

Kosmická geodézie

- K řešení globálních úloh geodézie, v poslední době však zasahuje i do geodézie v "malém"
- Hlavní úlohy
 - Určování parametrů gravitačního pole Země a jeho časových změn ⇒ určování průběhu geoidu
 - Určování parametrů orientace Země v prostoru
 - Definice a realizace globálních souřadnicových soustav (nebeské a terestrické), tj. pohyb litosferických desek
 - Určování charakteristik oceánů (slapy, topografie hladiny, ...)

Základní rozdělení

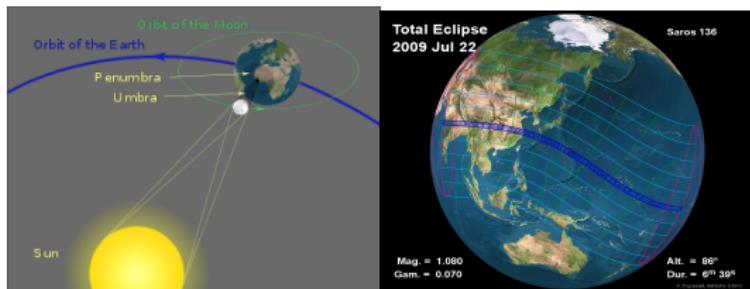
podle metod pozorování

- sledování zatmění, zákrytů
- Družicové metody geodézie
- Kosmické (nedružicové) metody

Jde o zkoumání některých charakteristik Země pomocí objektů, pohybujících se v kosmickém prostoru

Zákryty hvězd Měsícem, zatmění Měsíce, Slunce

- Ve počátkem 20. století pozorování zákrytů byla zásadní metoda pro určování efemeridového času.
- Měsíc se pohybuje cca $0.5''$ za 1s, pokud změřímě čas zákrytu $\pm 0,1\text{s}$
 \Rightarrow poloha Měsíce $\pm 0.05''$.
- Zatmění Měsíce pozorovatelné z celé polokoule přivrácené k Měsíci.
- Zatmění Slunce, částečné, úplné, prstencové, okamžité úplné.



Družicové metody

- Z pozemních stanic
 - Určení směrů na základě fotografických pozorování
 - Laserová lokace družic
 - Dopplerovská pozorování (DORIS)
 - Technologie GPS NAVSTAR
- Z družic nebo mezi družicemi
 - Družicová altimetrie
 - "satellite to satellite tracking" – pozorování mezi družicemi
 - Družicová gradientometrie

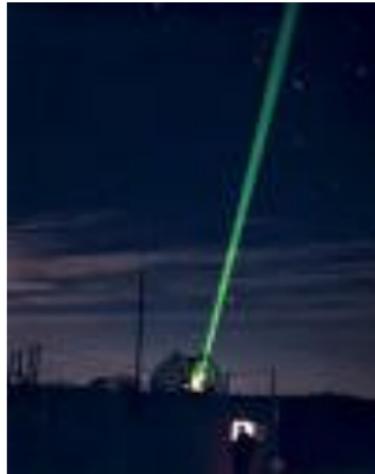
Určení směrů na základě fotografických pozorování

- Fotografování družice na hvězdném pozadí – známé polohy hvězd tvoří souřadnicový systém
- Zpracování metodami pozemní fotogrammetrie
- Jedna z prvních pozorovacích metod, speciální družicové komory, přesnost $1'' - 4''$



Laserová lokace družic

- Měření vzdálenosti stanice družice na základě měření transitního času, který potřebuje světelný paprsek pulsního laseru k překonání vzdálenosti stanice-družice-stanice
- Přesnost 1 až 3 cm, $D = \frac{1}{2}c\Delta t + \sum \sigma$



Dopplerovská pozorování

- Vycházejí ze známého Dopplerova jevu příjmu jiného kmitočtu f_R než byl vysílaný f_T , pohybují-li se zdroj a přijímač vzájemnou rychlostí v .
- **Odvození:**

vztahy mezi dráhou s , časem t a rychlostí c

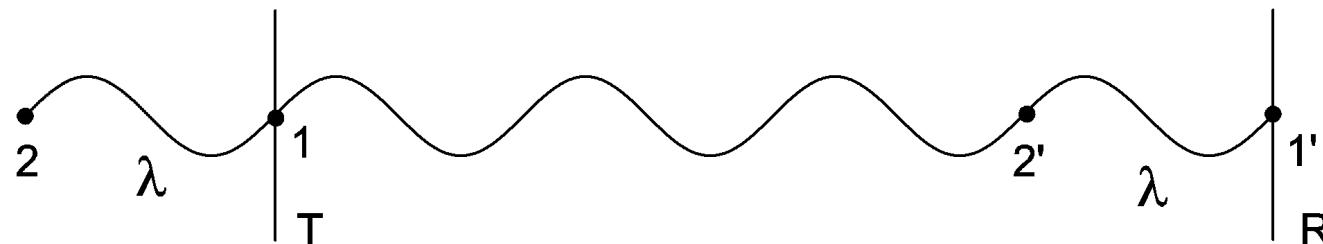
$$s = ct$$

a vlnovou délkou λ , frekvencí f a časovým intervalem Δt

$$\lambda = c\Delta t = \frac{c}{f}$$

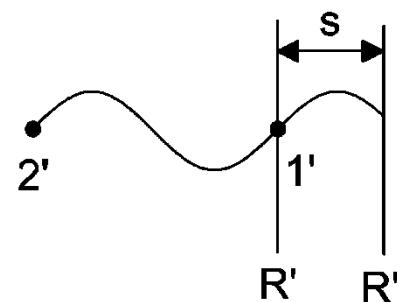
Dopplerovská pozorování

- Předpokládejme nejprve, že body **T** a **R** se vzájemně nepohybují.
- Bod 2 vlny projde bodem T za dobu Δt_T a bod 2' projde bodem R za dobu Δt_R . Pokud se bod T vůči bodu R nepohybuje jsou časové intervaly stejné $\Delta t_T = \Delta t_R$.



Nechť se nyní bod R vzdaluje od bodu T rychlostí v .

Pak bod 2' projde bodem R později – v pozici R"



Dopplerovská pozorování

- Časový interval průchodu jedné vlny je tedy

$$\Delta t_R = \Delta t_T + \Delta t_{z \text{ pohybu}} = \Delta t_T + \frac{s}{c} = \Delta t_T + \frac{v \cdot \Delta t_T}{c}$$

a z toho

$$\Delta t_R = \Delta t_T \left(1 + \frac{v}{c} \right)$$

Pro frekvenci pak platí

$$f_R = f_T \left(1 + \frac{v}{c} \right)^{-1}$$

Ve vakuu tedy máme

$$f_R = \frac{f_T}{1 + \frac{v}{c}} \approx f_T \left(1 - \frac{v}{c} + \{2\} \right) \rightarrow v = \frac{c}{f_T} (f_T - f_R)$$

Dopplerovská pozorování

- Známe-li f_T a změříme f_R , můžeme určit **radiální rychlosť v** .
Z důvodů minimalizace ztrát signálu v ionosféře se pro f_T používá kmitočtů větších než 100 MHz, nelze snadno měřit dopplerovsky posunutý kmitočet f_R .
- Proto se při měření užívá v přijímači směšování s kmitočtem pomocného generátoru f_G a měří se rozdílový kmitočet

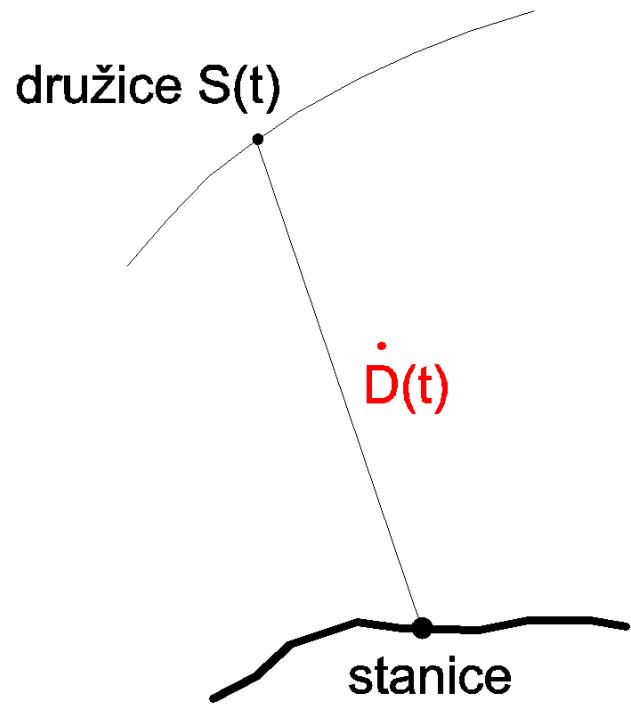
$$f_D = f_G - f_R$$

Pak lze psát

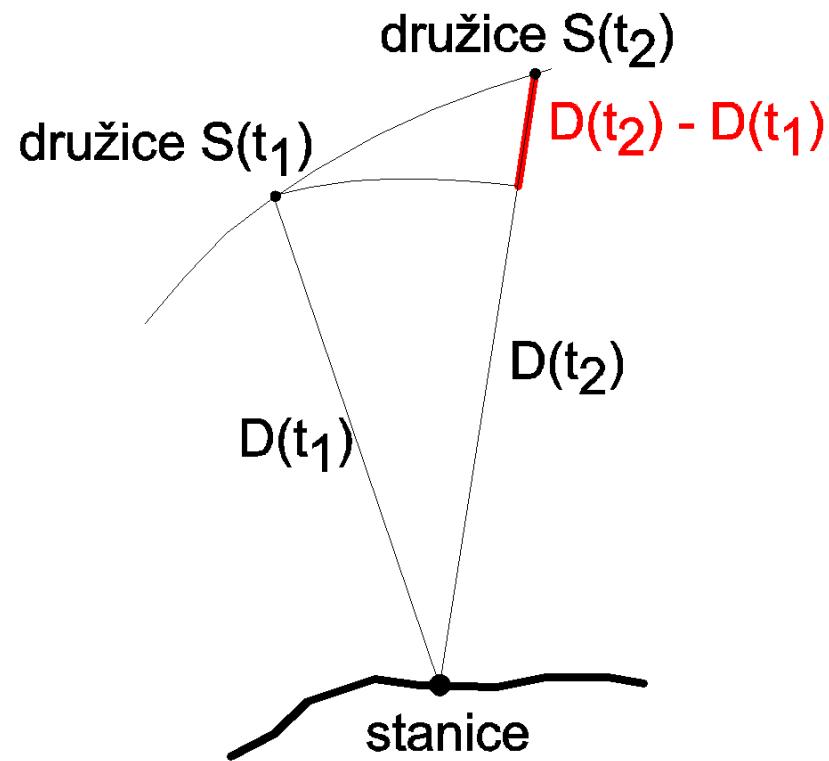
$$v = \frac{c}{f_T} (f_T - f_G) - f_R + f_G = \frac{c}{f_T} f_D + \frac{c}{f_T} (f_T - f_G)$$

Kmitočet f_D se měří čítačem během nejvýše jednotek sekund.

Dopplerovská pozorování



diferenciální "Doppler"



integrální "Doppler"

Dopplerovská pozorování

- Pokud počítáme periody kmitočtu f_D po delší dobu (DORIS:10 sek; TRANSIT: 2 min) dojdeme k **integrální Dopplerovské metodě**.
- Rozdíl radiálních vzdáleností ke družici je

$$D_2 - D_1 = \int_{t_1}^{t_2} v dt = \frac{c}{f_T} \int_{t_1}^{t_2} f_D dt + \frac{c}{f_T} (f_T - f_G) \int_{t_1}^{t_2} dt$$

Čas t_1 volíme a čas t_2 určíme tak, aby integrál z f_D podle dt bylo celé číslo N , pak

$$D_2 - D_1 = \frac{c}{f_T} N + \frac{c}{f_T} (f_T - f_G)(t_2 - t_1)$$

kde $D_2 - D_1$ je určený rozdíl vzdálenosti k družici v časech t_2 a t_1 , a N je počet period mezi těmito časy.

- Změřené hodnoty v nebo $D_2 - D_1$ se musí redukovat o přístrojové opravy, vlivy troposféry a ionosféry a o družicovou aberaci.
- Dosažitelná teoretická přesnost metody je
 - 0.4 mm.s⁻¹ v rychlosti a 1 až 5 cm v rozdílu vzdáleností u integrální metody.
- Skutečná přesnost je o něco horší, což je dáno vlivem nejistot v redukcích a šumem v aparatuře.

DORIS

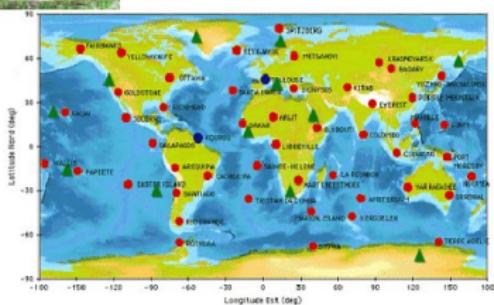
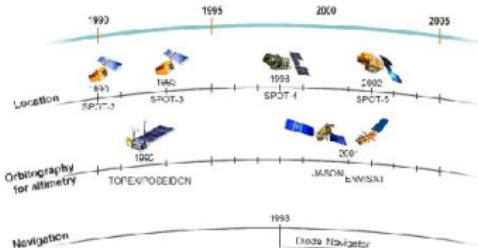
(fr. Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré par Satellite,
ang. Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)

- vyvinutý Francií ve spolupráci s USA
- primární cíl systému: určování přesných druh nízko letících družic (100 – 1000 km)
- dalším produktem: souřadnice pozemních stanic

- Na **zemí** je umístěna síť **vysílačů**, které vysílají na dvou frekvencích 2036.24 MHz a 401.25 MHz pro odstranění vlivu ionosféry.
- Na **družici**, jejíž dráha se má určit, pracuje **přijímač signálu**, který využívá pro určení polohy dopplerovské metody.

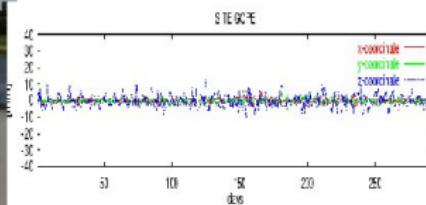
- Pozemní stanice vyžadují pouze zdroj elektrické energie – není nutné připojení k internetu pro přenos dat do datových center, takže jejich rozložení může být rovnoměrné po celém světě.
- nízké náklady na vybudování stanic
- O umístění stanice rozhoduje řídící centrum v Toulouse ve Francii.

Dopplerovská pozorování – systém DORIS



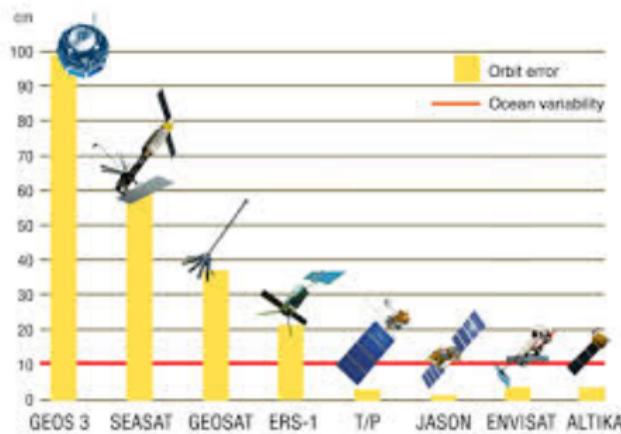
Technologie GPS NAVSTAR

- Radiová metoda, z kódových a fázových měření určíme relativní vektory mezi stanicemi
- Pro definici globálního souřadnicového systému se používá permanentních pozorování na stálých stanicích

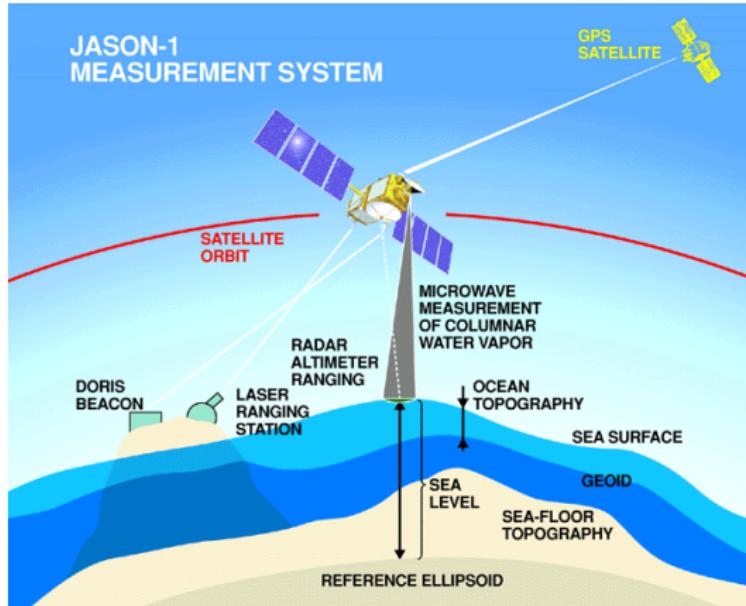


Družicová altimetrie

- Radarová nebo laserová měření mezi družicí a mořskou hladinou
- Poloha družice se určí jinou metodou (SLR, GPS, DORIS) – přesnost v radiálním směru 3 cm
- Družice SEASAT, GEOSAT, TOPEX/Poseidon, Jason, ICESAT (laser)



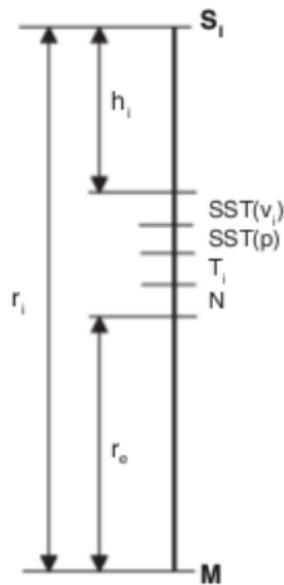
Družicová altimetrie



Družicová altimetrie

$$r_i = h_i + SST(v_i) + SST(p) + T(i) + N + r_e$$

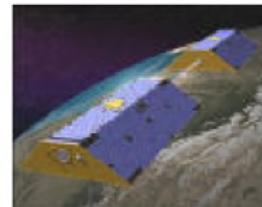
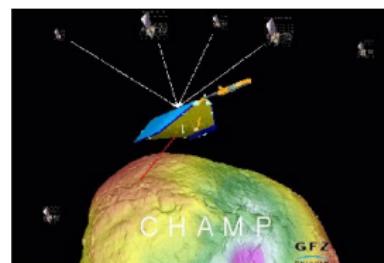
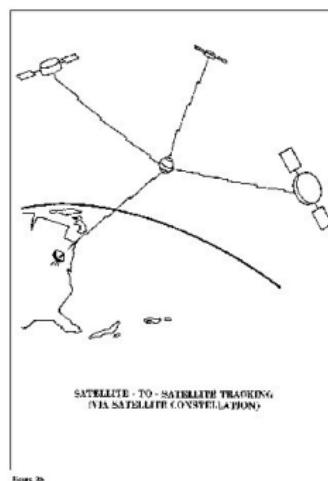
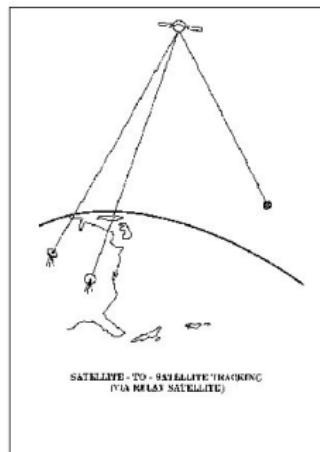
- h_i naměřená výška (po přístrojových korekcích)
- r_i průvodič družice
- r_e elipsoid
- N převýšení geoidu
- T_i oceánské slapy
- $SST(v_i)$ topografie oceánu proměnná
- $SST(p)$ topografie oceánu konstantní



Satellite to satellite tracking

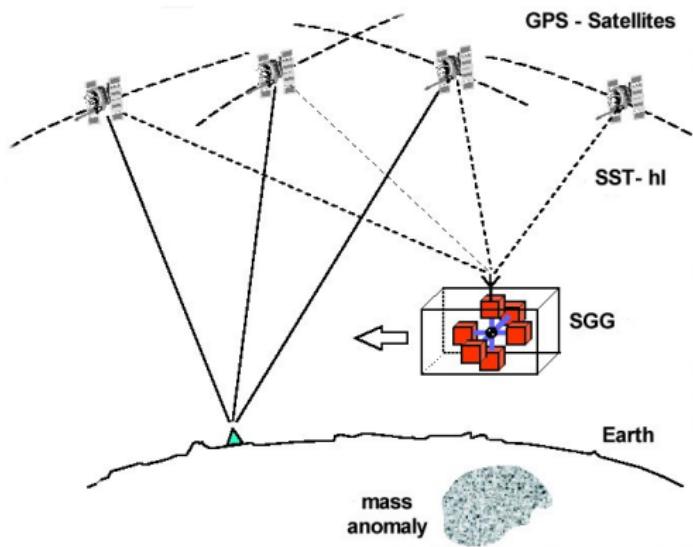
pozorování mezi družicemi

Měří se vzdálenosti nebo změny vzdáleností dopplerovsky, radarem, dálkoměrem nebo GPS

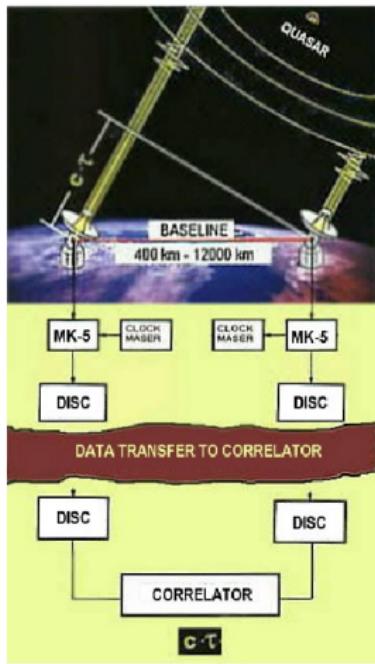


Družicová gradientometrie

- Měření druhé derivace geopotenciálu (=první derivace tíhového zrychlení) pomocí mikroakcelerometrů, umístěných na družici
- Poloha družice se určuje jinými metodami (doppler, SLR, GPS, radar)



Very Long Baseline Interferometry - VLBI



VLBI

Very Long Baseline Interferometry - VLBI

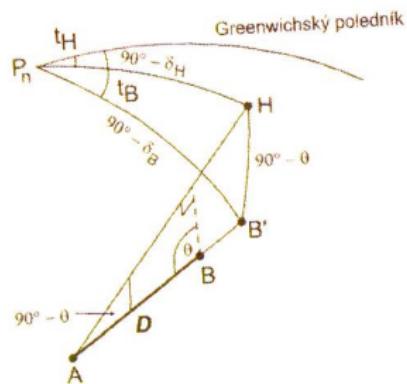
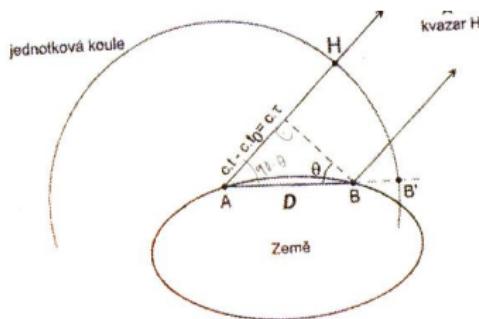
V korelátoru jsou signály z obou antén vynásobeny, odstraněna vysokofrekvenční složka.

$$r(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T S_2(t)S_1(t-\tau)dt$$

Funkce $r(\tau)$ je maximální v případě, že $S_2(t) = S_1(t - \tau)$, tj. shodné signály posunuté o τ .

VLBI

pokr.

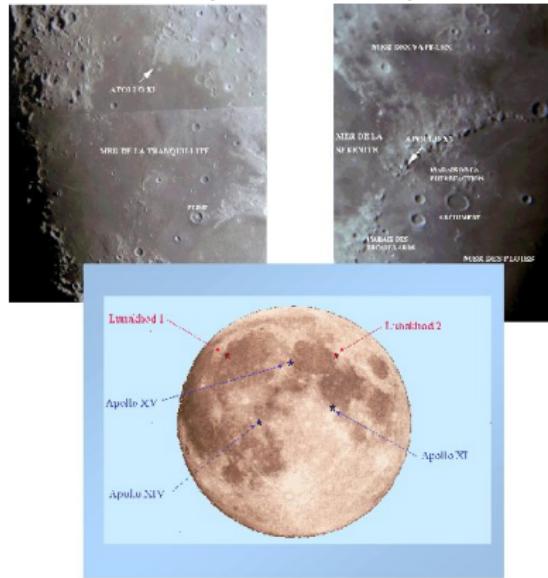


$$\tau = \tau_C + \frac{D}{c} \sin \theta, \quad \sin \theta = \sin \delta_B \sin \delta_H + \cos \delta_B \cos \delta_H \cos(t_B - t_H)$$

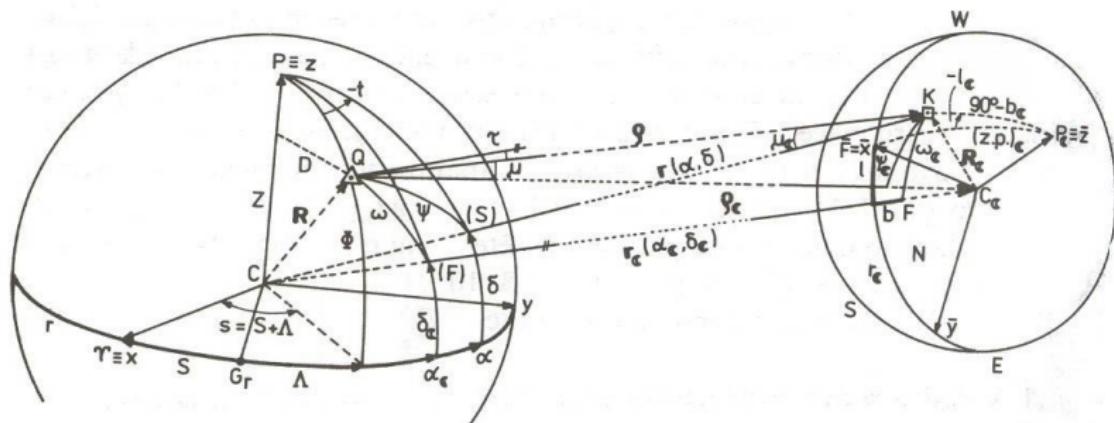
τ_C je rozdíl synchronizace hodin.

Laserová lokace Měsíce - LLR

Měření vzdáleností stanice-Měsíc-stanice, obdoba SLR ale na větší vzdálenost (385000 km)



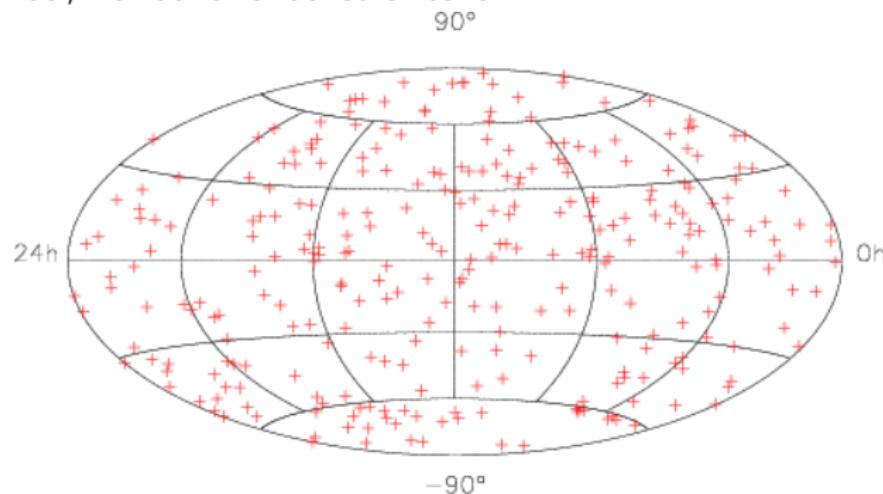
Laserová lokace Měsíce - LLR



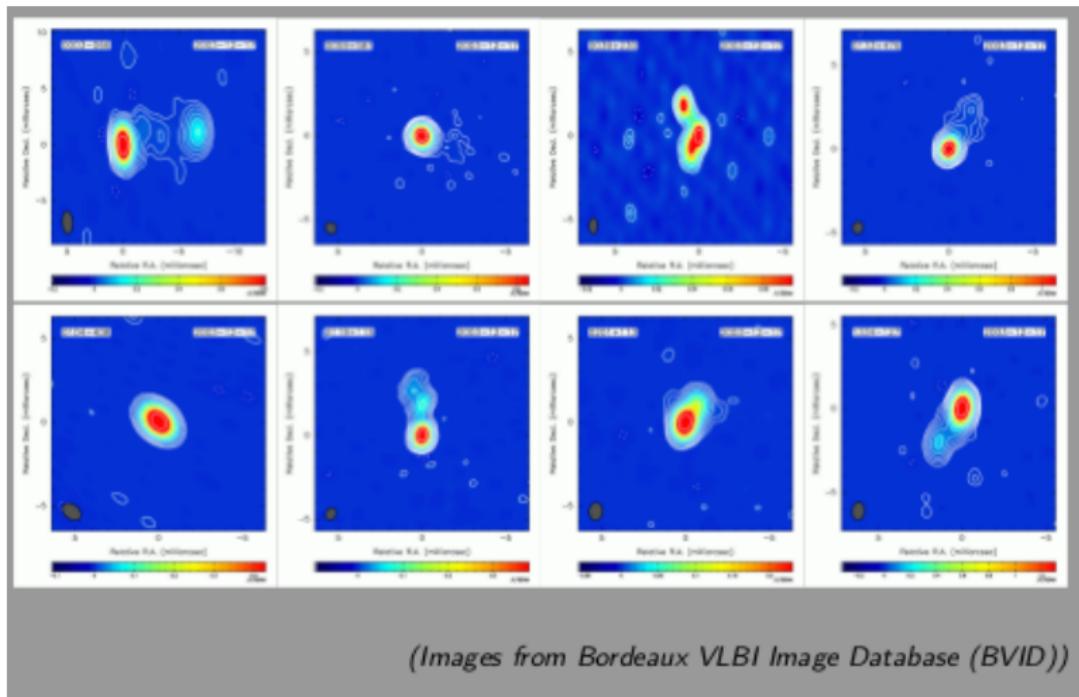
International Celestial Reference Frame

2nd realization 2009

- Realizace ICRS
- polohy 3414 kompaktních extragalaktických radiových zdrojů pozorovaných VLBI
- 295 z nich jsou definiční zdroje, tj. jsou polohově stabilní a mají jednoduchou, koncentrickou strukturu.

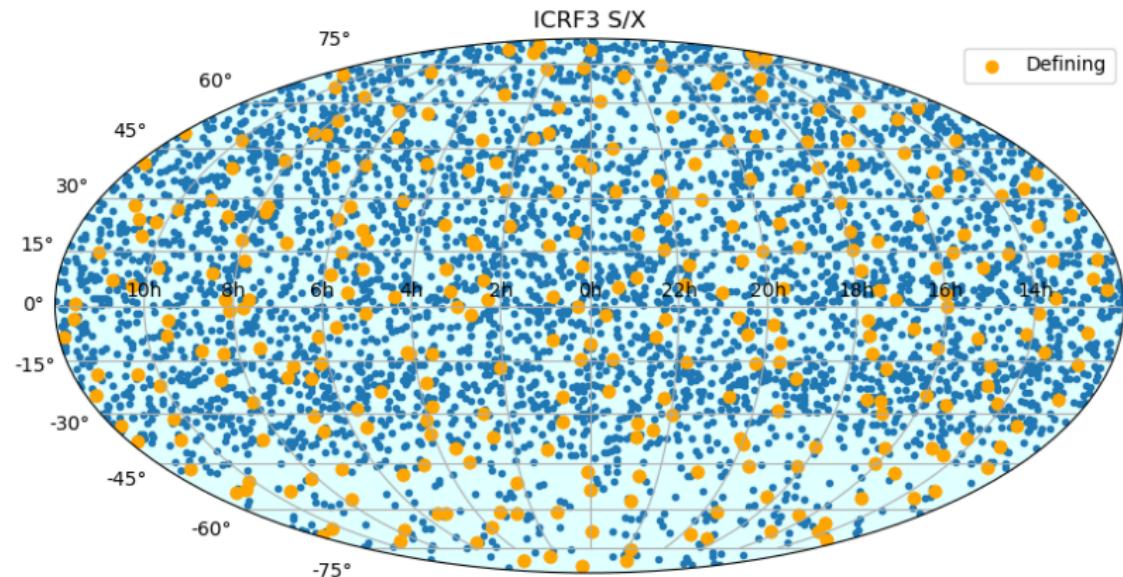


Struktury definičních radiových zdrojů



- 40 let VLBI pozorování (frekvence 2.3 a 8.4 GHz) a (24 GHz a 8.4/32 GHz)
- 4536 extragalaktických objektů, 303 definujících ICRS 8.4 GHz, 24 GHz 824 objektů; 32 GHz 678 objektů.
- Galaktocentrické zrychlení (polohy 2015) 0.0058 mas/yr, pro nejpřesnější pozorování. Jednotlivé zdroje ± 0.030 mas.
- ICRF3 30. Valné shromáždění IAU Vídeň (srpen 2018) platí od 1.1. 2019.

ICRF 3



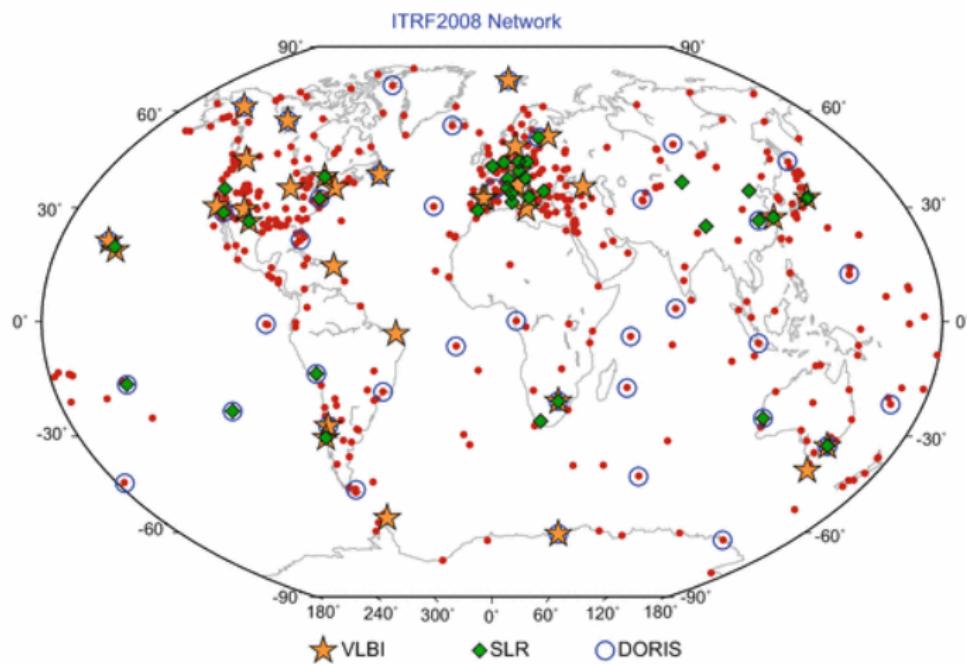
Terrestrial Reference System

- Terrestrická referenční soustava pro určení polohy a pohybů na rotující Zemi.
Je realizována
 - pomocí přijatých poloh vybraných observatoří a jejich časových změn.

International Terrestrial Reference Frame

ITRF2008

stations 900/500/84 (1/2/3 co-located technics)



Altamini et al., 2011, JG 85

ITRF2008 horizontální a vertikální rychlosti.

Altamini et al., 2011, JG 85

