

Alternatywne do GNSS metody obserwacji satelitarnych

[na podstawie Seeber G., „Satellite Geodesy”]



dr hab. inż. Paweł Zalewski
Akademia Morska w Szczecinie

Przegląd operacyjnych technik obserwacji satelitarnych:

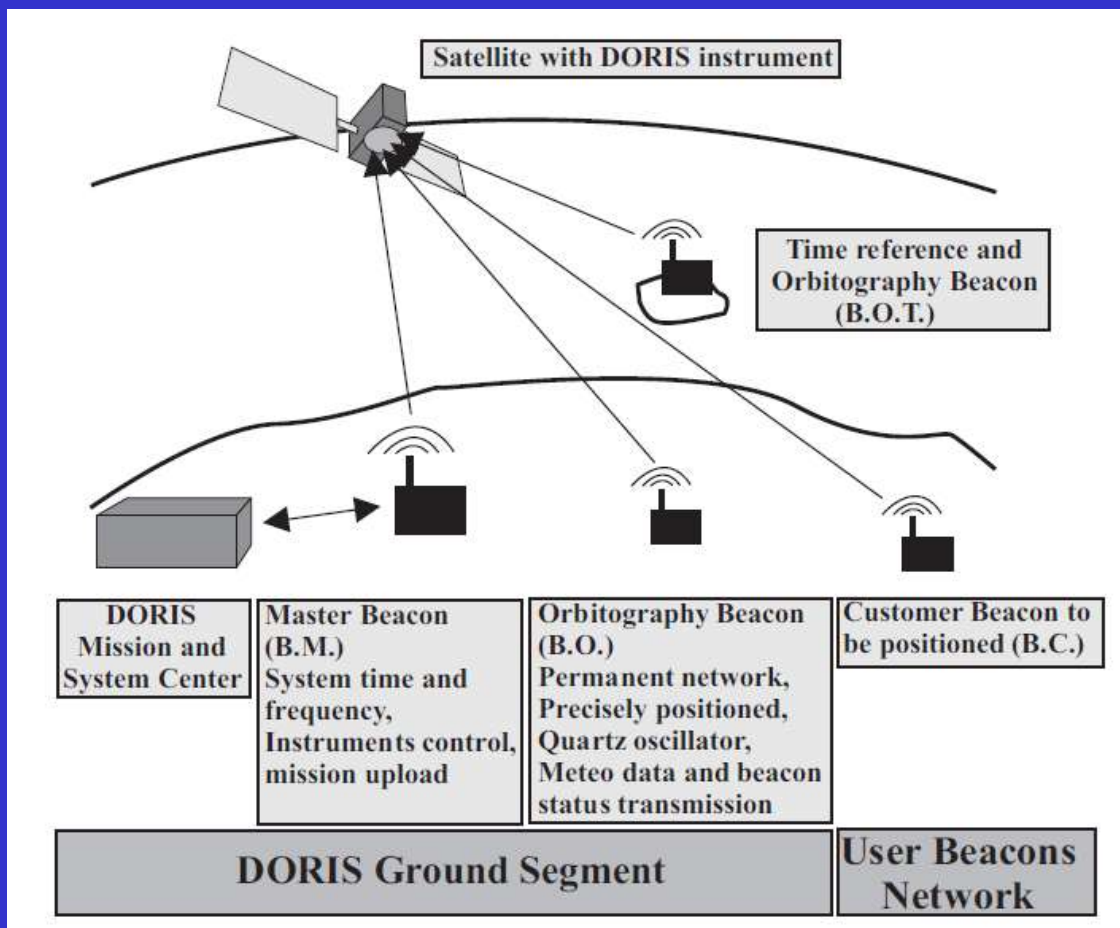
- 1. GNSS (GPS, Glonass, Beidou / Compass, ...)**
- 2. DORIS – dopplerowskie pomiary satelitarne**
- 3. SLR – satelitarne pomiary laserowe**
- 4. LLR – pomiary laserowe Księżyca**
- 5. RA – radarowa altymetria satelitarna**
- 6. LA – laserowa altymetria satelitarna**
- 7. SST – wzajemne śledzenie satelitów**
- 8. SGG – gradiometria satelitarna grawitacji lub grawimetria**
- 9. VLBI – interferometria wielkobazowa**

Strona International Association of Geodesy - Global Geodetic Observing System:

http://www.ggos-portal.org/lang_en/GGOS-Portal/EN/Topics/SatelliteMissions/SatelliteMissions.html

DORIS:

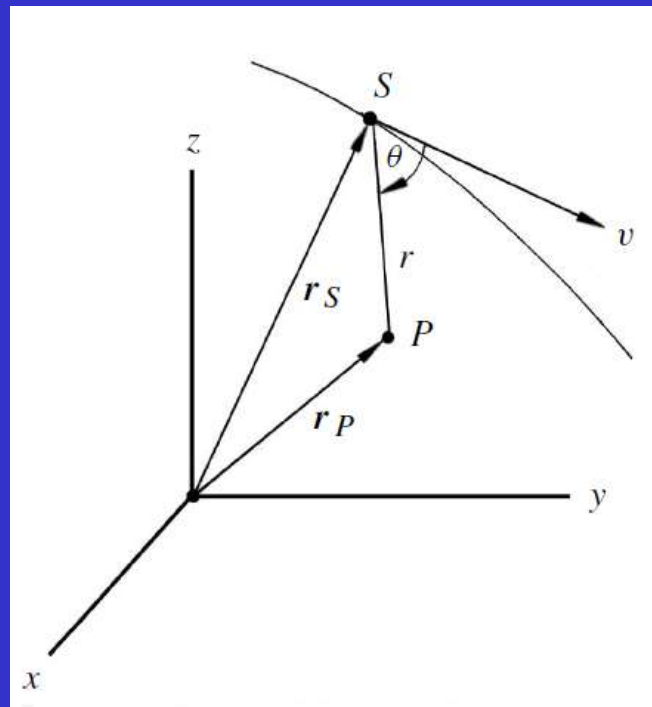
DORIS (*Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite*) jest francuskim systemem (zbudowany przez CNES), który podobnie jak TRANSIT bazuje na zjawisku Dopplera, ale odwrotnie niż w systemie amerykańskim: stała częstotliwość emitowana jest przez radiolatarnie na Ziemi a pomiar dopplerowski wykonywany jest przez satelitę.



DORIS:

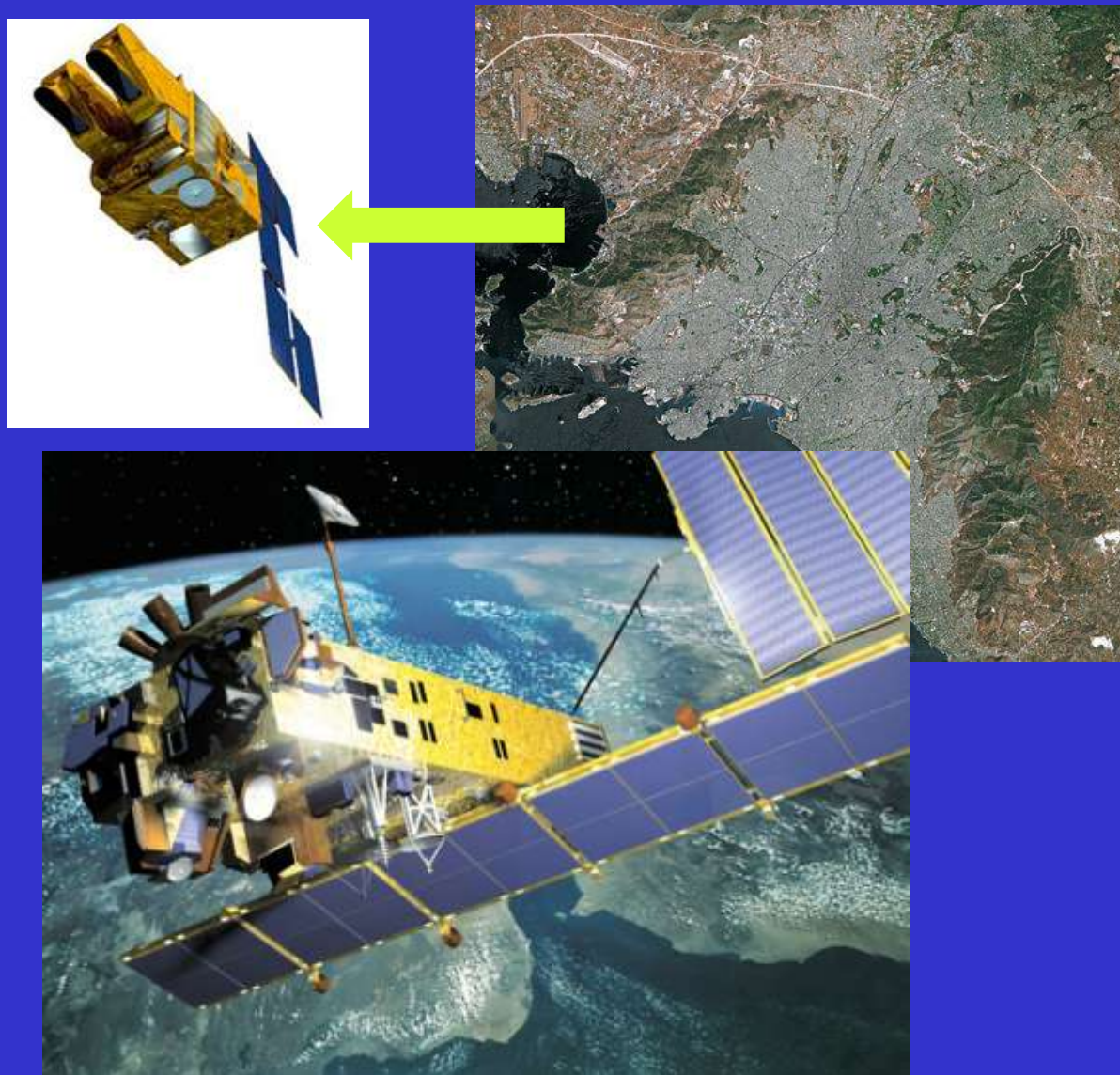
Równanie Dopplera:

$$\frac{f_r}{f_t} = \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \theta}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



- f_t – stała częstotliwość nadawcza – źródła na Ziemi w punkcie P,
- f_r – częstotliwość odbierana przez satelitę w punkcie S,
- v – prędkość satelity,
- c – prędkość fali elektromagnetycznej,
- θ – kąt pomiędzy wektorem prędkości satelity a linią łączącą stację naziemną z satelitą,
- r – odległość pomiędzy stacją naziemną a satelitą.

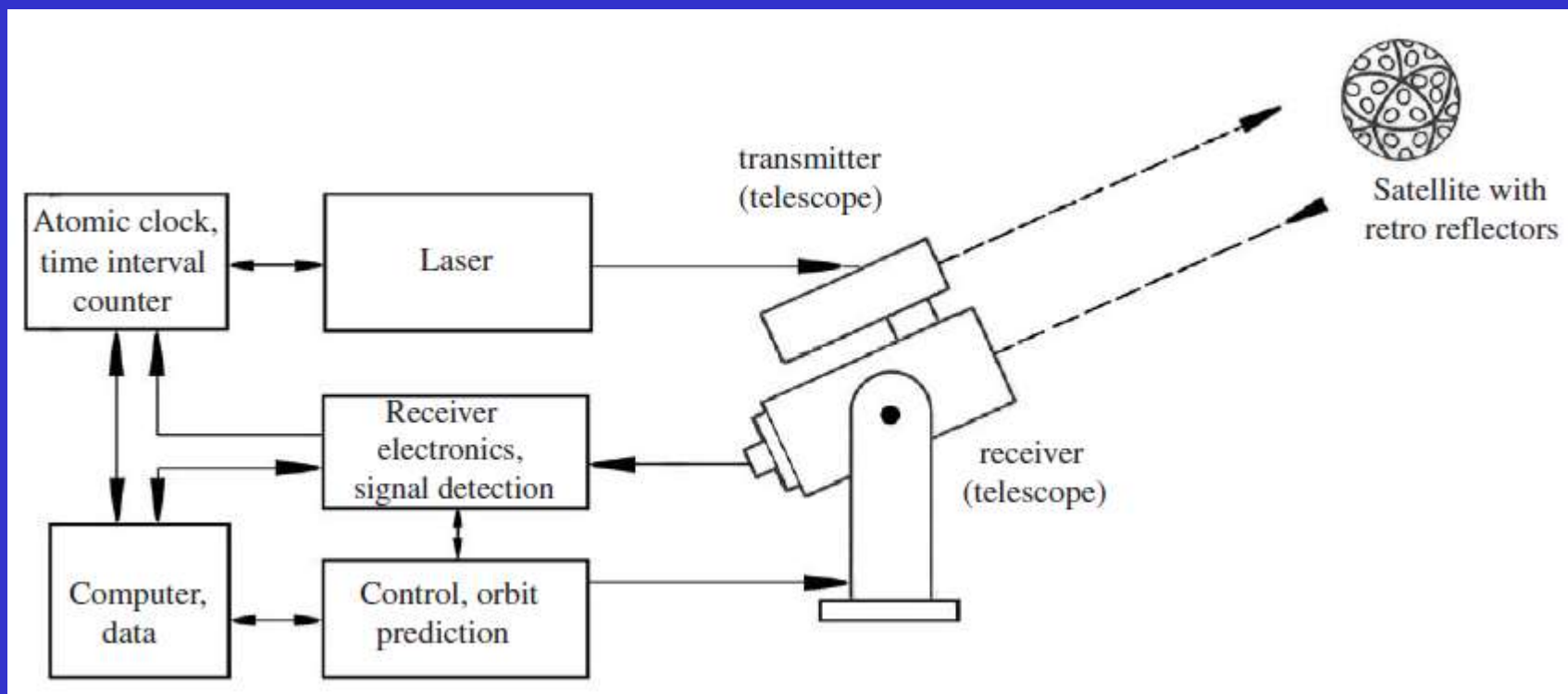
DORIS:



*Satelita teledetekcyjny SPOT-5 oraz teledetekcyjno-altymetryczny Envisat,
współpracujące z systemem DORIS*

SLR – satelitarne pomiary laserowe:

W pomiarach laserowych odległości do satelitów (*Satellite Laser Ranging, SLR*) mierzony jest czas przelotu krótkiego impulsu laserowego pomiędzy stacją naziemną a obserwowanym satelitą. Część generowanego w systemie optycznym stacji naziemnej impulsu wykorzystana jest do startu elektronicznego licznika czasu (zegara użytkownika). Śledzony satelita wyposażony jest w powłokę odblaskową (retro-reflektory). Odbity impuls jest odbierany w stacji naziemnej, wzmacniany, analizowany oraz zatrzymuje licznik czasu.



SLR – satelitarne pomiary laserowe:

Zmierzona przez licznik czasu wartość Δt odpowiada czasowi pokonania podwójnej drogi d pomiędzy stacją naziemną a satelitą.

$$d = \frac{\Delta t}{2} \cdot c$$

Głównymi komponentami segmentu naziemnego są:

- generator i nadajnik impulsów laserowych wraz z systemem optycznym i obudową,
- czujnik i analizator powracających impulsów w tym teleskop odbiorczy,
- jednostka pomiaru czasu przelotu (licznik).

Dodatkowo potrzebne są subkomponenty celowniczo-kontrolne systemu śledzenia laserowego oraz odniesienia czasu (zegary atomowe, komputery, oprogramowanie).

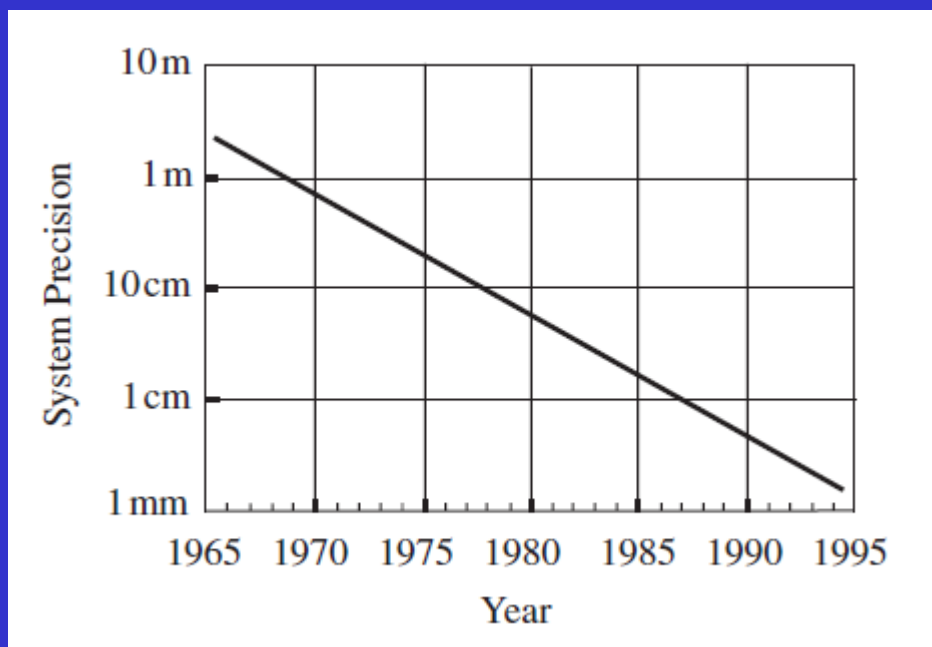
Segment kosmiczny stanowią satelity wyposażone w retro-reflektory.

SLR – satelitarne pomiary laserowe:

Obecnie na świecie pracuje około 40 stacji SLR, a w retro-reflektory wyposażone były lub są satelity TOPEX/POSEIDON, LAGEOS, GRACE, ICESat oraz niektóre GPS i Glonass.

Osiągana dokładność pomiarów odległości jest ściśle skorelowana z długością i rozdzielczością impulsów laserowych:

$$1 \text{ ns} \cong 15 \text{ cm}$$



Poprawa dokładności SLR w ubiegłym wieku

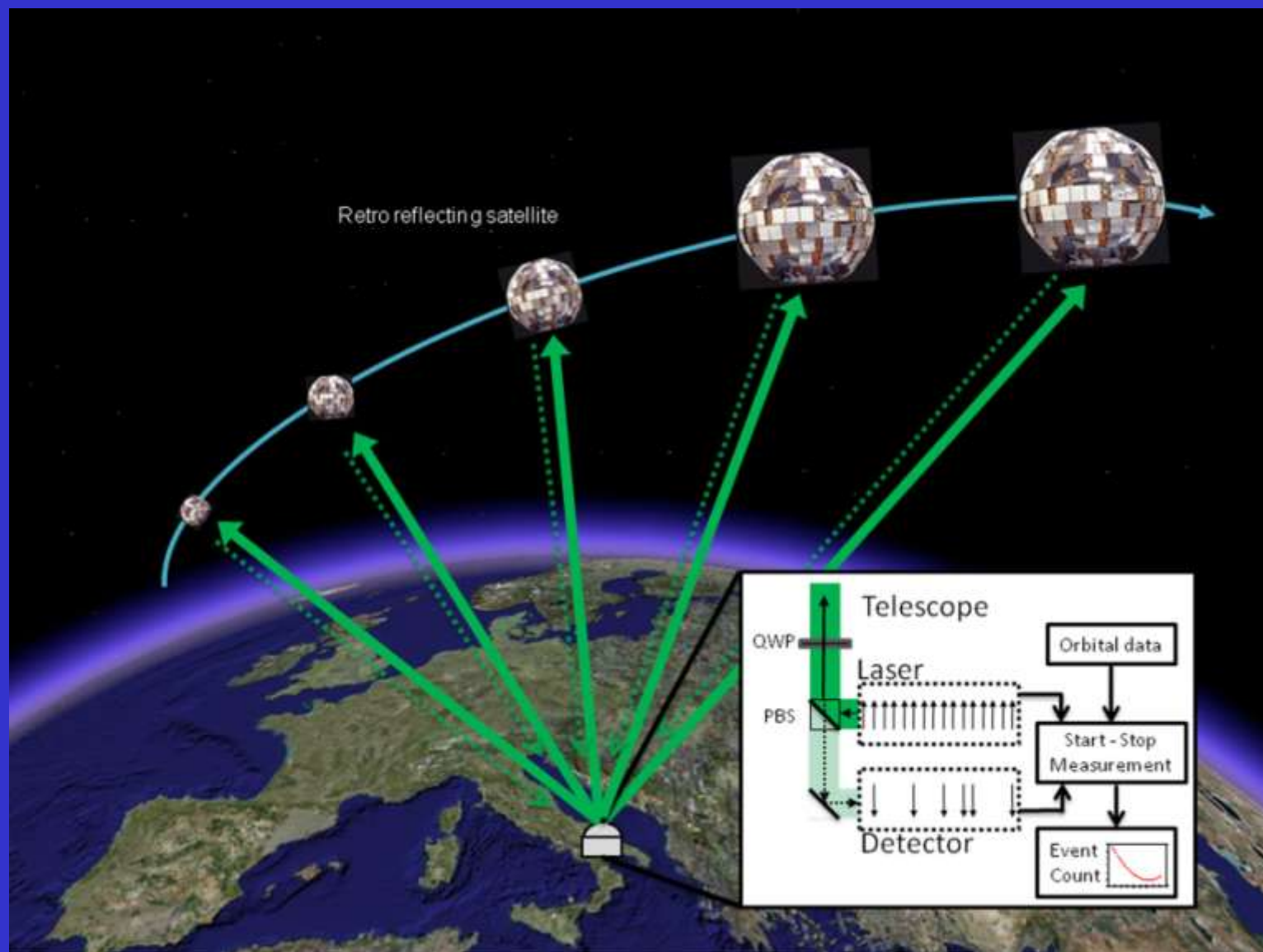
SLR – satelitarne pomiary laserowe:

Cztery generacje SLR:

1. Długości impulsów 10 do 40ns, odpowiadające dokładności 1 do 6m; lasery rubinowe.
2. Długości impulsów 2 do 5ns, odpowiadające dokładności 30 do 100cm; złożona analiza impulsu.
3. Długości impulsów 0,1 do 0,2ns, odpowiadające dokładności 1 do 3cm; lasery Nd:YAG (*neodymium-doped yttrium aluminium garnet*); zdolność detekcji pojedynczych fotonów.
4. Długości impulsów poniżej 0,1ns, odpowiadające dokładności 1 do 3mm.

W Polsce stacja SLR znajduje się w Obserwatorium Astro-Geodynamicznym CBK PAN w Borowcu pod Poznaniem. Uzyskiwane dokładności są porównywalne z techniką GPS (trzecia generacja SLR) i wynoszą kilka cm dla mierzonej odległości do satelity. Ze względu na znacznie wyższe koszty wybudowania stacji SLR a później jej eksploatacji technika ta jest powoli wypierana przez permanentne stacje GPS.

SLR – satelitarne pomiary laserowe:

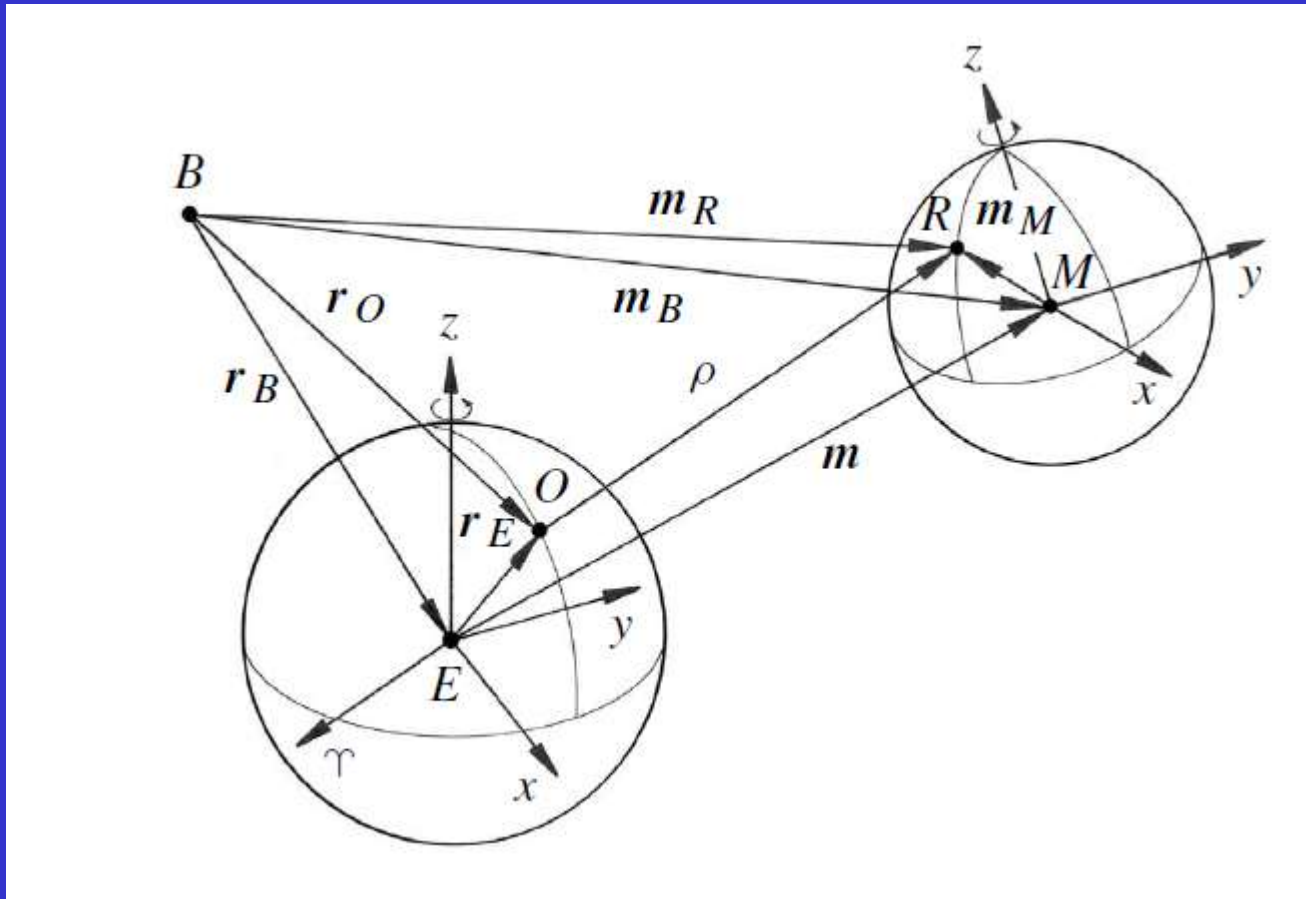


SLR – satelitarne pomiary laserowe:



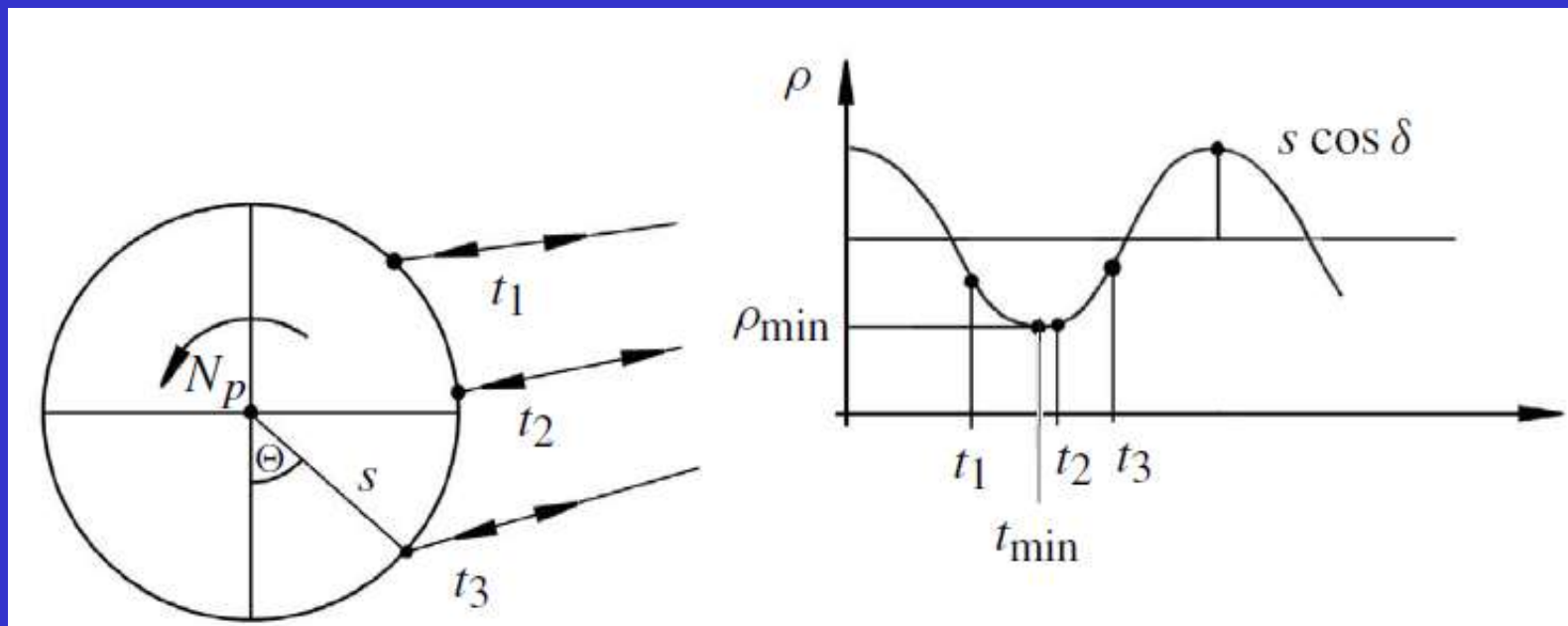
LLR – pomiary laserowe Księżyca:

LLR (*Lunar Laser Ranging*):



Geometryczne zależności w pomiarach laserowych Księżyca

LLR – pomiary laserowe Księżyca:



Wyznaczenie parametrów ruchu obrotowego Ziemi techniką LLR

LLR – pomiary laserowe Księżyca:



Centrum badań kosmicznych Mount Stromlo w USA dokonujące pomiarów SLR i LLR

RA – radarowa altymetria satelitarna:

Altymetria radarowa jest jedną z nowszych metod obserwacji satelitarnych stosowanych geodezyjnie i, jak do tej pory, dominującą techniką operacyjną pomiarów wykonywanych z satelity do Ziemi (ang. *Space to Earth*).

W altymetrii radarowej satelita jest wykorzystywany jako ruchoma platforma dla radaru wysyłającego impulsy mikrofalowe do Ziemi i odbierającego sygnały odbite od jej powierzchni.

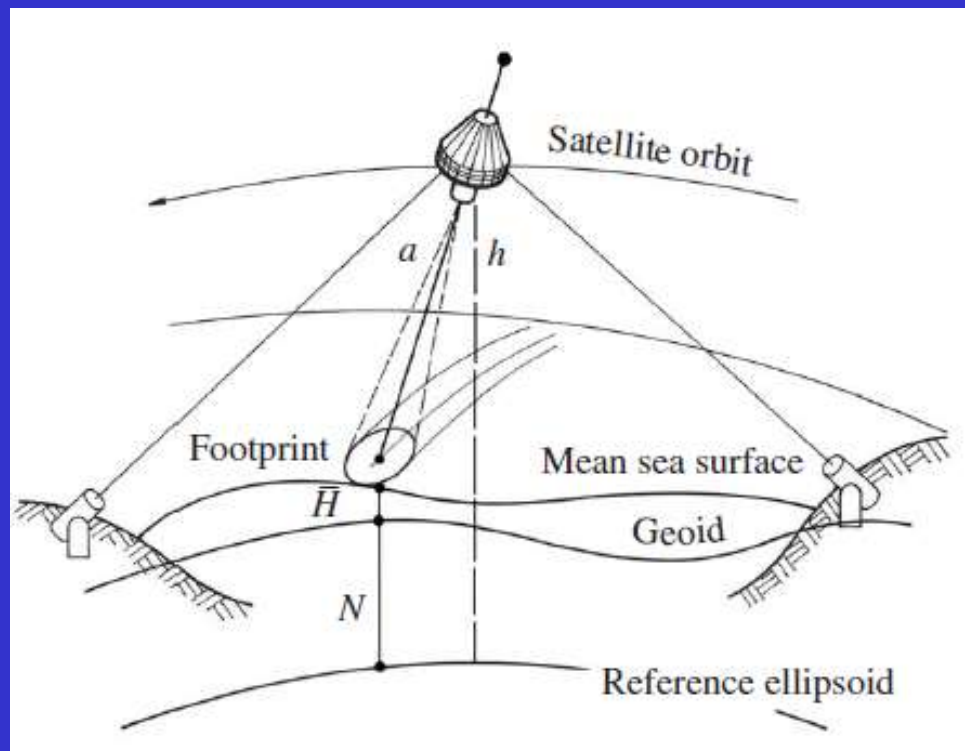
Wysokość a satelity ponad powierzchnią Ziemi może być wyznaczona, w pierwszym przybliżeniu, na podstawie czasu pokonania drogi do Ziemi i z powrotem przez impuls radarowy (zależność analogiczna do pomiaru odległości w SLR).

$$a = \frac{\Delta t}{2} \cdot c$$

RA – radarowa altymetria satelitarna:

Ze względu na cechy wody sprzyjające odbiciom sygnału radarowego, metoda ta jest szczególnie przydatna do pomiarów oceanicznych. Chwilową powierzchnię odbicia stanowi koło o średnicy kilku kilometrów, tzw. ślad (ang. *footprint*), którego rozmiar zależy od szerokości wiązki mikrofalowej. W związku z tym obserwacje dotyczą średniego chwilowego poziomu morza, który różni się od wysokości geoidalnej N o wysokość niwelacyjną H . Wysokość elipsoidalna h satelity może być wyznaczona na podstawie chwilowej pozycji satelity w układzie geocentrycznym.

Pomijając dodatkowe poprawki: $h = N + \bar{H} + a$



RA – radarowa altymetria satelitarna:

Równanie obserwacji altymetrycznej:

$$h = N + H + \Delta H + a + d$$

h - wysokość elipsoidalna satelity

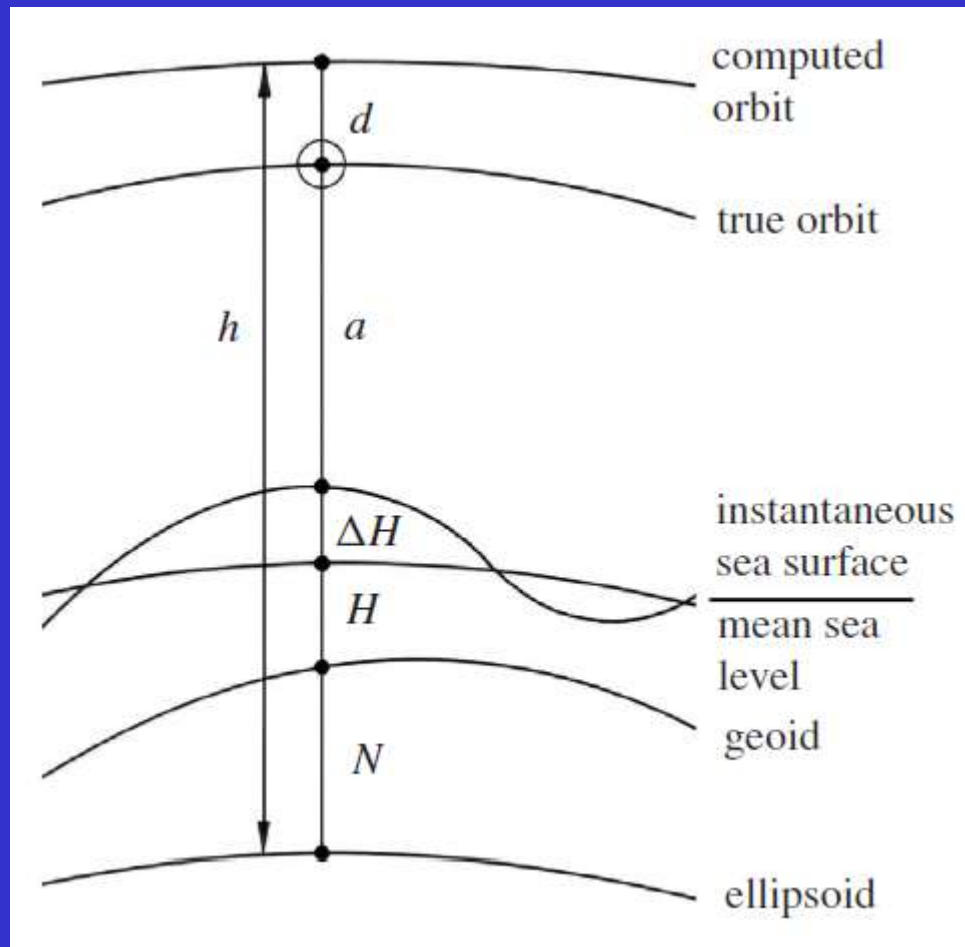
N - wysokość geoidalna

H - wysokość niwelacyjna
topografii morza

ΔH - chwilowa wysokość pływów

a - pomiar altymetryczny

d - różnica pomiędzy wyliczoną
orbitą a rzeczywistą (z błędów
parametrów efemerydalnych)

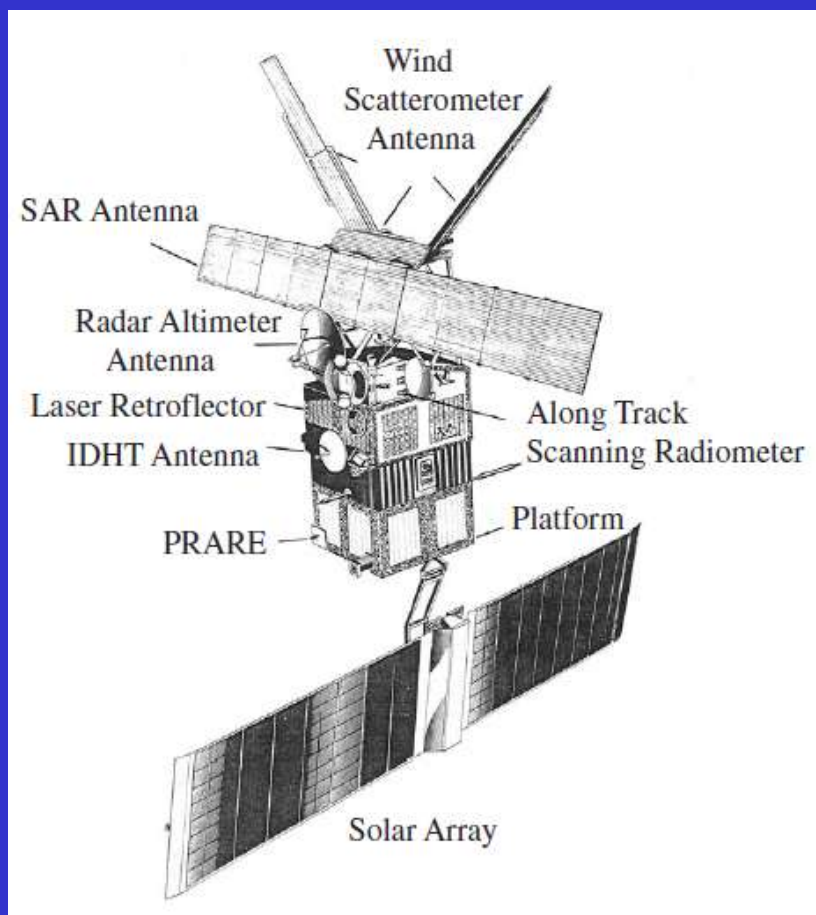


RA – radarowa altymetria satelitarna:

Generator mikrofalowy na pokładzie satelity (altymetr radarowy) pracuje w zakresie częstotliwości około 13,5 GHz (pasmo Ku), odpowiadającemu długości fali 2,2 cm.

Stosowane długości impulsów to kilka nanosekund, skąd możliwe dokładności pomiarów wynoszą kilka centymetrów.

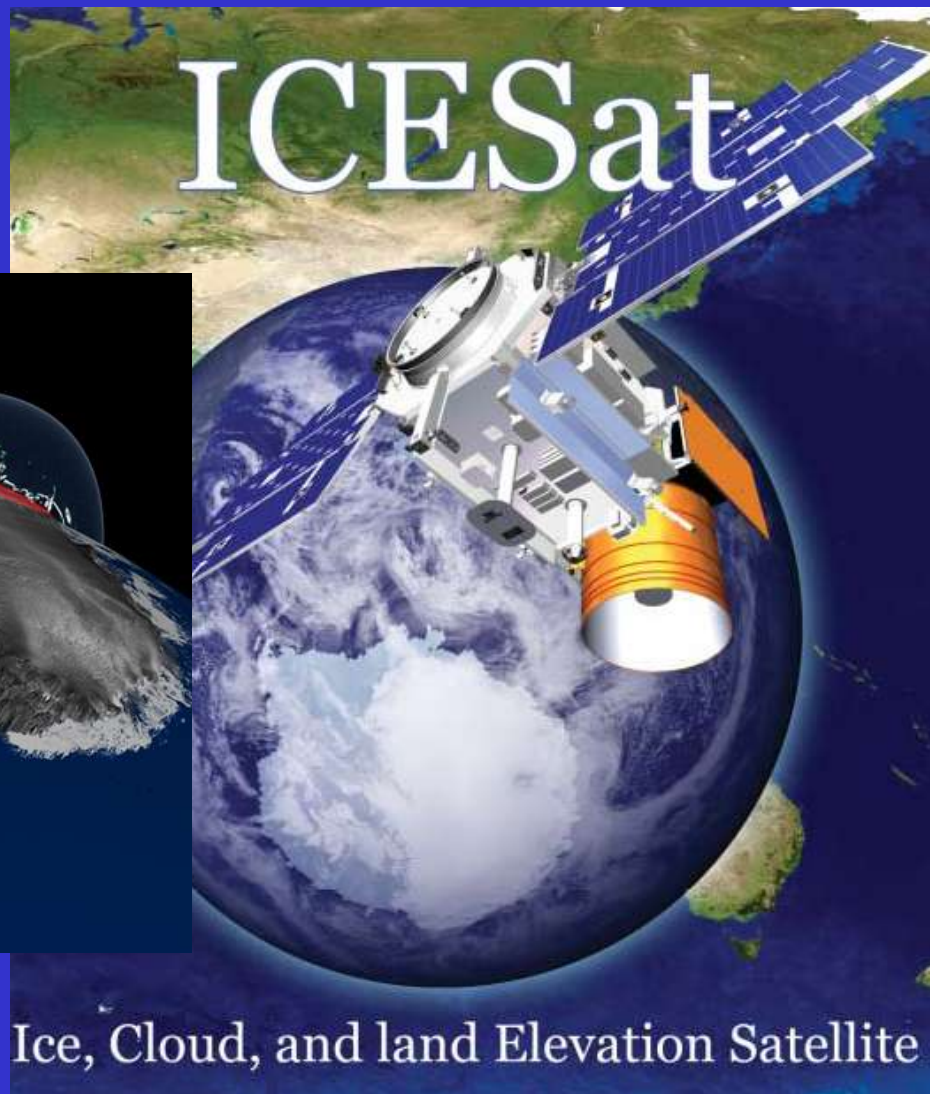
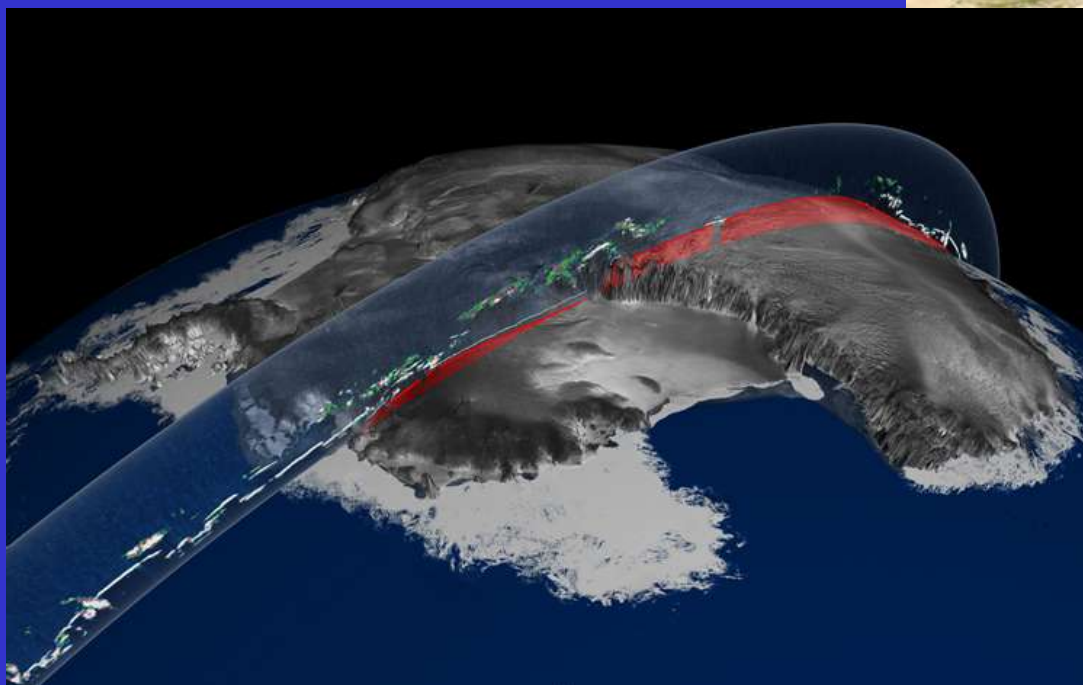
Europejski satelita ERS-1 z altymetrem radarowym – misja pomiarowa rejonów biegunowych w latach 1991-1996; oraz Envisat z radarem ASAR – 2002-obecnie



LA – laserowa altymetria satelitarna:

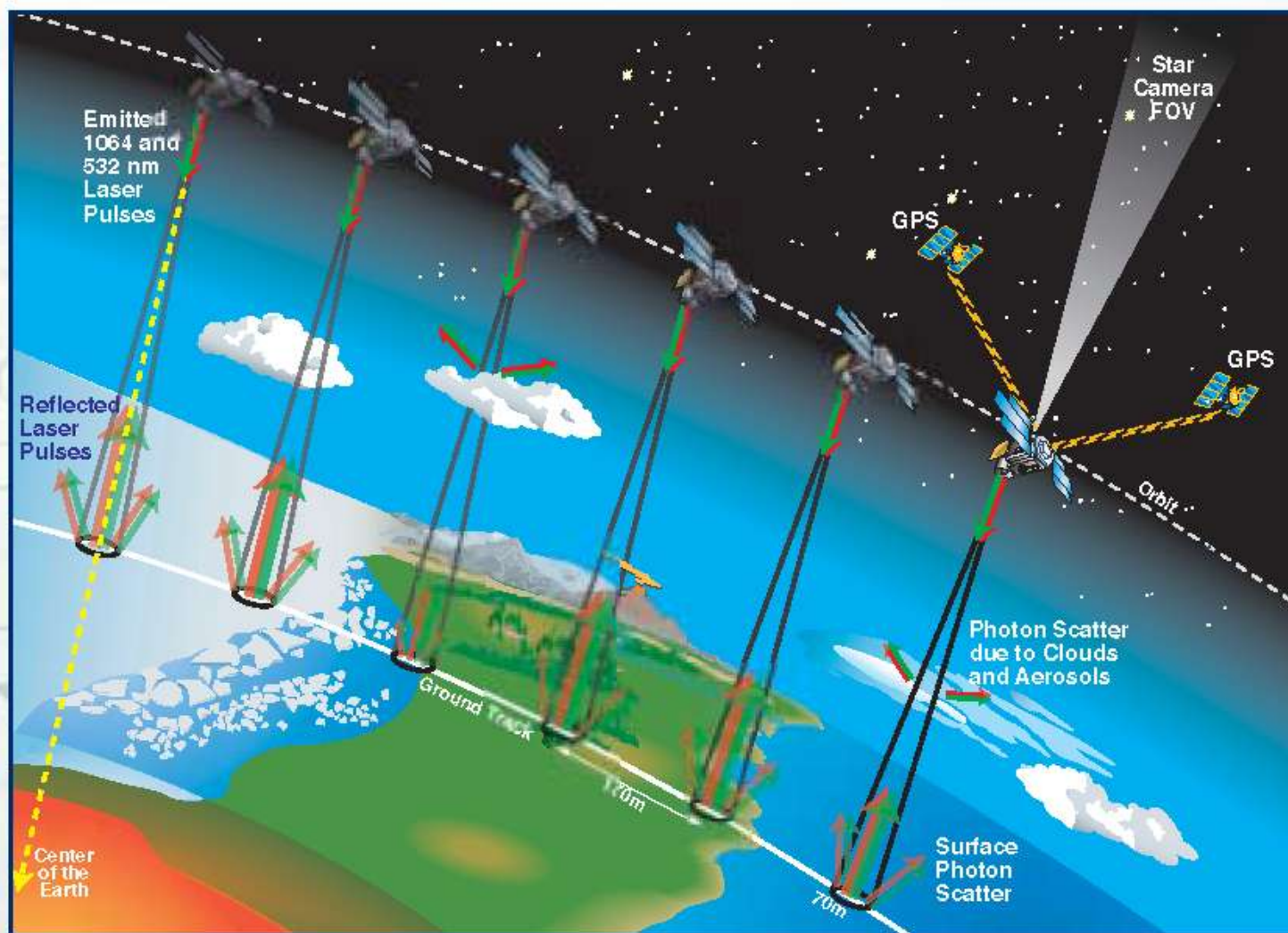
Amerykańska misja ICESat

2003 – 2010 r., trzy lasery na pokładzie satelity.



LA – laserowa altymetria satelitarna:

Amerykańska misja ICESat



Schematic illustration of the GLAS instrument making measurement from ICESat while orbiting the Earth.
Graphic by Deborah McLean.

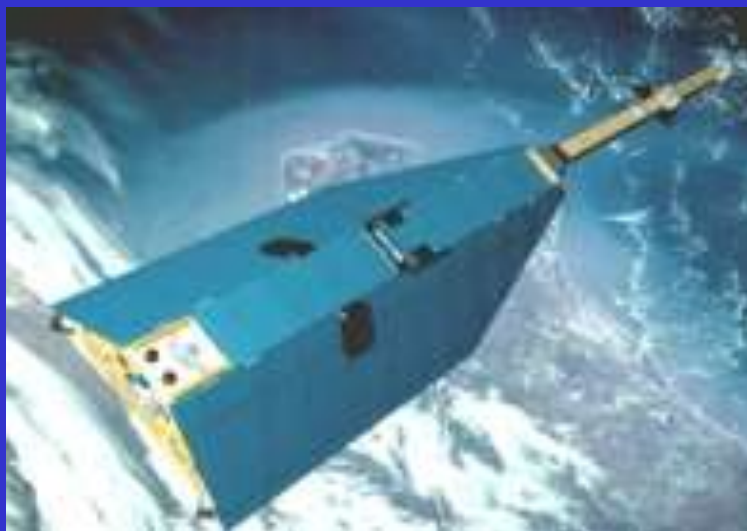
SST – wzajemne śledzenie satelitów:

SST (*Satellite-to-Satellite Tracking*) – pomiary odległości i pochodnych odległości (względnej prędkości) pomiędzy satelitami.

SST w trybie wysoko-nisko (*SST high-low mode*, SST-HL) odnosi się do metody wykorzystującej satelitę LEO śledzonego przez wyżej położone satelity np. GPS, GLONASS lub GALILEO, względem sieci stacji naziemnych.

Przyśpieszenia pozagrawitacyjne oddziałujące na satelitę LEO są mierzone akcelerometrami. Pozostałe przyśpieszenia satelity (w trzech wymiarach) odpowiadają przyśpieszeniom grawitacyjnym Ziemi.

Wynikiem pomiarów są pierwsze pochodne potencjału grawitacyjnego.



Satelita misji CHAMP z 2000 r.

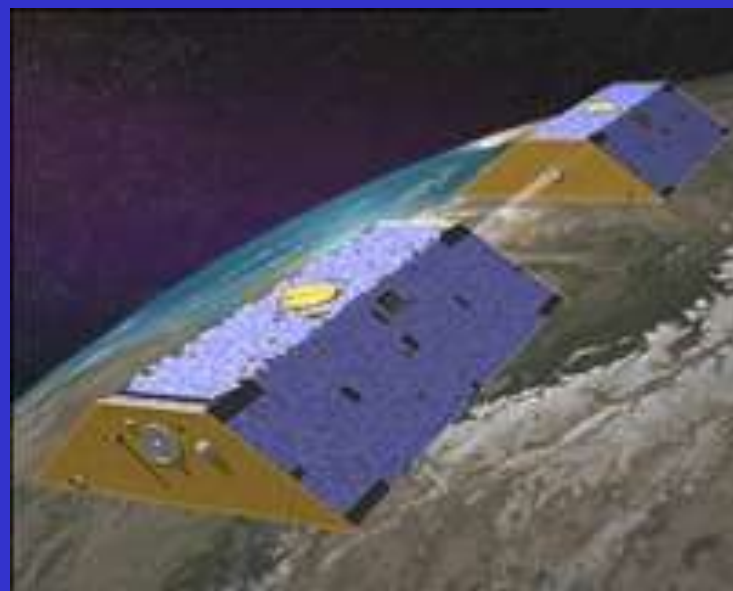
SST – wzajemne śledzenie satelitów:

SST w trybie nisko-nisko (SST *low-low mode*, SST-LL) odnosi się do metody, w której dwa satelity LEO umieszczone na tej samej orbicie w odległości rzędu kilkuset kilometrów mierzą wzajemną odległość D (linię bazy). Efekty pozagrawitacyjne, podobnie jak w trybie *high-low* są mierzone lub kompensowane.

Na podstawie zmian odległości wyznaczana jest różnica przyśpieszeń obu satelitów wynikająca z przyśpieszenia grawitacyjnego Ziemi. Połączenie trybów HL i LL umożliwia znaczne poprawienie czułości i dokładności pomiarów.

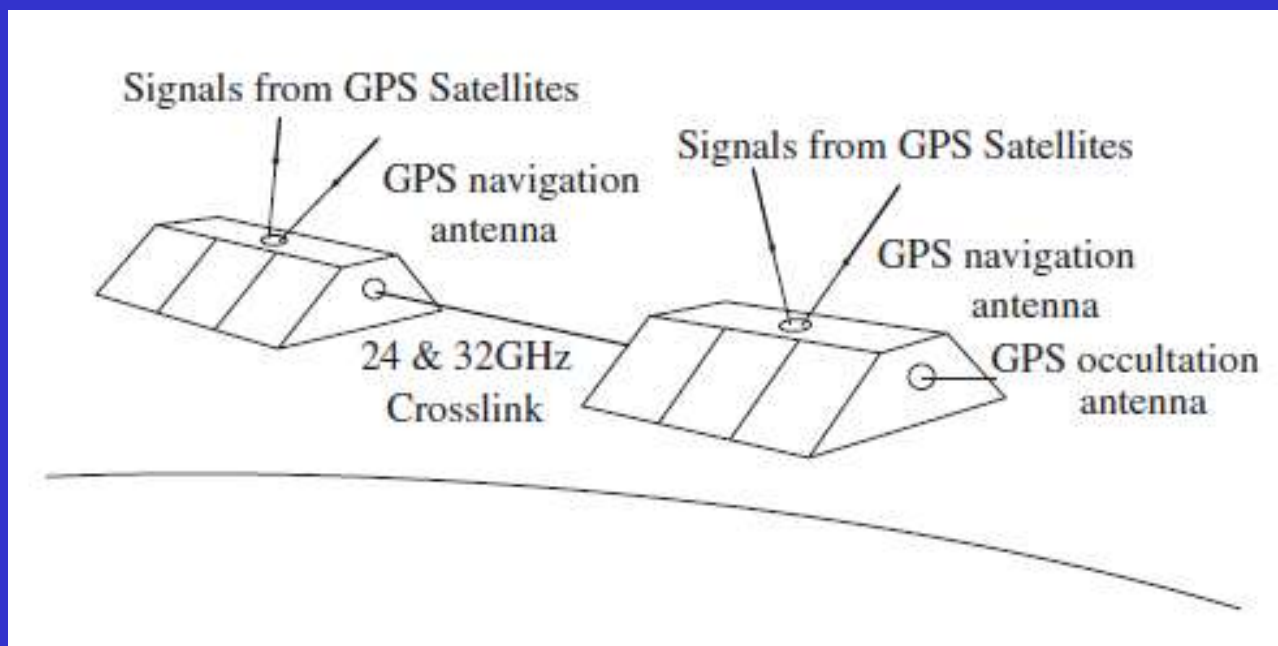
Wynikiem pomiarów jest różnica pierwszych pochodnych potencjału grawitacyjnego na długiej linii bazy.

Satelity misji GRACE z 2002 r.



SST – wzajemne śledzenie satelitów:

SST w trybie nisko-nisko (SST *low-low mode*, SST-LL)



Satellity misji GRACE z 2002 r.

SGG – grawimetria satelitarna:

SGG (*Satellite Gravity Gradiometry*) – pomiar różnic przyspieszeń wykonywany jest bezpośrednio wewnątrz jednego satelity.

Przyspieszenia są mierzone w punktach oddalonych od centrum masy satelity w trzech wymiarach.

Zaletą w stosunku do technik SST jest to, że pozagrawitacyjne przyspieszenia są takie same dla wszystkich czujników wewnątrz satelity w związku z czym można je zniwelować poprzez różnicowanie pomiarów.

Wynikiem pomiarów są drugie pochodne potencjału grawitacyjnego.



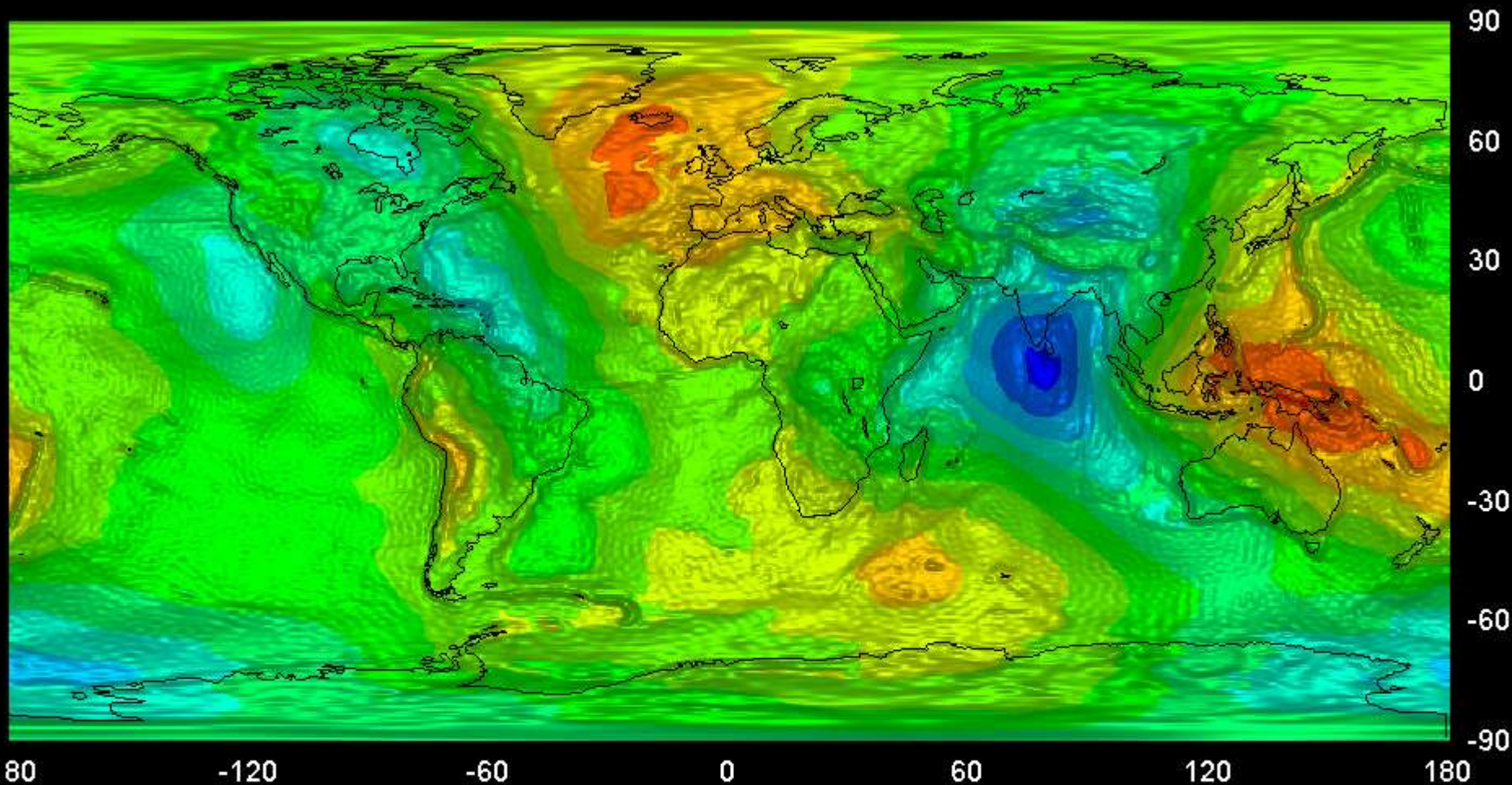
*Satelita misji GOCE,
2009 – 2011 pierwszy z serii*

SGG – grawimetria satelitarna:



space for europe

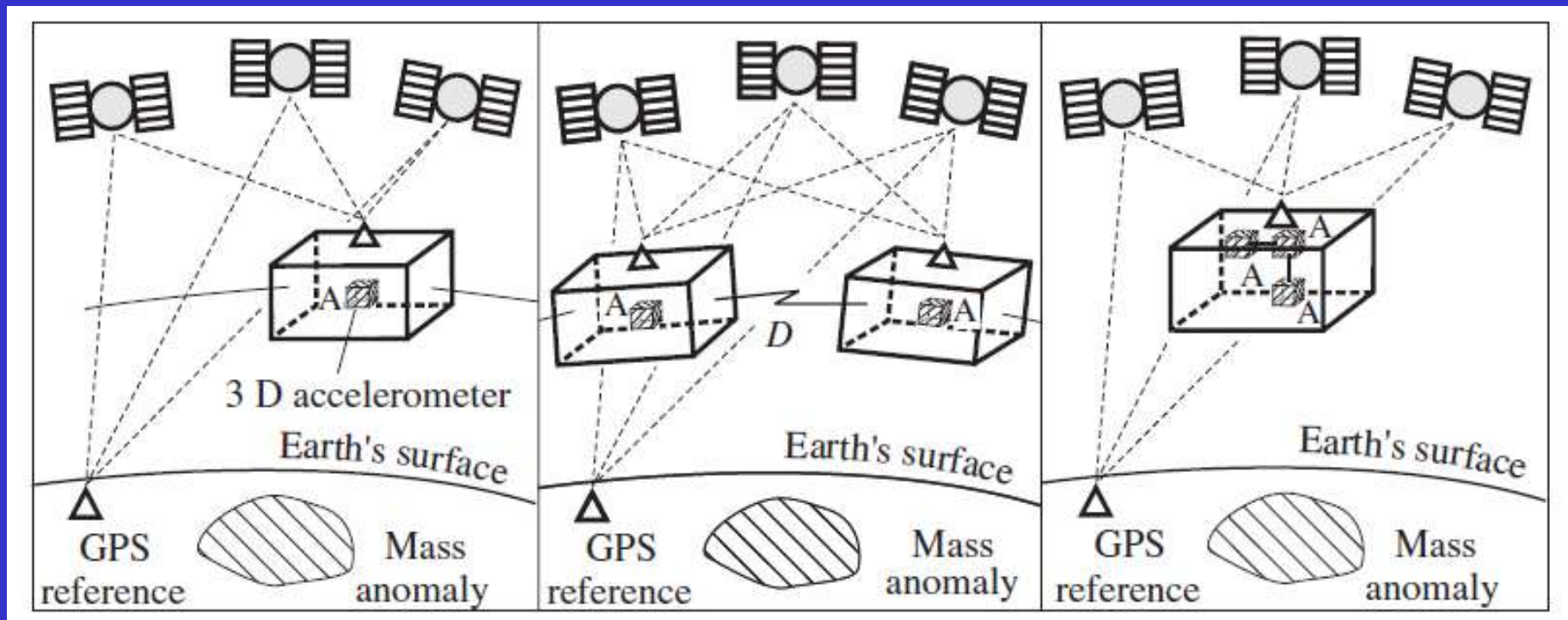
European Space Agency



GOCE first global gravity model

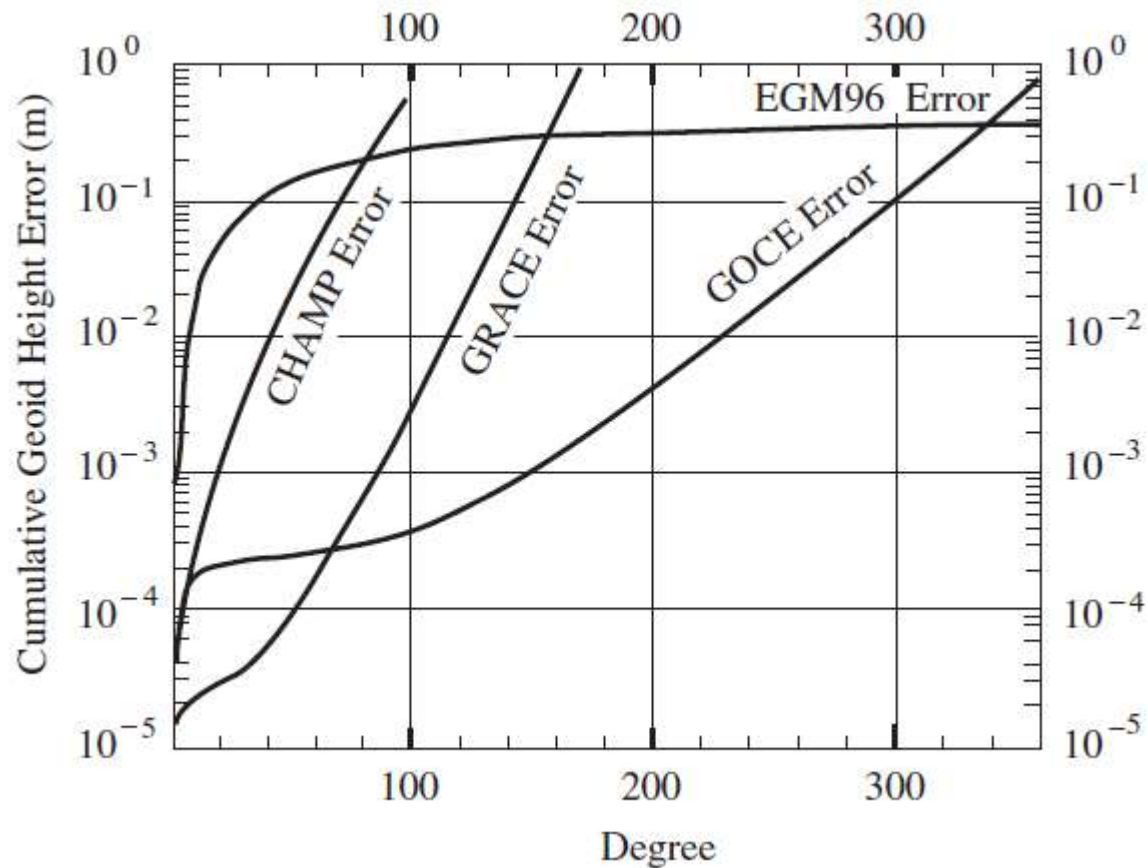


SST i SGG:



Zasada pomiarów w metodach (od lewej): SST-HL, SST-LL i SGG

SST i SGG:



Skumulowane błędy geoidy - modelu pola grawitacyjnego EGM96 z trzech misji satelitarnych

VLBI – interferometria wielkobazowa:

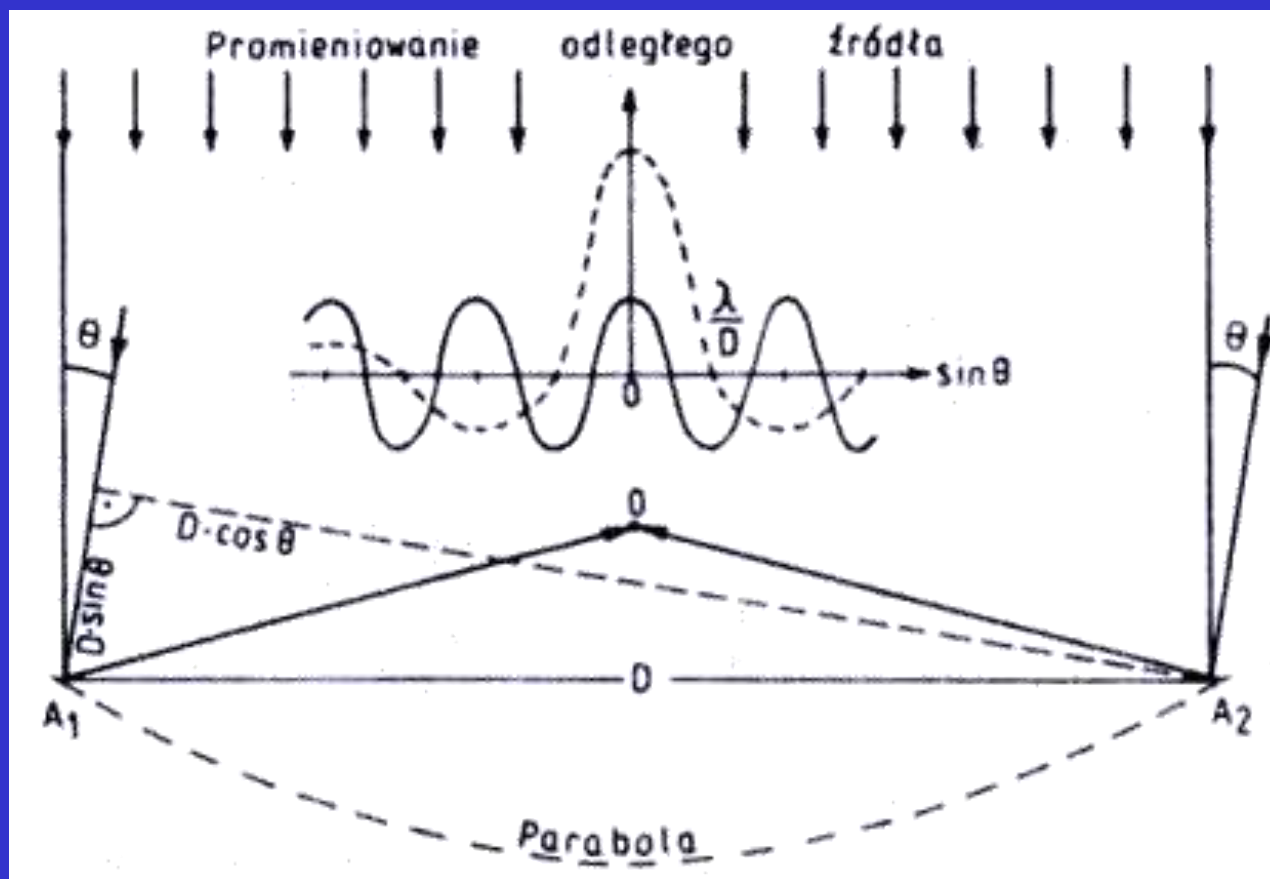
VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) – nie jest metodą stosowaną bezpośrednio w pomiarach geodezyjnych.

Interferometr wielkobazowy jest filtrem częstości przestrzennych przepuszczającym selektywnie tylko określone struktury rozkładu częstotliwości radioźródeł. Synteza apertury, czyli technika odtwarzania obrazów albo map radioźródeł, polega na formowaniu charakterystyki przenoszenia takiego filtru. Radioastronomowie uzyskują w ten sposób nowe narzędzie badawcze, które jest równoważne pojedynczemu teleskopowi o średnicy 10 000 km.

*32m radioteleskop
w obserwatorium przy
Uniwersytecie Mikołaja
Kopernika w Piwnicach
k. Torunia*



VLBI – interferometria wielkobazowa:



Ilustracja zasady działania radioastronomicznych systemów antenowych. Miejsca pomiędzy literami A_1 i A_2 symbolizują powierzchnie zbierające sygnał. Na skraju czasy różnica dróg sygnałów osiąga wartość $D \sin \theta$.

VLBI – interferometria wielkobazowa:

Jeszcze do niedawna radiowe pomiary położeń radioźródeł na niebie nie dorównywały swą dokładnością tradycyjnej astrometrii optycznej, a wykonywano je głównie w celu identyfikacji optycznych odpowiedników radioźródeł. Obecnie pomiary takie radioastronomowie wykonują z precyzjami tysiąckrotnie lepszymi, niż ich koledzy posługujący się techniką optyczną.

Przewrót ten odbił się oczywiście w innych dziedzinach, które zawsze były spokrewnione z astrometrią - geodezji, astronomii dynamicznej i testach teorii grawitacyjnych.

Daleko zaawansowane są już prace nad przygotowaniem nieinercjalnego układu odniesienia opartego na radioźródłach pozagalaktycznych, praktycznie nieruchomych dla ziemskiego obserwatora (ze względu na ich olbrzymie odległości).



*Terminal VLBI
w obserwatorium przy
Uniwersytecie Mikołaja
Kopernika w Piwnicach
k. Torunia*

VLBI – interferometria wielkobazowa:

VLBI jest techniką pomiarową umożliwiającą osiągnięcie lepszych parametrów pracy innych systemów wykorzystywanych w geodezji satelitarnej. Tą techniką wykonywane są:

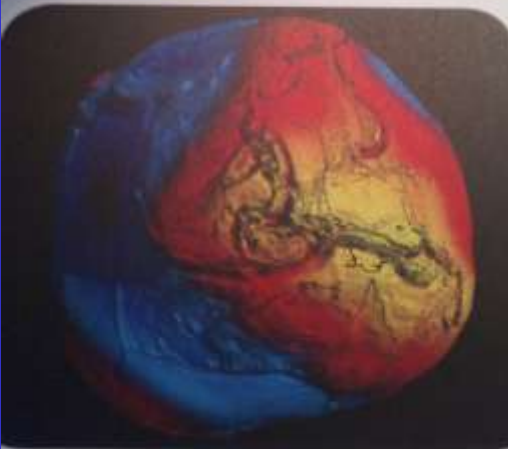
- pomiary parametrów systemu odniesienia dla GPS (GNSS),
- utworzenie i monitorowanie Międzynarodowego Niebieskiego Układu Odniesienia (International Celestial Reference Frame - ICRF),
- utworzenie i monitorowanie Międzynarodowego Ziemskiego Układu Odniesienia (International Terrestrial Reference Frame - ITRF),
- wyznaczenie i monitorowanie zależnych czasowo parametrów ruchu obrotowego Ziemi (Earth Orientation Parameters - EOP), które są składowymi ITRF oraz ICRF.



Berlin Air Show 2012



GLOBAL MONITORING FOR ENVIRONMENT AND SECURITY (GMES)



ESA's contribution to GMES/GEO

ESA's role in the GMES/GEO process

ESA's role in the GMES/GEO process

ESA's role in the GMES/GEO process





