spadek dokładności w lesie, na ulicach z wysoką zabudową;

GPS – DOKŁADNOŚĆ POMIARÓW

- **stanu jonosfery** – ewentualne burze magnetyczne w jonosferze najsilniej zniekształcają sygnał w drodze na Ziemię. Tylko część tego błędu jest zniesiona przez poprawkę emitowaną razem z sygnałem.

GPS – DOKŁADNOŚĆ POMIARÓW

Część błędu można usunąć przez korekcję czyli DGPS (*Differential GPS*):

- po powrocie z terenu (w komputerze - *postprocessing*);
- Bezpośrednio w terenie (RT DGPS, Real Time DGPS).

Korekcja dotyczy jednak tylko błędów spowodowanych przez jonosferę, niedokładności zegarów lub efemeryd. Błąd spowodowany złą konstelacją satelitów na niebie (także tą wymuszoną przez zasłonę np. budynków) jest nieusuwalny.

Dokładności pomiaru metodą DGPS i wymagane odbiorniki

Obszar stosowania	Dokładność pomiaru	Rodzaj odbiornika
Zakładanie sieci geodezyjnych	1-5 cm	Fazowy L1/L2 15 000 USD
Statyczne pomiary geodezyjne	2-10 cm	Fazowy L1 5000 USD
Prace kartograficzne (mapy topograficzne i GIS), prace inwentaryzacyjne	10 cm-2 m	Kodowy (z pomiarem fazy) L1 8000 USD
Pomiary GIS, lokalizacja, nawigacja precyzyjna	2-5 m	Kodowy L1 (3500 USD) Nawigacyjny (700 USD)
Badania biologiczne, turystyka, śledzenie pojazdów	> 10 m	Nawigacyjny 200-400 USD