




3. Radionica za nastavnike stručnih predmeta stukovnih škola koje obrazuju tehničare geodezije i geoinformatike, GTŠ, Zagreb, 17.-18.09.2015.

SVEMIRSKA GEODEZIJA
 Drago Špoljarić
 Sveučilište u Zagrebu
 GEODETSKI FAKULTET



Što je geodezija? Koje su njene znanstvene i stručne djelatnosti/zadaće?

Koja su područja/grane geodezije?

“Geodezija je znanost o izmjeri i prikazivanju Zemljine površine” (Helmert 1884)

geoznanstvena disciplina koja se bavi
 “... određivanjem Zemljina oblika i vanjskoga polja sile teže kao i općeg Zemljina elipsoida iz veličina, koje su određivane na Zemljinoj površini i u vanjskom prostoru” (Torge 1980)

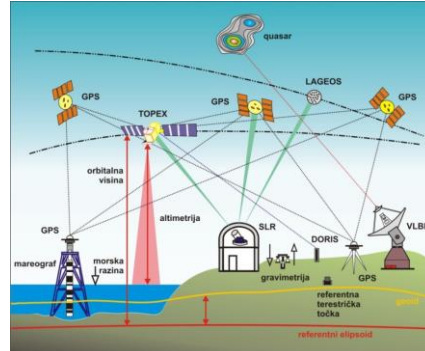
“Tehnika i znanost koja se bavi izmjerom i prikazom Zemljine površine, određivanjem oblika Zemlje i njezina polja sile teže. ...” (Frančula i Lapaine 2008)

<p>Nekad:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Niža i Viša geodezija - Praktična geodezija - Inženjerska geodezija - Teorija pogrešaka i račun izjednačenja - Matematičko-fizikalna geodezija - Fotogrametrija (terestrička i aero) - ... 	<p>Danas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Izmjera zemljišta - Terenska mjerenja - Inženjerska geodetska osnova - Analiza i obrada geodetskih mjerenja - Državna izmjera / Fizikalna geodezija - Fotogrametrija i daljinska istraživanja - ... - Pomorska geodezija - Satelitska geodezija - Svemirska (planetarna) geodezija
--	---



druga polovica XX. st. - revolucija u geodeziji (i astrometriji) DOBA SATELITSKE I SVEMIRSKJE GEODEZIJE (I ASTROMETRIJE)

- lansiranjem prvog Zemljinog umjetnog satelita (Sputnik 1, 1957.) a potom i drugih te uporaba satelita za geodetske potrebe (izučavanje Zemljine veličine i oblika iz svemira ili opažanja satelita sa Zemlje) počeci su razvoja – s a t e l i t s k e g e o d e z i j e
- razvoj dugobazisne radiointerferometrije (VLBI) i njene primjene ponajprije u astrofizici a potom u geodeziji - g e o d e t s k i V L B I, novo je razdoblje ekstra-preciznog modeliranja /određivanja inercijalnog nebeskog referentnog sustava i realizacije i stabilnost nebeskog referentnog okvira



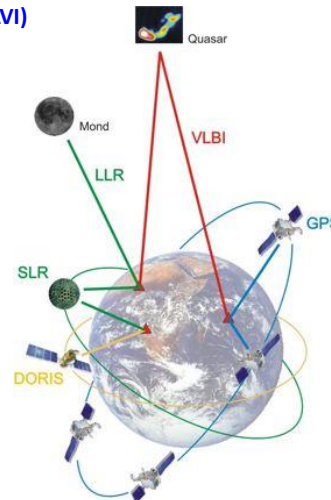
satelitska geodezija – globalni navigacijski satelitski sustavi (GNSS: GPS, GLONASS, GALILEO, BeiDou, ...) i satelitske misije (CHAMP, GRACE i GOCE, ...); klasični (NNSS → TRANSIT) i suvremeni dopplerovski sustavi (DORIS); laserski mjerni sustavi (SLR, LLR) te geodetski VLBI mjerni su sustavi/tehnike s v e m i r s k e g e o d e z i j e (space geodesy)

U geodeziji se pojam *Space Geodesy* odnosi na sva mjerenja/motrenja Zemljinih umjetnih satelita, Mjeseca i quasara, dakle iznad 100 km n. visine (Karman line). U travnju 2009., precizno određen rub svemira (118 km).

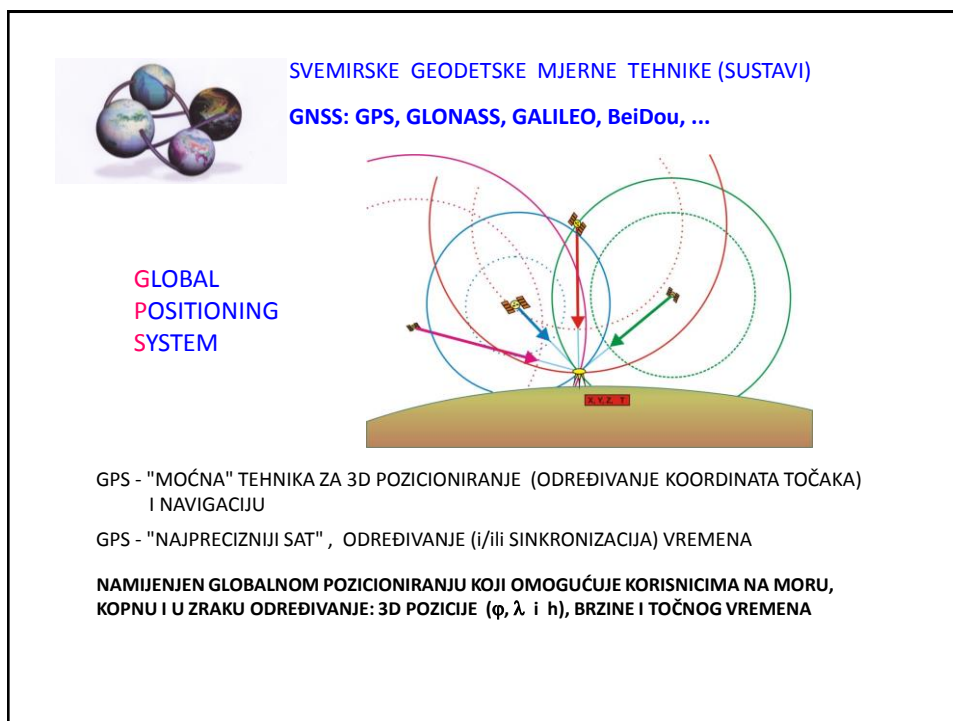
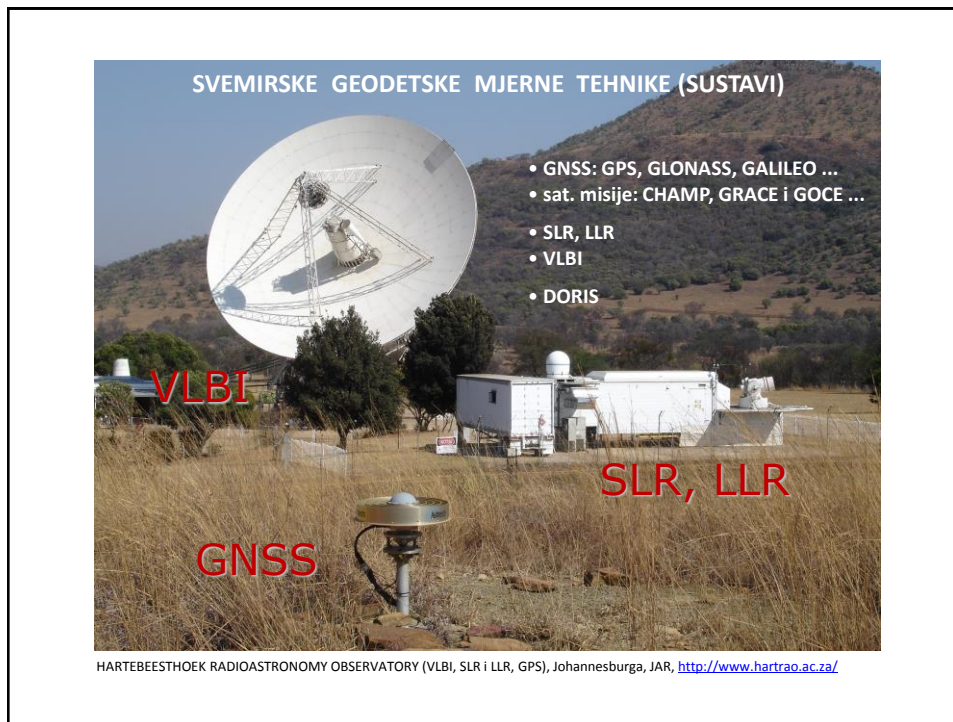


SVEMIRSKJE GEODETSKE MJERNE TEHNIKE (SUSTAVI)

- dopplerovska mjerenja (NNSS→TRANSIT, DORIS)] GEOMETRIJSKE i DINAMIČKE VELIČINE
- GNSS: GPS, GLONASS, GALILEO, ... sat. misije: CHAMP, GRACE i GOCE, ...] GEOMETRIJSKE i DINAMIČKE VELIČINE
- SLR, LLR] GEOMETRIJSKE i DINAMIČKE VELIČINE
- VLBI (!)] GEOMETRIJSKE VELIČINE



GEOMETRIJSKE VELIČINE određivanje položaja (koordinata) i promjene položaja, određivanje duljine i rotacije baze
DINAMIČKE VELIČINE određivanje Zemljinog polja sile teže i satelitskih orbita i dr.

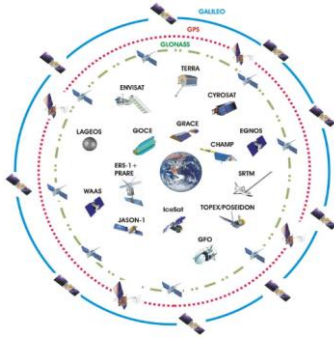




SVEMIRSKJE GEODETSKE MJERNE TEHNIKE (SUSTAVI)

Satelitske misije:

CHAMP, GRACE, GOCE, TOPEX/POSEIDON, Jason-1, ERS-2, ENVISAT, TerraSAR-X, ICESAT, LAGEOS-1 & 2, ...



Misija	Voditelj misije	Primarni interes misije
CHAMP	Njemačka	gravitacija, magnetizam, atmosfera
GRACE	SAD, Njemačka	gravitacija (stacionarno i vremenski promjenjivo polje), atmosfera
GOCE	ESA	gravitacija (stacionarno polje velike rezolucije)
TOPEX/POSEIDON	SAD, Francuska	oceanska altimetrija
Jason-1	SAD, Francuska	oceanska altimetrija
ICESAT	SAD	altimetrija leda
CRYOSAT	ESA	altimetrija leda
ERS-2	ESA	altimetrija, klima, okoliš
ENVISAT	ESA	altimetrija, klima, okoliš
TerraSAR-X	Njemačka	SAR, INSAR, atmosfera
LAGEOS-1 & 2	SAD	referentni sustavi, gravitacija
GPS	SAD	navigacija, pozicioniranje, određivanje putanje, prijenos vremena, rotacija Zemlje....
GALILEO	EU, ESA	navigacija, pozicioniranje

CHAMP, GRACE i GOCE satelitske su misije koje su obilježile zadnje desetljeće u pogledu istraživanja Zemljina geosustava, imajući važnu ulogu u rješavanju znanstvenih i stručnih problema više disciplina kao što su geodezija, geofizika, oceanografija, čvrsta Zemlja, glaciologija, hidrologija i dr.



SVEMIRSKJE GEODETSKE MJERNE TEHNIKE (SUSTAVI)

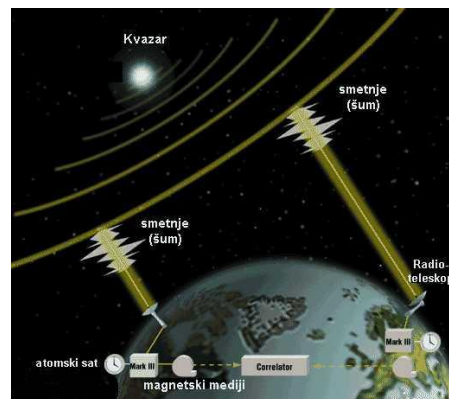
VLBI (Very Long Baseline Interferometry)

DVA SU ZAHTEVA U RADIOASTRONOMIJI:

- utvrditi postojanje radioizvora i
- postići što veću rezoluciju ili razlučivanje (što preciznije odrediti smjer pristizanja radio signala)

DVIJE SU GLAVNE PRIMJENE VLBI:

- dobivanje slike kompaktnog radioizvora (astrofizički VLBI) i
- određivanje gibanja/pomicanja radioantene u odnosu na izvagalaktički radioizvor (geodetski VLBI)



GEODETSKI VLBI – GEOMETRIJSKA METODA ODREĐIVANJA DULJINE I ROTACIJE (ORIJENTACIJE) VRLO DUGE BAZE, MJERENJEM VREMENA KAŠNENJA/ZAOSTAJANJA PRIMLJENOG VALNOG FRONTA IZVANGALAKTIČKOG RADIOIZVORA NA DVIJE ILI VIŠE RADIOANTENA VLBI BAZE

VREMENSKO KAŠNjenje/ZAOSTAJANJE (RAZLIKA U VREMENU DOLASKA VALNOG FRONTA NA DVIJE PRIJAMNE ANTENE Δt) ODREĐUJEMO IZ MJERENJA

a) faznog kašnjenja (faznog pomaka)

$$\Delta t = (N + \lambda/2\pi)/f$$

b) grupnog (skupnog) kašnjenja

$$\Delta t = (1/2\pi) \Delta\lambda/\Delta f$$

SPEKTAR ELEKTROMAGNETSKOG VALA

Mikrovalovi/dvije frekv.:
 GPS 1.2 / 1.6 GHz
 VLBI 2.3 / 8.4 GHz
 DORIS 0.4 / 2.0 GHz

osnovna frekvencija GPS signala je 10,23 Mhz

satelit emitira dva nosača vala
 L1: 154 x 10,23 Mhz = 1575,42 Mhz (oko 19,05 cm)
 L2: 120 x 10,23 Mhz = 1227,60 Mhz (oko 24,45 cm)

2 x 10^10 Hz - valna dužina oko 15 cm
 8 x 10^10 Hz - valna dužina oko 4 cm

Veličina: Mt. Everest, neboder, čovjek, mali prst, čavla, prašina, bakterija, virus, atom, atomska jezgra

radio prozor: nepropusna atmosfera (100 m - 10 mm), nepropusna atmosfera (100 m - 100 nm), nepropusna atmosfera (100 m - 100 nm)

- valne dužine nekih karakterističnih elektromagnetskih zračenja

elektromagnetsko zračenje	valne dužine
γ	<0,01 nm
x	0,01 - 10 nm
ultravioletno	10 - 300 nm
vidljiva svjetlost	0,3 – 0,8 μ m
infracrveno	1 - 1000 μ m
radio	0,001 - 30 m

- karakteristične frekvencije su iz X-područja (valna dužina oko 4 cm / frekvencija 8 GHz) i S-područja (valna dužina 15 cm / frekvencija 2 GHz)

• signali radioizvora su vrlo male snage, reda veličine 1 Jansky ($1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$)



RADIOTELESKOP - UREĐAJ ZA PRIHVAT RADIOVALOVA

KUTNA RAZLUČIVOST (REZOLUCIJA) RADIOTELESKOPA ODREĐENA JE OMIJEROM VALNE DULJINE RADIJACIJE I PROMJEROM TELESKOPA D

$$r = \lambda/D$$

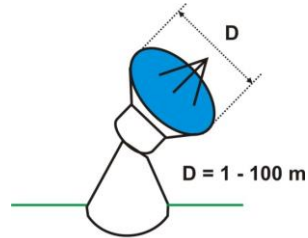
Mikrovalno područje/dvije frekv.:		
VLBI	2.3 GHz	15 cm
	8.4 GHz	4 cm

npr. $\lambda = 20 \text{ cm} = 0,20 \text{ m}$, $D = 100 \text{ m}$

$r = 0,20/100 = 0,002 \text{ rad}$

$r = 0,002 \times 206265'' = 412,53'' = 6' 52,5'' = 0,12^\circ$

(- prividni promjer punog Mjeseca ili Sunca je 0,5°)



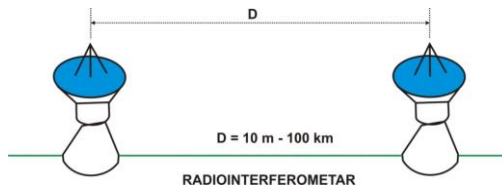
RADIOTELESKOP

- rezolucija radioteleskopa mnogo je puta manja od rezolucije optičkih teleskopa istog promjera (npr. ako radioteleskop prima radiovalove duljine 3,75 cm treba imati promjer 15 km, da bi postigao razlučivost optičkog teleskopa promjera 20 cm)
- povećanje rezolucije radioteleskopa bez povećanja osjetljivosti postignuto je konstrukcijom radiointerferometara



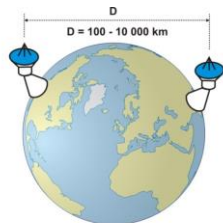
RADIOINTERFEROMETAR

SUSTAV OD DVA ILI VIŠE RADIOTELESKOPA, KOJI PRIMAJU VALOVE DRUGE FAZE, A UKUPAN ZAPIS - "ZAJEDNIČKA SLIKA" - NASTAJE INTERFERENCIJOM (ZBRAJANJEM SIGNALA ŠTO IH SVAKI RADIOTELESKOP PRIMA NEOVISNO)

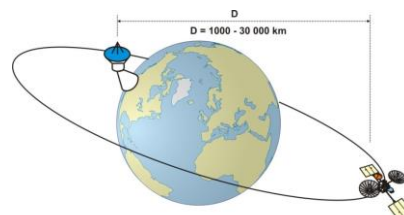


RADIOINTERFEROMETAR

- uvođenjem radiointerferometara (duljina baze jednaka efektivnom promjeru radioteleskopa) izbjegnute su antene velikih promjera a povećana razlučivost



VLBI (Very Long Baseline Interferometer)
RADIOINTERFEROMETAR VRLO DUGE BAZE



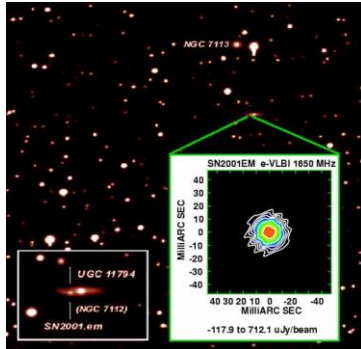
SVEMIRSKI VLBI
SVEMIRSKI RADIOINTERFEROMETAR



SVEMIRSKI RADIOIZVORI

emitiraju izrazito inkoherentne signale širokog frekvencijskog spektra od 10^7 do 10^{11} Hz

- preko 7000 izvangalaktičkih radioizvora aktivno istraživani
- oko 25% točkasti izvori (uz kutnu rezoluciju od $0.001''$)



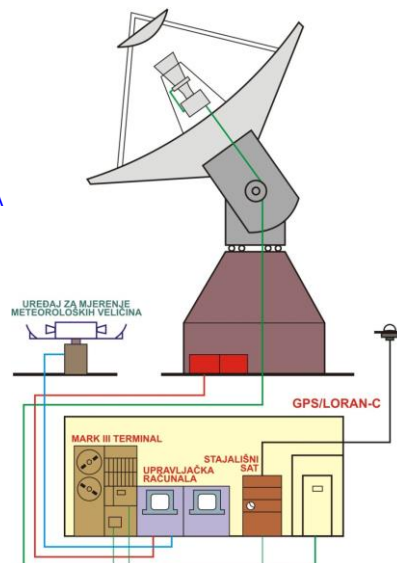
KVAZARI

idealni radioizvori za geodetski vlbi

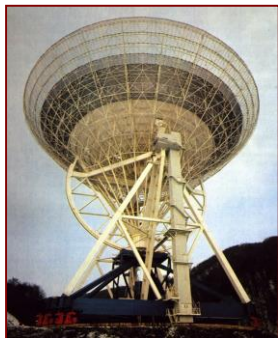
- QUASAR (Quasi stellar object) pronađeni u ranim 1960.-im najprije identificirani kao radioizvori, a potom potvrđeni i optički
- vrlo udaljeni objekti (milijarde svjetl. god.), nevjerovatne energije (do 1000 puta sjajniji od normalnih galaksija)
- kompaktan (zbijen) oblik
- neznatno vlastito kretanje (promjena smjera)



- ANTENA (RADIOTELESKOP)
- SUSTAV ZA UPRAVLJANJE, MJERENJE I ZAPISIVANJE PODATAKA
- FREKVENCIJSKI I SATNI STANDARD (ATOMSKI SAT I FAZNI OSCILATOR)
- KORELATOR - SUSTAV ZA KORELIRANJE PODATAKA
- SUSTAV ZA KALIBRACIJU
- SUSTAV ZA PRIKUPLJANJE ATMOSFERSKIH (METEOROLOŠKIH) PODATAKA
- VLBI SATELIT(i)



RADIOTELESKOP (ANTENA)



Effelsberg (100 m)

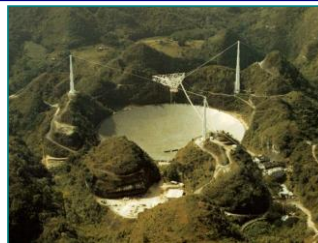
<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/div/effelsberg/>

Max-Planck-Institut für Radioastronomie

<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/EVN/index.html>

Green Bank Telescope (100-110 m)
National Radio Astronomy Observatory (NRAO)

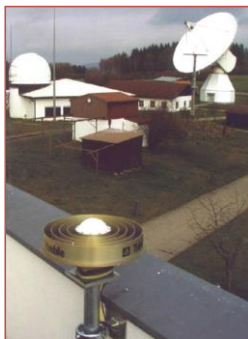
<http://www.gbt.nrao.edu/>



Arecibo Observatory (305 m), Puerto Rico

<http://www.naic.edu/>

RADIO TELESKOP (ANTENA)



VLBI + SLR/LLR + GPS

Bundesamt für Kartographie
und Geodäsie,

Fundamentalstation Wettzell

<http://www.wettzell.ifag.de/>



terestrička referentna točka i VLBI (Tsukuba)

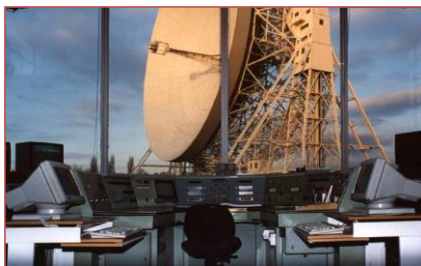
<http://vlb.gsi.go.jp/sokuchi/vlbi/en/facilities/tsukub32.html>

- precizno određeni položaj iz mnogobrojnih VLBI opažanja
- ujedno, kao osnovna točka za orijentaciju (azimut), upotrijebljena za definiciju sustava (geodetskog datuma) nacionalne geodetske referentne mreže

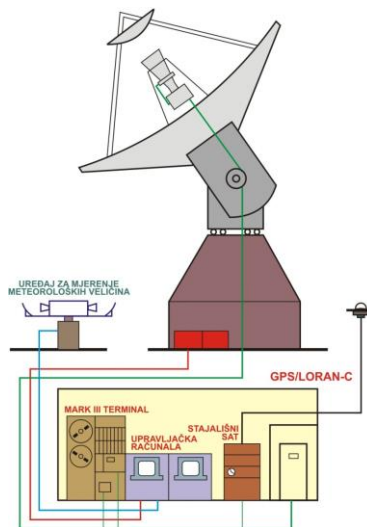




UPRAVLJAČKI URED - TERMINAL



University of Manchester, Jodrell Bank Observatory
<http://www.jb.man.ac.uk/>



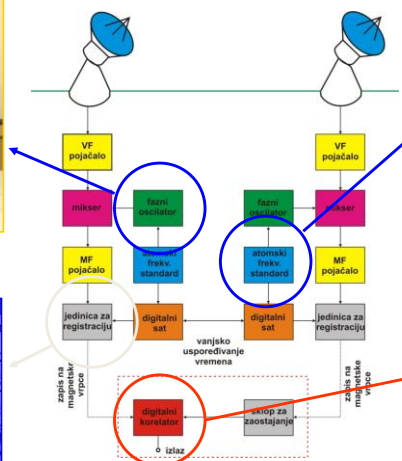
UPRAVLJAČKI URED:
 UPRAVLJANJE, PRIKUPLJANJE (MJERENJE), ZAPISIVANJE (I KORELIRANJE) PODATAKA



FREKVENCIJSKI STANDARD



JEDINICA ZA SNIMANJE



ATOMSKI SAT



KORELATOR



SUSTAV ZA PRIKUPLJANJE (MJERENJE), ZAPISIVANJE I KORELIRANJE PODATAKA (data acquisition, tape, correlator)

MARK I, MARK II (1972.-1978.), MARK III (1978.) – najstariji modeli koji istodobno obrađuju samo jednu bazu, a vrijeme obrade otprilike isto kao i vrijeme opažanja

MARK IIIA (1985.) – značajna unapređenja

- kod prvih su generacija VLBI sustava podaci mjerenja zapisivani na magnetske vrpce a korelirani sa standardnim računalima
- kod novih generacija VLBI sustava znatno veća količina podataka zapisuje se na diskove (HD) a koreliraju s namjenskim vrlo snažnim računalima (MARK V, 2003.)

MARK V VLBI Data System

- jači procesor
- može kontinuirano snimati 1024 MBps za 4,2 sata (3 VLBI trake ~ 2 TB)
- izravni (random) pristup podacima
- lako transportabilan, kompatibilan s postojećim VLBI sustavima
- podrška za e-VLBI, 24-satne ne nadgledane operacije

MARK VI (VII) - u razvoju i testiranju



e-VLBI (Real-Time VLBI)

VLBI mjerenja su internacionalnog i globalnog karaktera, preko 50 radioteleskopa na VLBI bazama svjetske mreže u više od 20 država uključeni su u globalna VLBI opažanja

- razvojem e-VLBI, povezivanje VLBI stajališta optičkim kabelima, u početku 100 Mb/s internet vezom (kasnije i većom) stvoreni su uvjeti za prikupljanje podataka mjerenja u realnom vremenu i nema više prenošenja mag. traka i HD

EXPReS - Express Production Real-time e-VLBI Service

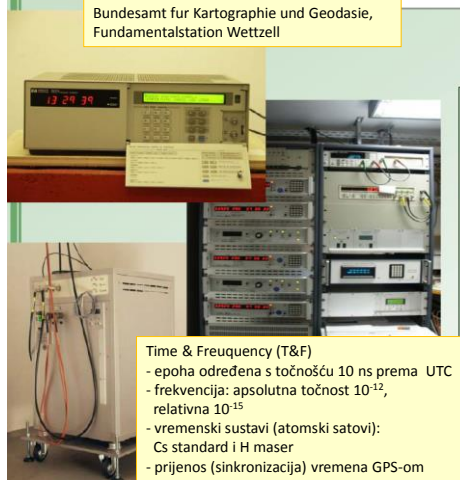
- ožujak 2006.
- kreiranje i distribucija podataka, izbor različitih instrumenata na kontinentalnoj i interkontinentalnoj razini
- vrlo brza komunik. mreža, rad u realnom vremenu, veza s nekim od najvećih i najosjetljivijih radio-teleskopa na Zemlji



<http://www.expres-eu.org/>

FREKVENCIJSKI I SATNI STANDARD

(visoko precizni fazni oscilator i atomski sat)



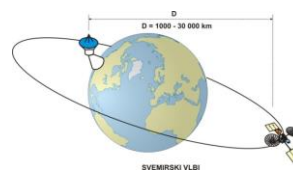
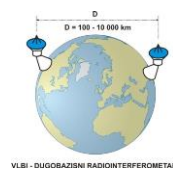
- na svakom radioantenskom stajalištu potreban je vrlo stabilan frekventijski izvor za generiranje lokalnog referentnog signala tj. signala koji određuje trenutke kad se očitava veličina analognog signala
- npr. za zapis i korelaciju podataka valne duljine 2 cm tijekom intervala od 10 minuta, potrebna stabilnost oscilatora je 10^{-14} – hidrogenski MASER
- stabilnost atomskog sata za mjerenja koja traju nekoliko sati (oko 10 000 sek) mora biti bolja od 0,1 ns, a za 24-satno mjerenje potrebna je stabilnost sata 10^{-14} sekundi

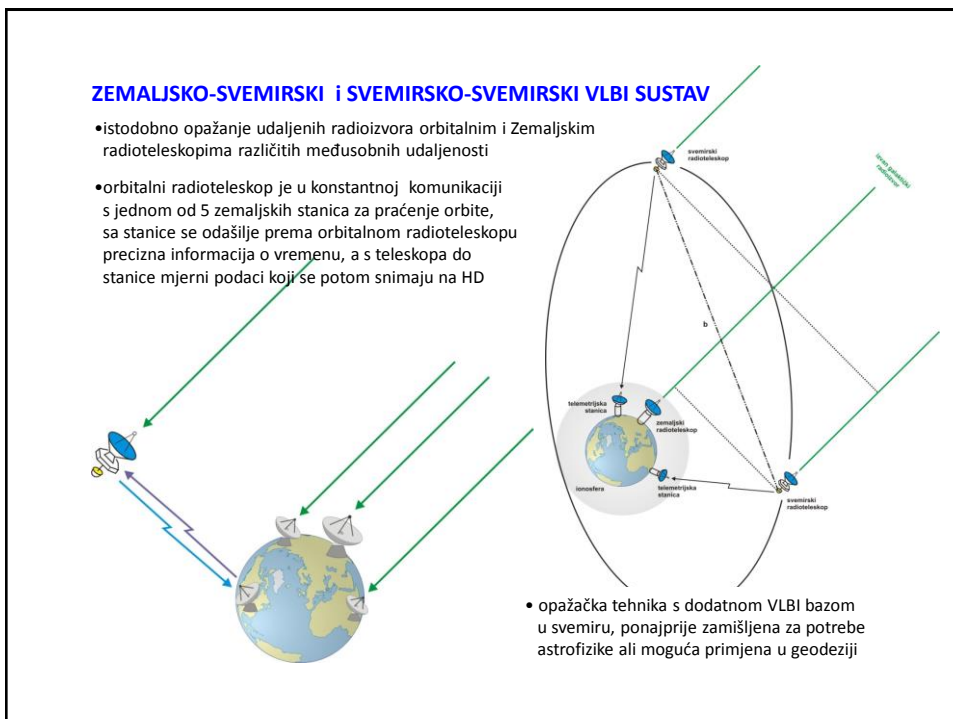
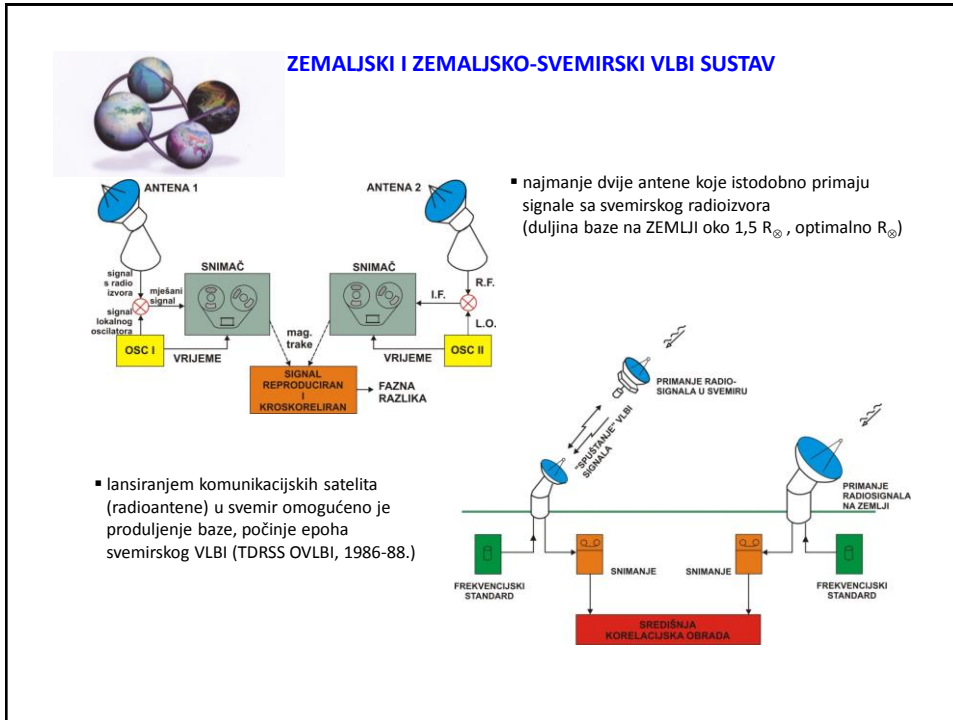
PRECIZNOST OD 1 mm U PROSTORU KORESPONDENTNO JE PRECIZNOSTI VREMENA OD SAMO 3 ps (3×10^{-12} sek.)

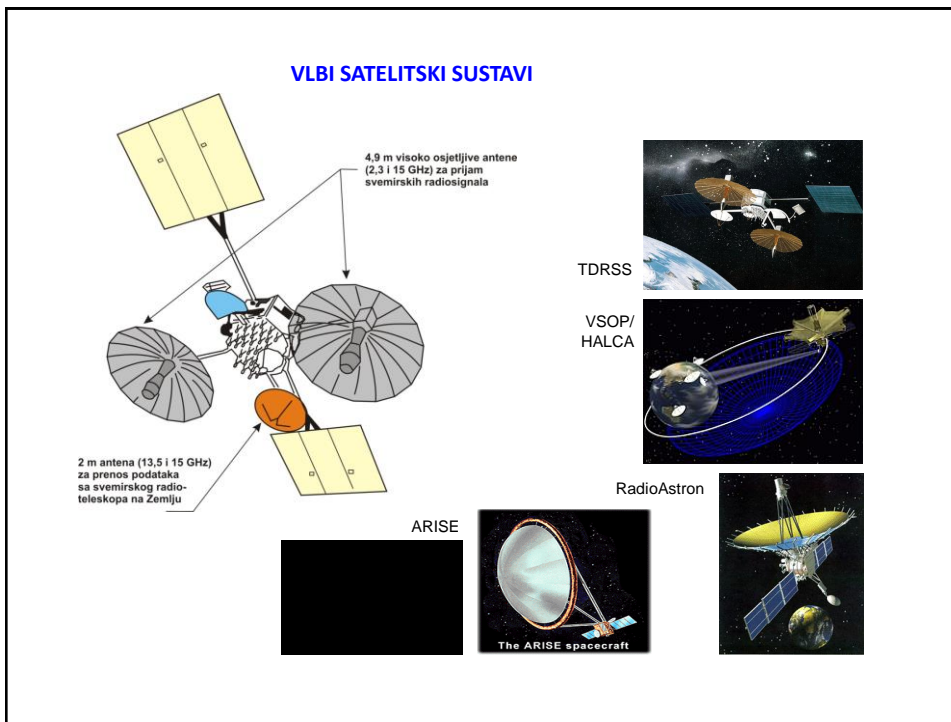


VLBI KONCEPTI

- **ZEMALJSKI VLBI SUSTAV**
(ground-based VLBI)
- **ZEMALJSKO-SVEMIRSKI VLBI SUSTAV**
(space-ground VLBI) → svemirski VLBI
- **SVEMIRSKO-SVEMIRSKI VLBI SUSTAV**
(space VLBI) - razvojni/eksperimentalni/istraživački!

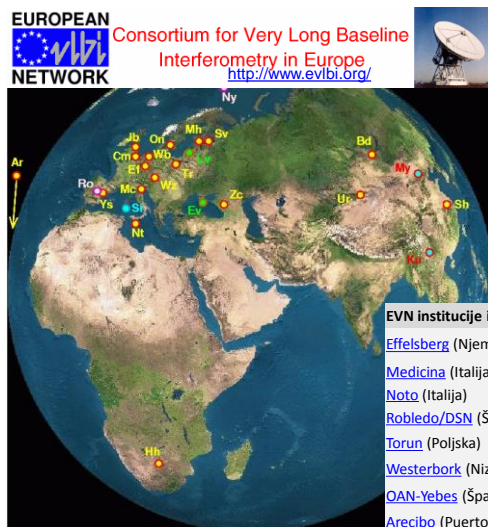






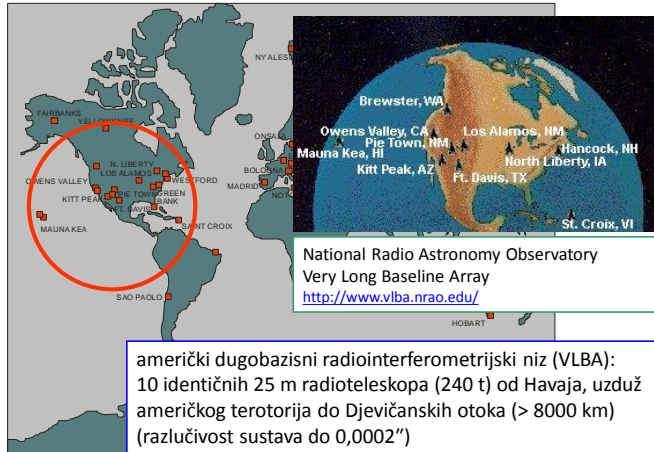
MREŽE I NIZOVI VLBI

EUROPEAN VLBI NETWORK (EVN)



MREŽE I NIZOVI VLBI

VERY LONG BASE ARRAY (VLBA)



ASIA PACIFIC TELESCOPE (APT)

EAST-ASIA VLBI NETWORK (EAVN)

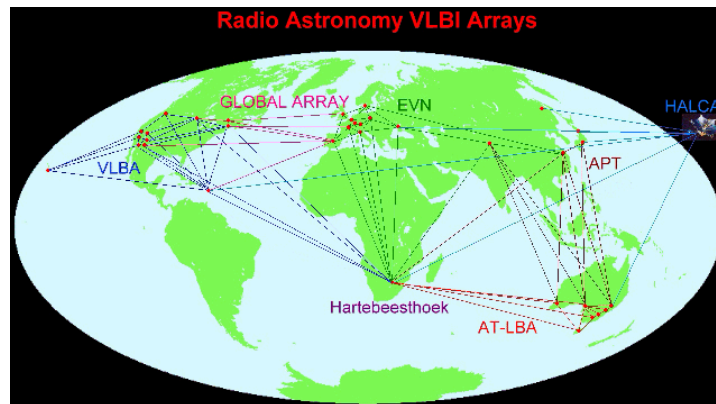
AUSTRALIA TELESCOPE LONG BASELINE ARRAY (AT-LBA)

MREŽE I NIZOVI VLBI

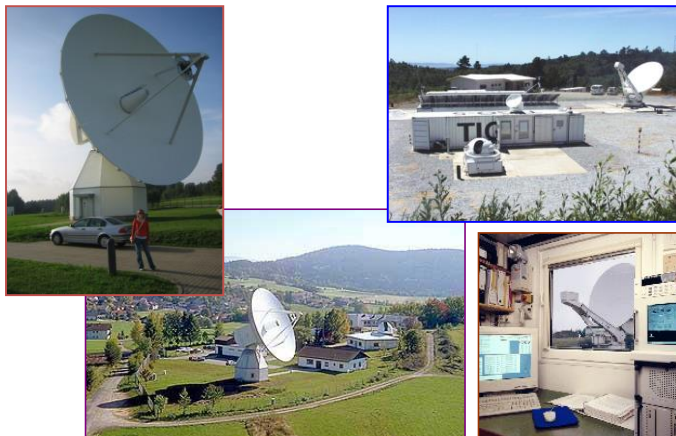
GLOBAL VLBI ARRAY

globalni VLBI nizovi (globalna, svjetska VLBI mreža) VLBA + EVN + APT + AT-LBA + ...

<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/div/vlbi/globalmm/>



STATIČNI I TRANSPORTABILNI VLBI TELESKOPI



TIGO - Transportable Integrated Geodetic Observatory

BKG - Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (nekadašnji IfAG), Wettzell, Njemačka
<http://www.wettzell.ifag.de/>

SATELLITE LASER RANGING (SLR) / LUNAR LASER RANGING (LLR)

LASERSKI MJERNI SUSTAV

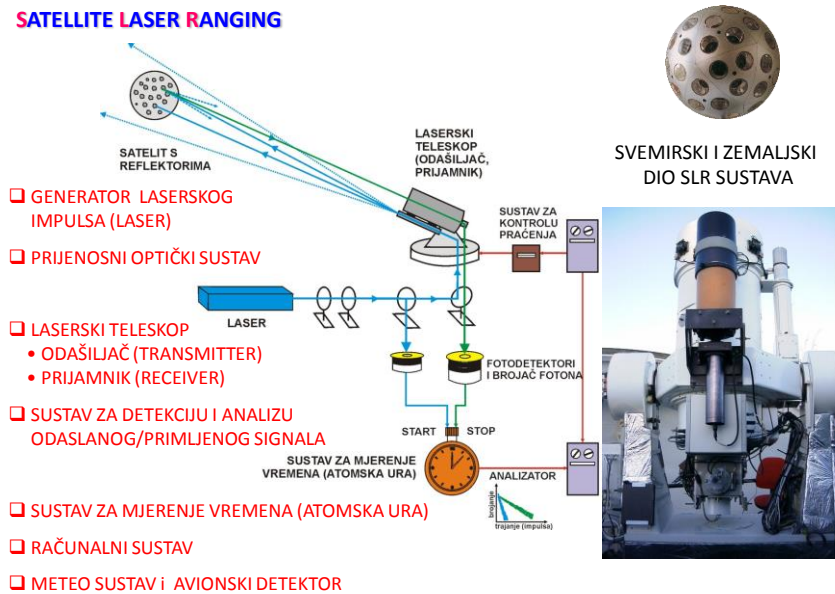
- ZEMALJSKI DIO
- SVEMIRSKI DIO



NAJPRECIZNIJE ODREĐIVANJE UDALJENOSTI IZMEĐU ZEMLJE I OPAŽANOG SATELITA ili ZEMLJE I MJESECA MJERENJEM VREMENA TRENUTAČNOG LETA POVRATNOG ULTRAKRATKOG LASERSKOG IMPULSA IZMEĐU ZEMALJSKOG STAJALIŠTA (LASERSKOG TELESKOPA) I RETROREFLEKTORA NA OPAŽANOM SATELITU/MJESECU

- iz laserskih mjerenja s nekoliko SLR/LLR stajališta prema odabranom satelitu/Mjesecu određuje se precizna orbita satelita/Mjeseca, a iz poznate orbite određuju se koordinate SLR/LLR stajališta
- 1961/62. početak istraživanja, SAD
- 1964/65. prvi uspješni povratni SLR signal do satelita (točnost mjerenja 3 m)
- 1969. NASA-in Apollo 11 postavlja prvi retroreflektor na Mjesec - početak LLR
- 1970. nekoliko LLR stajališta
- ...
- 1990. oko 50 laserskih sustava

SATELLITE LASER RANGING



OSNOVNA/PROŠIRENA JEDNADŽBA SLR

$$d = c (T_2 - T_1) / 2$$

$\Delta t = (T_2 - T_1)$ – vrijeme putovanja laserskog impulsa između START i STOP signala

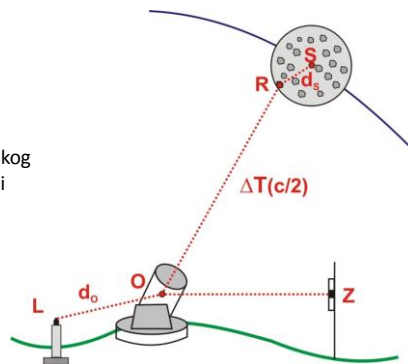
Δd_o – ekscentricitet teleskopa

Δd_s – ekscentricitet težišta satelita i optičkog centra

Δd_b – kašnjenje signala u elektroničkim sustavima

Δd_r – korekcija za refrakciju

ω – sistemske i slučajne pogreške



$$d = \frac{1}{2} c \Delta T + \Delta d_o + \Delta d_s + \Delta d_b + \Delta d_r + \omega$$

GENERATOR LASERSKOG IMPULSA – LASER (LASERSKI OSCILATOR)

• Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

(pojačanje svjetlosti stimuliranom /poticanom/ emisijom zračenja), počeci kasnih 1950.-tih

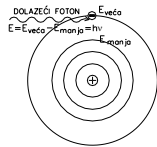
LASER je uređaj koji kontinuirano ili u kratkim intervalima emitira koherentnu monokromatsku svjetlost u vidljivom ili blizu infracrvenog dijela spektra

STIMULIRANA (POTICANA) EMISIJA SVJETLOSTI

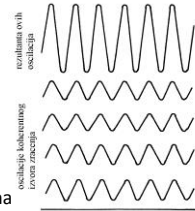
▪ do stimulirane (poticane) emisije dolazi ako na elektron u povišenom (metastabilnom) stanju E_{VECA} pada foton svjetlosti energije $E = E_{VECA} - E_{MANIA}$

▪ u tom slučaju taj foton stimulira (potiče) elektron u metastabilnom stanju da padne u osnovno stanje E_{MANIA} , a nakon toga dobiju se dva fotona (jedan dolazeći foton i jedan nastao od stimulirane emisije),

▪ ti fotoni imaju **JEDNAKU FREKVENCIJU, FAZU, POLARIZACIJU I SMJER**



▪ budući da ovi fotoni imaju jednaku frekvenciju, fazu i smjer dobiva se koherentna svjetlost većeg intenziteta



▪ za laserski snop jakog intenziteta mora u nekom sredstvu biti puno atoma s elektronima na metastabilnoj razini E_{VECA} tada se stimuliranim (poticanim) zračenjem postiže lavina fotona

▪ do sredine 1980.-ih upotrebljavani su RUBIDIJEVI impulsi laseri

- trajanje impulsa od 2-3 ns, samo jedan impuls u svakih nekoliko sekundi

▪ danas se upotrebljavaju NEODIMIJEVI YAG – laseri

- trajanje impulsa od 0,1 - 0,2 ns do nekoliko ps, 10 impulsa u sekundi, brojanje fotona

LASERSKI TELESKOP: ODAŠILJAČ (TRANSMITTER)

LASERSKI TELESKOP: PRIJAMNIK (RECEIVER)



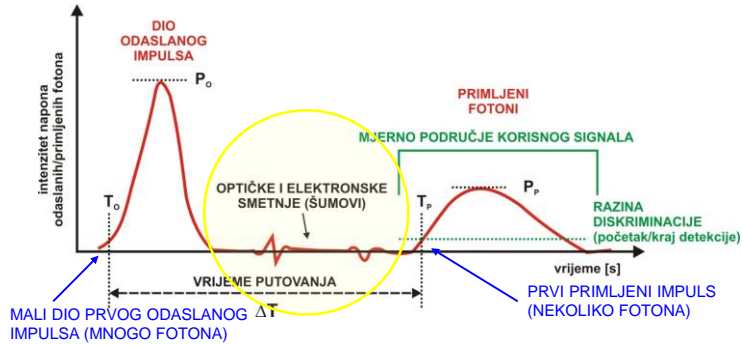
OPTIČKI I ELEKTRONSKI DIO

- refraktori/reflektori
- azimutalna montaža
- na postolje integrirani odašiljač i prijamnik
- kratki laserski impulsi su putem optičkog sustava (prizme ili optička vlakna) vođeni do odašiljača te odaslani prema satelitu
- dio izlazećeg impulsa upotrebljen za pokretanje (startanje) elektroničkog vremenskog brojača (sata)
- elektronska kontrola/usmjeravanje prema izračunanim efemeridama, pri prolazu satelita položaj se korigira s točnošću $\pm 1''$
- reflektirani impuls sa satelita primljen na stajališnom detektoru, pojačan te upotrebljen za zaustavljanje brojača
- potrebni vrlo moćni prijammnici



SUSTAV ZA DETEKCIJU I ANALIZU ODASLANOG/PRIMLJENOG SIGNALA

- fotomultiplikator s vrlo kratkim izlaznim vremenom i visokom rezolucijom
- u trenutku emitiranja laserskog snopa njegov mali dio direktno je prosljeđen preko optičkog vlakna fotomultiplikatoru koji taj dio laserskog impulsa pretvara u električni i pokreće/starta uređaj za mjerenje vremena putovanja impulsa do satelita ili Mjeseca i natrag
- primljena svjetlost (nekoliko fotona) usmjerena je na fotomultiplikator koji električnim impulsom zaustavlja uređaj za mjerenje vremena



- velika poteškoća u laserskim mjerenjima je što prijamnik kontinuirano prima svjetlost pozadine neba (fon neba)
- analizator impulsa uspoređuje/analizira primljeni impulsi signal s odaslanim odnosno razlučuje aktualni signal od smetnji (šuma) i uskopojasnim filtrima reducira smetnje na minimum (zdravo oko registrira u mraku cca 5 fotona u sekundi)

SUSTAV ZA MJERENJE VREMENA

- atomske ure određuju UTC vrijeme s točnošću $\pm 1\mu s$ (relativno gibanje satelita prema Zemlji)
- mjerenje vremena putovanja/leta signala satom s točnošću od 10^{-10} do 10^{-12} s (relativno mjerenje vremena)
- rezolucija elektroničkih brojača oko 10 ps, koji su kontrolirani atomskim satovima (obično rubidijevi, cezijevi ili vodikovi maseri), naime točnost mjerenja udaljenosti strogo je korelirana s duljinom i rezolucijom laserskog impulsa

RAČUNALNI SUSTAV

- izračun efemerida satelita (brzina, položaj i vrijeme)
- navođenje/viziranje i praćenje/kontrola instrumentalnog postolja
- kontrola kompletnog mjernog sustava
- kalibracija i kontrola parametara sustava
- analiza i kontrola podataka/mjerenja
- suvremeni sustavi zahtijevaju višezadaćnu (multitasking) obradu u realnom vremenu

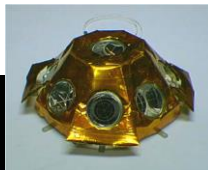
AVIONSKI DETEKTOR (OTKRIVAČ)

- optički sustav za otkrivanje aviona i trenutačni prekid mjerenja

od 1964. određivane staze ~60 satelita

STARLETTE
LAGEOS-1
AJISAI
ETALON-1, 2
ERS-1
TOPEX/POSEIDON
LAGEOS-2
GPS 35, 36 ...
STELLA
METEOR-3
GLONASS-40, 41
MIR
GFZ-1
ERS-2
GFO-1
WESTPAC-1
SUNSAT
CHAMP
JASON-1
ENVISAT
GRACE-A & GRACE-B
METEOR-3M
...
ožujak, 2003.

kvarcni reflektori na
satelitu Jason-1



LAGEOS
(LAsEr GEOdynamics Satellite)



422 silikon. reflekt.
(2R = 38 mm) i
4 germanijska za
Doppl. mjerenja

pasivni satelit mesingane jezgre
unutar 60 cm aluminijske ljuske
s 426 retro-reflektora

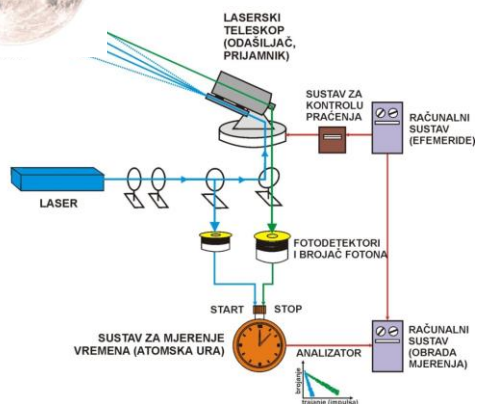
visina perigeja	5838 km
visina apogeja	5945 km
inklinacija orbite	109,8°
period (perigej)	~1 682 dana
period (čvor)	~1 050 dana
promjer	60 cm
masa	407 kg

LUNAR LASER RANGING

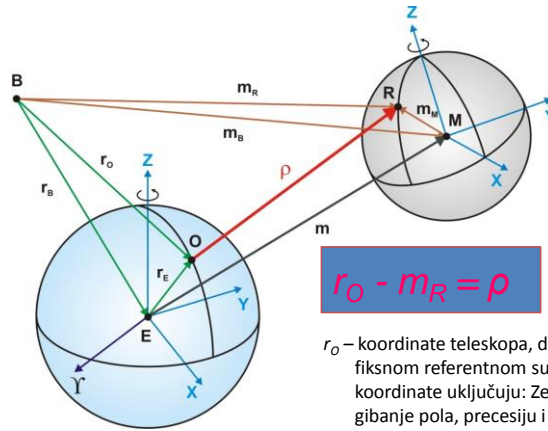
ZEMALJSKI I SVEMIRSKI
DIO LLR SUSTAVA



nekoliko stotina reflektora na
Mjesečevoj površini postavljenih
u Apollo i Luna misijama



OSNOVNA JEDNADŽBA LLR



r_o – koordinate teleskopa, definirane u Zemljinom fiksnom referentnom sustavu (baricentričke koordinate uključuju: Zemljinu rotaciju, gibanje pola, precesiju i nutaciju)

m_R – koordinate reflektora u baricentričkom koordinatnom sustavu, korigirane za Mjesečevo gibanje i libraciju

„DODATNI“ UVIJETI KOD LLR-a

- LLR sustavi tehnički zahtjevniji
- potrebni teleskopi većeg promjera zrcala
- laseri jačeg intenziteta zračenja
- vrlo precizni satovi
- nišan prema reflektorima na Mjesecu usmjeren s točnošću oko 1" (raspršenje na Mjesecu u krugu od 2 - 7 km, a povratnog impulsa na Zemlji od 15 do 25 km)
- Mjesec vrlo stabilan prirodni satelit s precizno modeliranom orbitom



SATELIT S REFLEKTORIMA

LASERSKI TELESKOP (ODASILJAČ, PRIJAMNIK)

BROJ KORISNIH FOTONA U LLR

YAG-neodimijev laser LLR sustava CERGA (od 1987.) upotrebljava impulse od 140 ps s međusobnim razmakom od 1,65 ps i sa 10 impulsa u sek

▪ tako npr. za YAG zeleni laser energije snopa po impulsu oko 300 mJ, $\lambda = 532 \text{ nm}$, $f = 5,64 \times 10^{14} \text{ Hz}$, što je ekvivalent od $5,4 \times 10^{17}$ **odaslatih fotona**, samo je **0,18 primljenih fotona** ili 1 foton za svakih 5 "laserskih hitaca"- impulsa (praktična mjerenja pokazuju da je taj broj jako precijenjen! i da se praktično od 100 impulsa ili svakih 10 sekundi vrati 1 foton)

▪ vrijeme povratka laserskog signala varira između 2,4 i 2,7 s i dok se vrati prvi signal već je poslano oko 25 impulsa

LASER

SUSTAV ZA MJERENJE VREMENA (ATOMSKA URA)

FOTODETEKTORI I BROJAČ FOTONA

START STOP

brojanje
trajanje (impulsa)

41

SVEMIRSKI DIO (Mjesec)

nekoliko stotina reflektora (corner cube) na Mjesečevoj površini

- srpanj 1969., Apollo 11 (Sea of Tranquility), 100 pojedinačnih reflektora
- veljača 1971., Apollo 14 (Fra Mauro), 100 pojedinačnih reflektora
- srpanj 1971., Apollo 15 (Hadley Rille), 300 pojedinačnih reflektora

L17

Apollo 15 (78%)

L21

Luna 21 (3%)

R14

R15

R11

Apollo 14 (9%)

Apollo 11 (10%)

1000 km

Luna 17

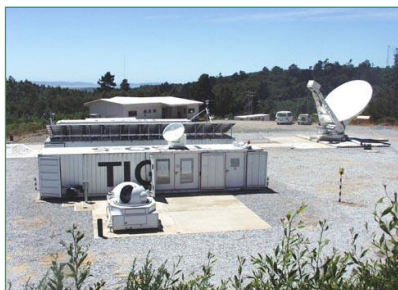
iz Apollo misija: reflektori (corner cube) promjera 3,8 cm montirani su na aluminijske ploče

- studeni 1970., Luna 17 (Sea of Rains),
- 1973., Luna 21 (Sea of Serenity), stotinjak pojedinačnih reflektora

42

TIGO - Transportable Integrated Geodetic Observatory

BKG - Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (nekadašnji IfAG), Wettzell, Njemačka
<http://www.wettzell.ifag.de/>



SLR kontrolna soba



50 cm
SLR teleskop

laserski
impulsni generator



TLRS – Transportable Laser Ranging System i MOBLAS – MOBILE LASER
NASA, Goddard Geophysical and Astronomical Observatory (GGAO)

<http://cddis.gsfc.nasa.gov/ggao/>



SLUM - Station Laser Ultra Mobile
 (ili FTLS - French
 Transportable Laser
 Ranging System)

[http://www.oca.eu/gemini/equipements/
telo/slum/index.html](http://www.oca.eu/gemini/equipements/slum/index.html)



PLRS – Portable Laser Ranging System (~500 kg)

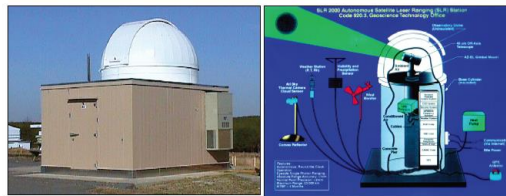
SLR2000 – nova generacija SLR-a

(Goddard Geophysical and Astronomical Observatory /GGAO/, NASA)

http://cddis.nasa.gov/slr2000/slr2000_about.html

- sustav dizajniran sredinom 1990.-ih, istraživanja počinju krajem 1990.-ih
- u cijelosti automatizirani mjerni sustavi bez motritelja s dvosmjernom internetskom komunikacijom sa središnjim uredom
- 24-satni operativan mjerni sustav uz potpuno praćenje i satelita nagnutih orbita i visina do 20 000 km (GPS, GLONASS, Etalon, ...)
- subcentimetarska točnost mjerenja
- snažan niskoenergetski mikrolaser s vrlo preciznim intervalima ponavljanja
- brojač fotona na principima kvantne tehnologije
- kreiran visoko precizni omjer signal/šum
- praćenje satelita u širokom rasponu visina
- ...

SLR2000



45

APOLLO – nova generacija LLR

Apache Point Observatory Lunar Laser-ranging Operation <http://www.apo.nmsu.edu/>
<http://www.physics.ucsd.edu/~tmurphy/apollo/apollo.html>



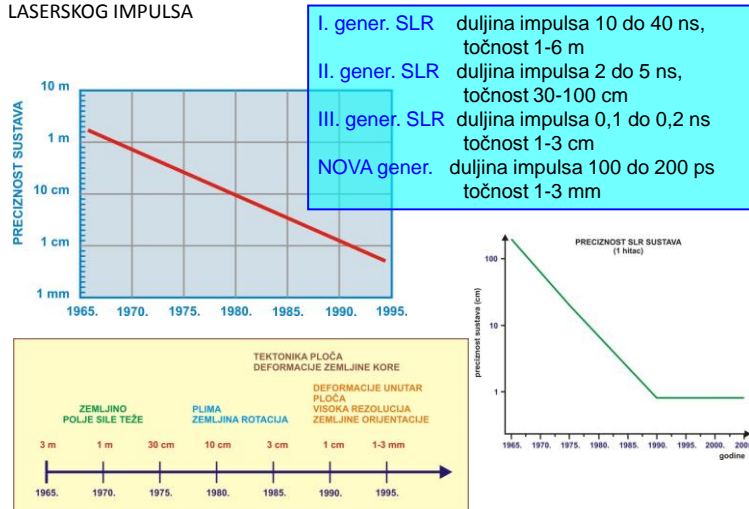
- 2004. NASA i NSF razvijaju sustav APOLLO
- laserski teleskop promjera zrcala 3,5 m
- ugrađena najsvremenija tehnologija (detektor, uređaji za mjerenje vremena i laser)



- APOLLO sustav smješten na Apache Point opservatoriju (N. Meksiko), na pl. vrhu (oko 2790 m)
- za teleskope velikog otvora (velikog promjera zrcala) potrebni izvrsni atmosferski uvjeti (vidljivost) jer "smetnje" od Zemljine atmosfere uzrokuju iskrivljenje putanje laserske zrake,
 - mala tektonska gibanja tla ispod laserskog sustava, uobičajeno nekoliko cm/god.
 - instaliranje supersosjetljivog gravimetra, preciznih GPS uređaja uz opservatorij (određivanje sporog pomicanja tla) i mreže preciznih barometara (praćenja stanja atmosfere)

RAZVOJNA TOČNOST SLR

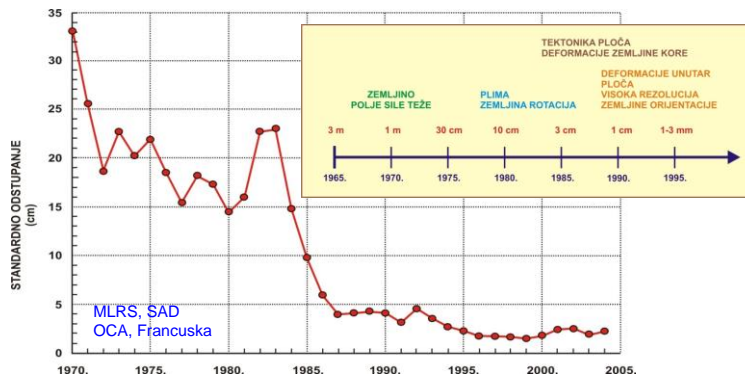
TOČNOST JE STROGO KORELIRANA S DULJINOM I REZOLUCIJOM LASERSKOG IMPULSA



RAZVOJNA TOČNOST LLR

TOČNOST JE STROGO KORELIRANA S DULJINOM I REZOLUCIJOM LASERSKOG IMPULSA

- početkom 1970.-ih točnost mjerenja nekoliko metara (LLR → 1 ns oko 25 cm, SLR → 1 ns ≥ 15 cm)
- početkom 1980.-ih točnost mjerenja ispod 15 cm
- točnost suvremenih mjerenja bolja od 3 cm, do nekoliko mm



http://www.npl.washington.edu/eotwash/publications/pdf/battat_APOLLO.pdf

(DORIS) Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite



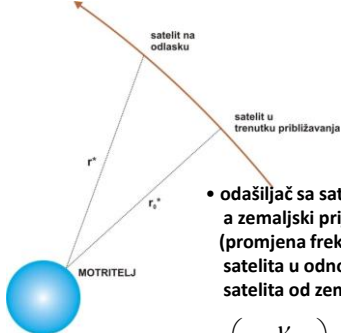
DOPLEROVSKI SUSTAV ZA PRAĆENJE SATELITA SA SVRHOM PRECIZNIH ODREĐIVANJA SATELITSKIH ORBITA I POLOŽAJA SIGNALNIH STANICA I PRECIZNOG POZICIONIRANJA NA ZEMLJI



- DORIS sustav osmisliła je i razvila francuska svemirska agencija (Centre National d'Etudes Spatiales, CNES), u suradnji s istraživačkom grupom za svemirsku geodeziju (GRGS) i nacionalnim geografskim institutom (IGN)
- sustav se upotrebljava od 1990. god.

DOPLEROV EFEKT (POMAK)

promjena frekvencije bilo kojeg valnog signala zbog relativnog gibanja odašiljača prema prijammiku, opaža se kao povećanje / smanjenje frekvencije kada se izvor valova i promatrač međusobno približavaju odnosno udaljavaju (kod zvučnih valova čujemo više ili niže tonove npr. zvižduk lokomotive čini se višim za vrijeme približavanja a nižim pri udaljavanju)



- odašiljač sa satelita emitira nemedulirane el. valove poznate frekvencije a zemaljski prijammnik prima el. valove promijenjene frekvencije (promjena frekv. ovisi o topocentričnoj radijalnoj komponenti brzine satelita u odnosu na motriteljsku stanicu, odnosno o promjeni udaljenosti satelita od zemaljskog prijammnika)

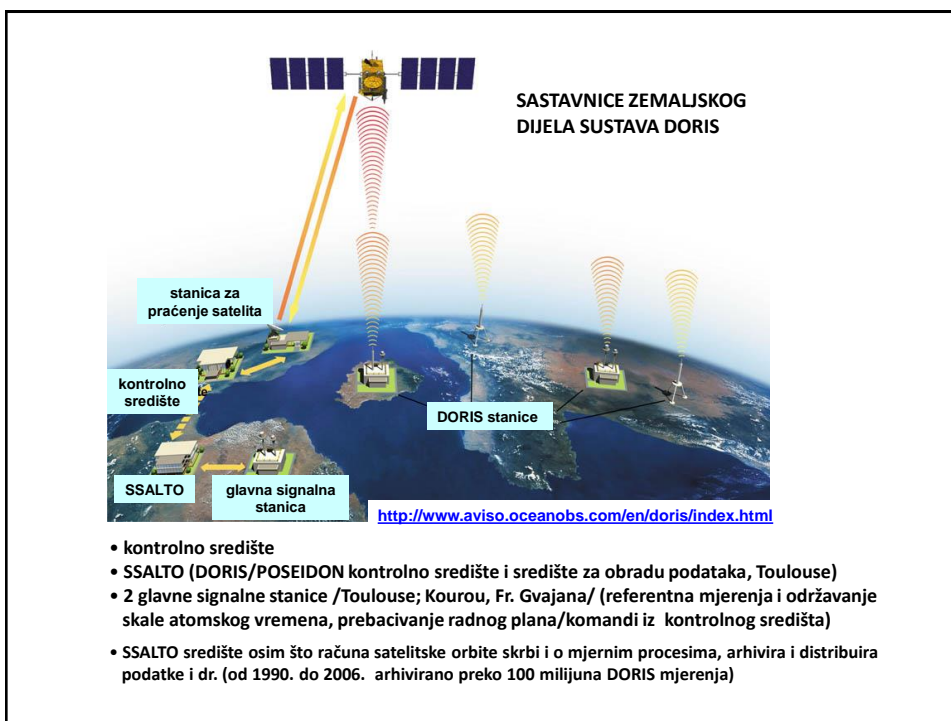
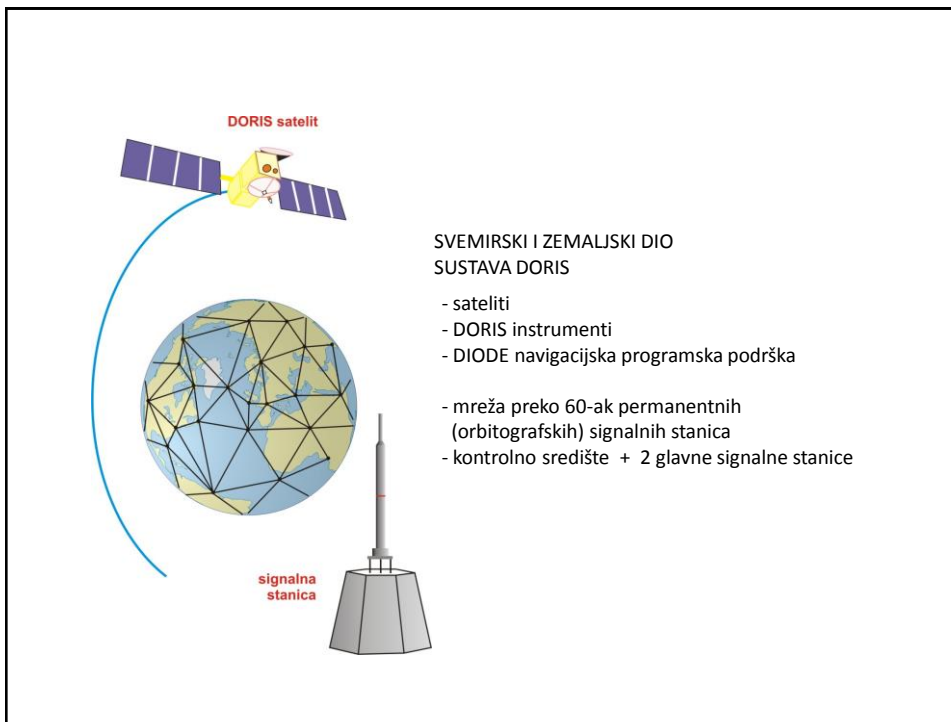
$$f_{pr} = f_{odas} \left(1 \mp \frac{v_{rad}}{c} \right)$$

$$v_{rad} = c \frac{f_{odas} - f_{pr}}{f_{odas}}$$

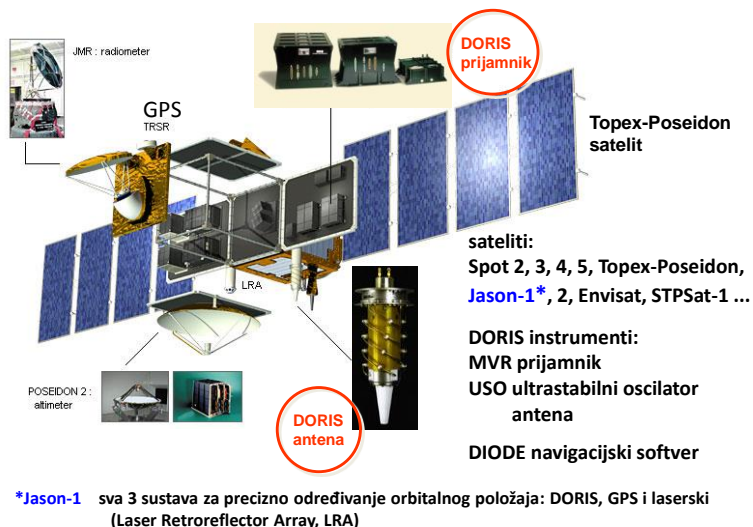
f_{pr} - frekvencija primljenih valova
 f_{odas} - frekvencija odaslanih valova
 c - brzina svjetlosti
 v_{rad} - radijalna sastavnica brzine kretanja između prijammnika i odašiljača ("+" međusobno približavanje, "-" međusobno udaljavanje)

$f_{pr} > f_{odas}$ smanjuje se udaljenost između satelita i motriteljske stanice
 $f_{pr} < f_{odas}$ povećava se udaljenost između satelita i motriteljske stanice





SASTAVNICE SVEMIRSKOG DIJELA SUSTAVA DORIS



- DORIS prijamnik određuje Dopplerov pomak dvofrekvencijskog signala

- od 1998. razvoj 3D navigatora DIODA (Détermination Immédiate d'Orbite par Doris Embarq) poboljšane programske komponente obrade mjerenja u realnom vremenu te je tako omogućena satelitska navigacija sustavom DORIS (DIODE izračunava položaj satelita na kojem se nalazi, slično kao kapetan koji određuje položaj broda na moru)

- od 2002. DIODE navigator funkcionalan, u realnom vremenu, svakih 10 sekundi, računa precizne 3D položaje, brzinu i dr. (u jednom bloku podaci: datum/položaj/brzina/kvaliteta), odnosno satelit
 - potvrđuje primitak komandi
 - predičira položaje satelita na temelju njegovog modela orbitalnog gibanja
 - korigira predičirani položaj iz mjerenja kada je satelit vidljiv sa signalnih stanica
 - prosljeđuje/prenosi podatke mjerenja i izračunane pozicije satelita zemaljskim stanicama pri svakom prolazu iznad stanice



1990.-ih 20 kg,
2001. 5 kg

- primljeni podaci se u pravilnim intervalima prosljeđuju/šalju u SSALTO (kontrolno središte i središte za obradu podataka)

- određivanje vrlo precizne orbite nije trenutačno (već postprocesiranje)
- vrlo precizne satelitske orbite (trajektorije) određene su analizom položajnih podataka signalnih stanica permanentne orbitografske mreže i matematičkog modela uključujući pritom i sile koje djeluju na satelite (ponajprije Zemljino polje sile teže, atmosfersko trenje)
- nakon što je orbita poznata s visokom točnošću moguće je odrediti točne položaje (koordinate) permanentnih signalnih stanica, također, ako je položaj satelita precizno određen moguće je odrediti precizne položaje (koordinate) signalnih stanica izvan referentne mreže na stajalištima koja zahtijevaju vremensko praćenje (npr. praćenje vulkana, geoloških pomicanja, ledenjaka i drugo)

SASTAVNICE ZEMALJSKOG DIJELA SUSTAVA DORIS



Toulouse,
Francuska

- globalna mreža 60-ak permanentnih autonomnih signalnih stanica (orbitografy stations)
 - kontinuirano emitiranje signala sa referentnih stanica namijenjeno je za neprekidno i precizno praćenje/pokriavanje satelitskih trajektorija
- korisničke signalne stanice (ground beacons) namijenjene korisnicima za pozicioniranje DORIS sustavom
 - imaju iste funkcije kao i permanentne stanice DORIS mreže uz razliku da signalne stanice emitiraju signale samo u trenutku kada je neki DORIS satelit vidljiv sa tog stajališta

(signalne stanice DORIS sustava su aktivne za razliku od VLBI i GPS-a koji imaju pasivne zemaljske stanice)

- signalne stanice odašilju/emitiraju dvofrekvencijske signale:
 - S-pojas frekvencije 2036,25 MHz upotrebljava se za doplerovska mjerenja
 - VHS pojas frekvencije 401,25 MHz za prijenos ID broja, informacija o točnom vremenu (danas: sekundni impulsi točnosti bolje od 15 ms), podataka s meteoroloških senzora (potrebni za redukciju pogrešaka uzrokovanih ionosferskim propagacijskim kašnjenjem) i dr.



argentinska baza
Belgrano na Antarktiku

ZNAČAJKE SUSTAVA DORIS

- preko 60 permanentnih signalnih stanica u preko 30 zemalja (globalna prekrivenost, jedini sustav koji dobro pokriva južnu hemisferu)
- signalne stanice u zajednici s drugim mjernim sustavima: GNSS, SLR (LLR) i VLBI
- mjerenja u svim vremenskim uvjetima, u potpunosti autonomni (više mjeseci) i automatizirani sustavi
- korisničke signalne stanice mogu biti postavljene u 30-ak minuta, bez specijalnog treninga
- sustav operativan i na satelitima niskih orbita (200 km do 3000 km) bez obzira na inklinaciju kao i na višim altitudama do geostacionarnih orbita
- SVE više satelita nosi DORIS instrumente (još točnija mjerenja)



TOČNOST DORIS SUSTAVA

- određivanje/izračun vrlo precizne orbite nije trenutačno (za određivanje precizne orbite satelita podaci DORIS-mjerenja obrađuju se na Zemlji)
- točnost izračuna satelitskih orbita raste s vremenom odnosno količinom prikupljenih mjerenja (suvremena mjerenja):

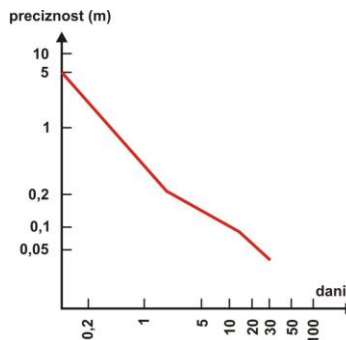
za 3 sata → rms = 10 cm,

za 3 dana → rms = 4 cm,

za 30 dana → rms = 2,5 cm,

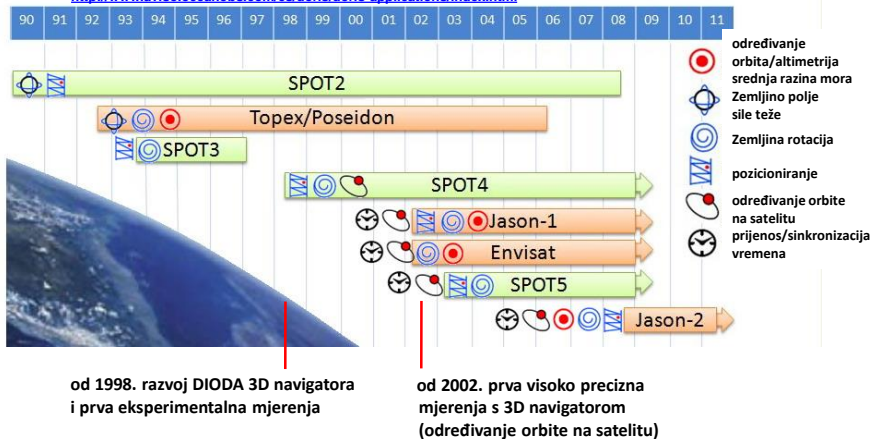
s ciljem povećanja točnosti do 1 cm

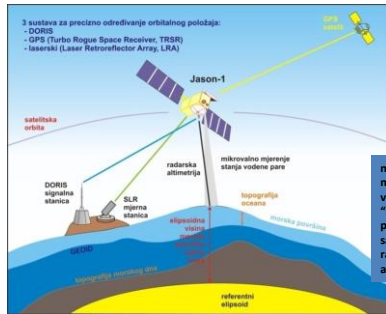
*(početkom satelitskog doba
pozicije satelita procjenjivane
s točnošću do 20 km a u
80-im godinama do oko 20 m)*



PRIMJENE SUSTAVA DORIS

<http://www.aviso.oceanobs.com/es/doris/doris-applications/index.html>





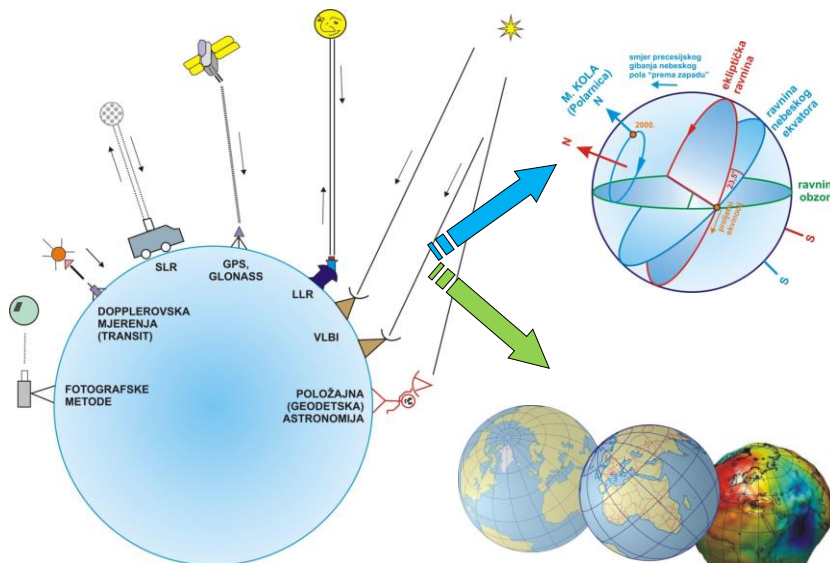
- određivanje preciznih satelitskih orbita: Topex/Poseidon, Jason-1, 2, Spot, Envisat
→ altimetrija: srednja razina mora (današnja točnost DORIS sustava savršeno odgovara potrebama topografije oceana/mora kao i praćenja varijacija u promatranim pojavama)

PRIMJENE DORIS-a U GEODEZIJI

- određivanje apsolutnih 3D koordinata u ITRS
- referentne visine za određivanje razine mora i njezine varijacije
- Zemljino polje sile teže, gibanje geocentra
- određivanje zemaljskih kontrolnih točaka za statičko pozicioniranje drugim sustavom
- povezivanje u mrežu osamljenih točaka
- određivanje kontrolnih točaka lokalnih geodetskih mreža (mreža posebnih namjena)
- georeferenciranje nekog područja i satelitskih snimaka
- ...
- 3D satelit. navigacija u realnom vremenu, informacije o vremenu/položaju/brzini/kvaliteti



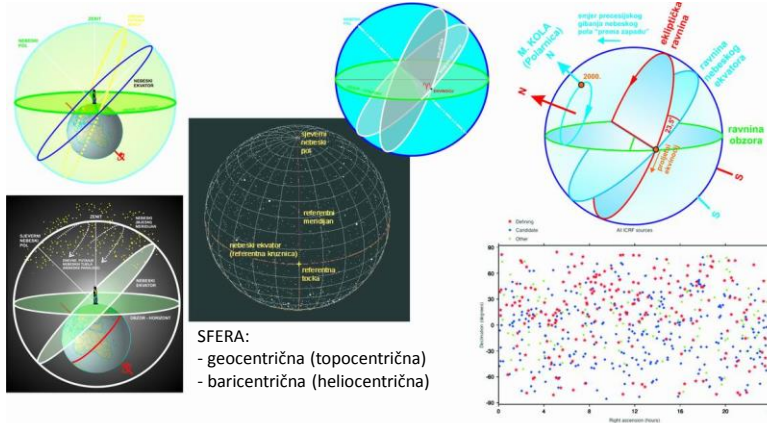
PRIMJENA MJERNIH SUSTAVA U SVEMIRSKOJ GEODEZIJI I ASTROMetriJI



TEHNIKA/ SUSTAV	JEDINSTVENI PRODUKTI	OPĆI PRODUKTI	GEOZNAJSTVENA PRIMJENA	POTPORA
VLBI	nebeski referentni okvir CRF (položaji radioizvora), Zemljina rotacija (UT1 – UTC), precesija i nutacija	gibanje pola, terestrički referentni okvir (TRF)	tektonika ploča, deformacije Zemljine kore, praćenje razine mora	GPS, SLR, DORIS, PRARE, svi sateliti za daljinska istraživanja, svi komunikacijski sateliti u CRF, EOP, modeli precesije i nutacije
SLR	model statičkog geopotencijala, dinamički geopotencijal, središte masa (geocentrički položaj), određivanje orbita (za sve satelite s reflektorima)	gibanje pola, terestrički referentni okvir (TRF), UT1-UTC	tektonika ploča, deformacije Zemljine kore, praćenje razine mora, Zemljin model	GPS, SLR, DORIS, PRARE, svi sateliti za daljinska istraživanja, svi komunikacijski sateliti u TRF, EOP, određivanje orbita za potporu altimetrijskim satelitima
LLR	udaljenost i orijentacija			
GNSS	određivanje orbita GPS satelita, određivanje orbita satelita na kojima je ugrađen GPS prijamnik, prugušavanje TRF	gibanje pola, terestrički referentni okvir (TRF), UT1-UTC	tektonika ploča, deformacije Zemljine kore, praćenje razine mora, GPS meteorologija	kolokacija VLBI i SLR stajališta, određivanje orbita za potporu altimetrijskim satelitima, TRF za potporu svim satelitima za daljinsko istraživanje, svi komunikacijski sateliti
DORIS	određivanje orbita	terestrički referentni okvir (TRF)		potpora orbiti satelita za altimetriju, praćenje razine mora, gibanje/cirkulacija oceana

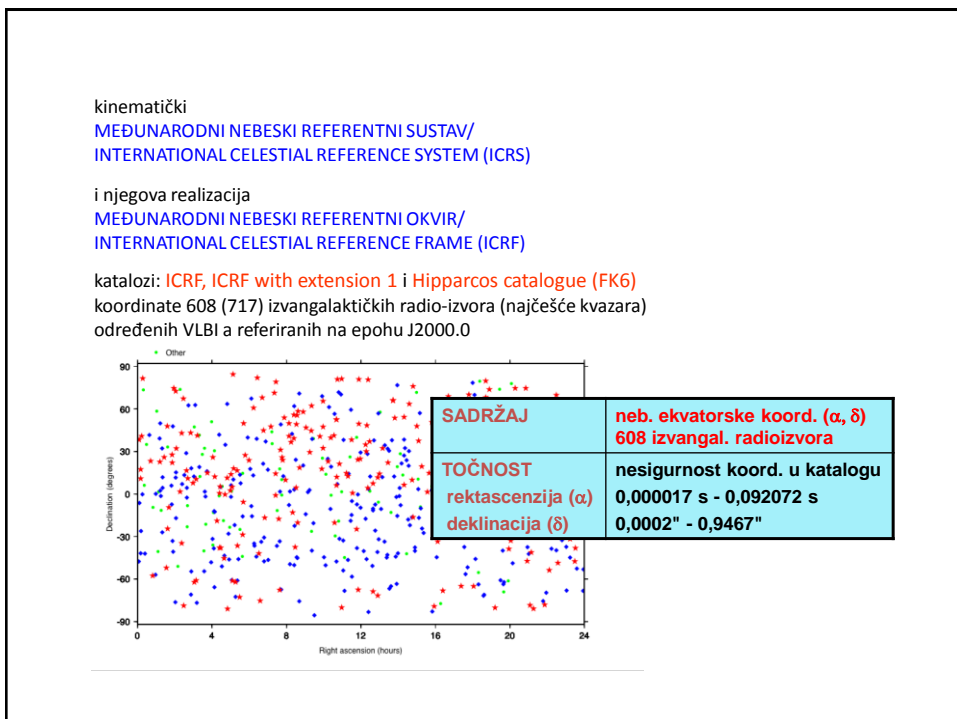
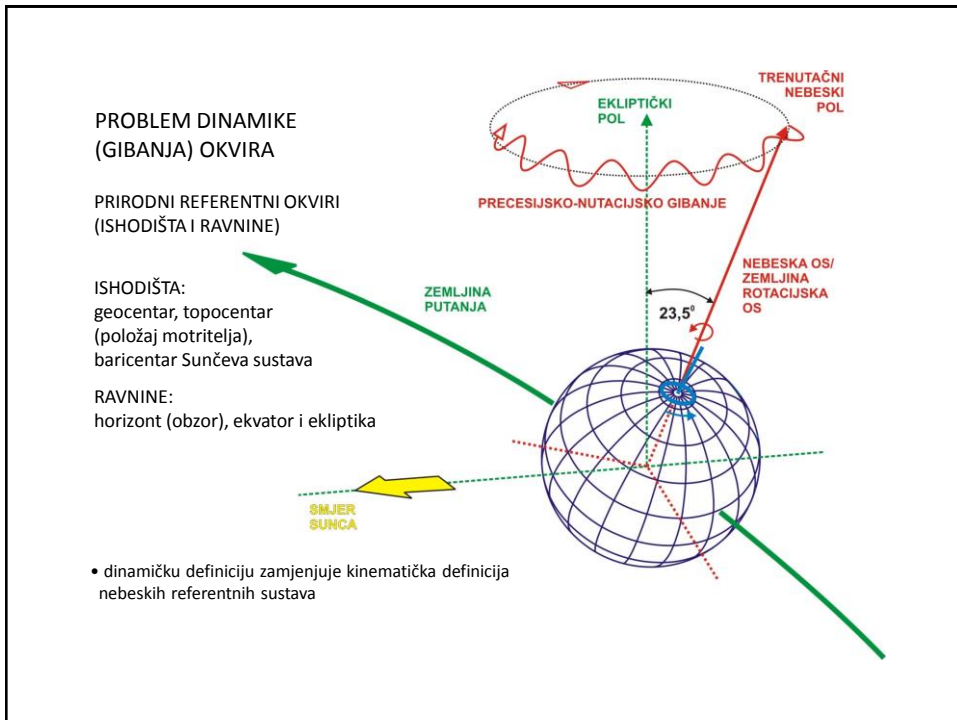
NEBESKI REFERENTNI KOORDINATNI SUSTAV/OKVIR

REFERENTNI KOO. SUSTAV:
definirajuće točke i ravnine, epoha, JD



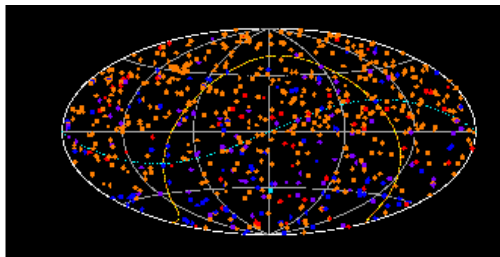
SFERA:
- geocentrična (topocentrična)
- baricentrična (heliocentrična)

REFERENTNI OKVIR
dinamički (fundamentalne zvijezde)
kinematički (definirajući kvazari)

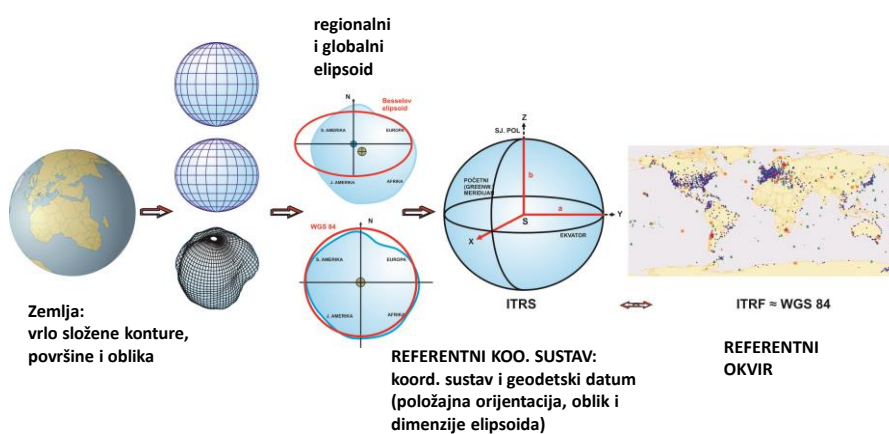


VISOKA TOČNOST POLOŽAJA I STABILNOST NEBESKOG REFERENTNOG OKVIRA (ICRF)

- posljednjih 200 godina tradicionalni optički referentni sustav realiziran referentnim okvirom na položajima zvijezda prosječne točnosti 0,01-0,03"/0,001s zamijenjen je radio sustavom i njegovom realizacijom na položajima quasara pridruživanjem para koordinata (α , δ) s točnošću oko 0,0001" do 0,00002"
- izvangalaktički VLBI referentni okvir je najprecizniji stabilni ikad realiziran nebeski referentni koordinatni sustav
- na temelju nekoliko teorijskih pretpostavki i raznovrsnih opažanja predviđena je moguća brzina rotacije izvangalaktičkog referentnog okvira
– manje od 3×10^{-9} "/god.



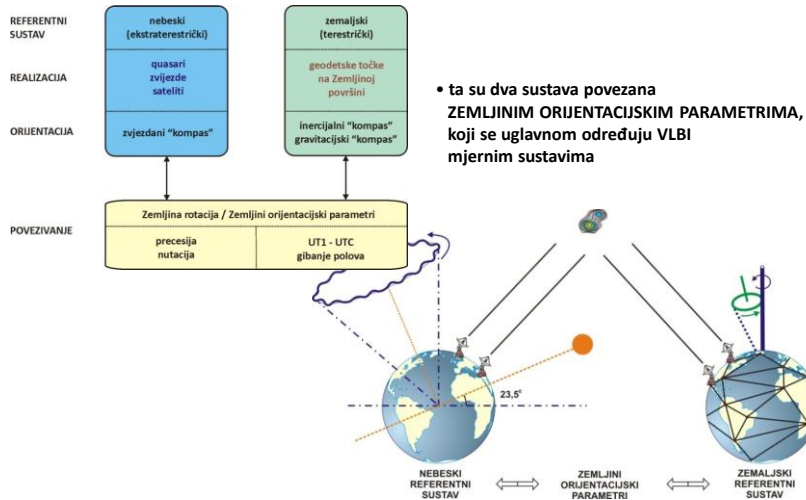
ZEMALJSKI (TERESTRIČKI) REFERENTNI KOORDINATNI SUSTAV



POVEZIVANJE NEBESKOG I ZEMALJSKOG SUSTAVA/OKVIRA

DVA RAZLIČITA REFERENTNA SUSTAVA/OKVIRA:

- prostorni fiksni nerotirajući referentni sustav odnosno nebeski okvir (ICRS/ICRF)
- terestrički fiksni rotirajući referentni sustav odnosno zemaljski okvir (ITRS/ITRF)

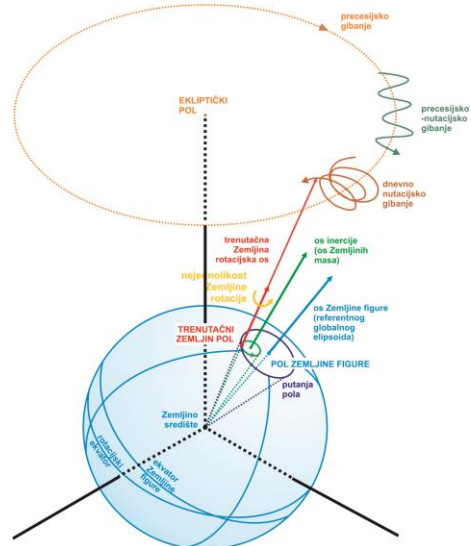


ODREĐIVANJE/PRAĆENJE ZEMLJINE ORIJENTACIJE U SVEMIRU

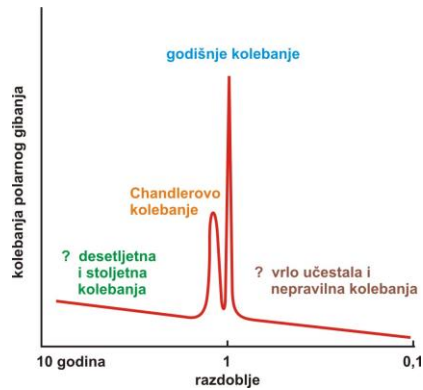
definiranje nebeskih i zemaljskih koordinatnih sustava i transformacija između sustava, uključuje i određivanje Zemljinih orijentacijskih parametara

ZEMLJINI ORIJENTACIJSKI PAREMETRI (Earth Orientation Parameters, EOP nekad: Zemljini rotacijski parametari, Earth Rotation Parameters, ERP)

- GIBANJE POLOVA (Polar Motion, PM)
- NEJEDNOLIKOST ZEMLJINE ROTACIJE, DULJINI DANA (Length of Day, LoD)
- PRECESIJA-NUTACIJA
Precesijski koeficijent i nutacijske komponente (precession coefficient, components of nutation)



GIBANJE ZEMLJINIH POLOVA



CHANDLEROVO KOLEBANJE

- nepoklapanje trenutne Zemljine rotacijske osi s osi inercije (osi Zemljinih masa)
- premještanje masa u Zemljinoj unutrašnjosti

GODIŠNJE (SEZONSKO) KOLEBANJE

- atmosferska komponenta
- hidrosferska komponenta

VRLO UČESTALA I NEPRAVILNA KOLEBANJA (na granici mjerljivosti)

- meteorologija, zemljotres

DUGOPERIODIJSKA, DESETLJETNA I STOLJETNA KOLEBANJA

- premještanje i razina oceana, tektonika ploča

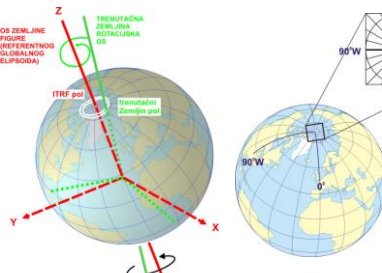
- Chandlerovo kolebanje (≈ 430 dana) amplituda 6 m ($0,2''$)
- godišnje kolebanje amplitude 3m ($0,1''$)

ASTRONOMSKA ŠIRINA ($<0,6''$)

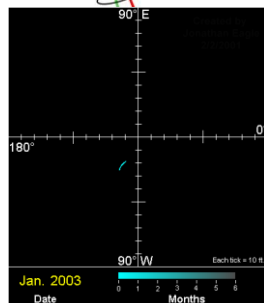
ASTRONOMSKA DULJINA (do $0,02s$)

ASTRONOMSKI AZIMUT (do $0,3''$)

GIBANJE ZEMLJINIH POLOVA



- koordinate pola definirane su kao razlika između trenutne orijentacije Zemljine rotacijske osi (trenutačni pol) i prihvaćene/definirane srednje rotacijske osi (srednji pol, Conventional Terrestrial Pole)
- X - u smjeru IERS referentnog meridijana (Greenw. meridijan)
- Y - u smjeru meridijana $90^\circ W$



- $X_{p'}$, $Y_{p'}$ definiraju orijentaciju trenutne rotacijske osi prema zemaljskom (terestričkom) referentnom okviru, odnosno fiksiraju trenutnu rotacijsku os u odnosu na terestrički referentni okvir (TRF)

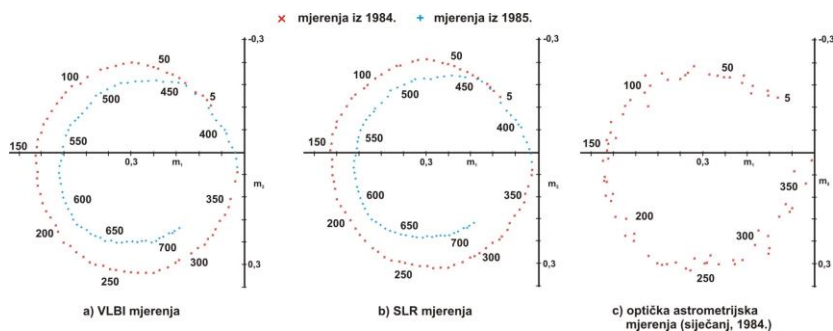
CIO POL (CONVENTIONAL INTERNATIONAL ORIGIN)

BTS POL (Bureau International de l'Heure /BIH/ TERRESTRIAL SYSTEM)

ITRF POL (INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAME)

GIBANJE ZEMLJINIH POLOVA

- od 1972. koordinate pola neredovito određivane VLBI
- od kraja 1980. redovni program opažanja
- od siječnja 1984. predikcija u petodnevnim intervalima

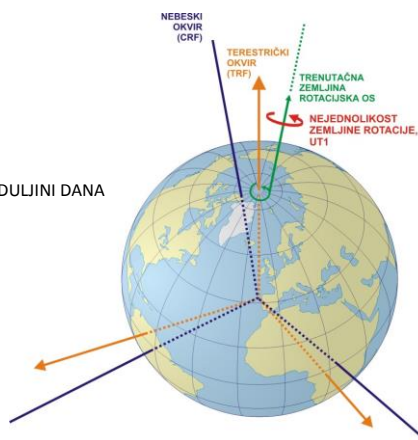


- PRECIZNOST ODREĐIVANJA x_p, y_p : 0,001" - 0,002"
(red veličine točnije od klasičnih optičkih određivanja, danas i bolje)

NEJEDNOLIKOST ZEMLJINE ROTACIJE

NEJEDNOLIKOST ZEMLJINE ROTACIJE,
VARIJACIJE U ZEMLJINOJ ROTACIJI (UT1) – DULJINI DANA

- određivanjem GAST koji je odgovarajućom relacijom povezan s UT1
- $DUT1 = UT1 - UTC$ opisuje brzinu (nejednolikost) Zemljine rotacije



NEJEDNOLIKOST ZEMLJINE ROTACIJE

otkrićima gibanja polova Zemlje (1888.) i plime i oseke Zemljine kore (ne samo oceana i mora) promjenjeno je dotadašnje mišljenje da je Zemlja čvrsto tijelo, nepromjenjivog oblika, a posumnjalo se u opće prihvaćenu pretpostavku jednolikosti Zemljine rotacije

ure njihalice:

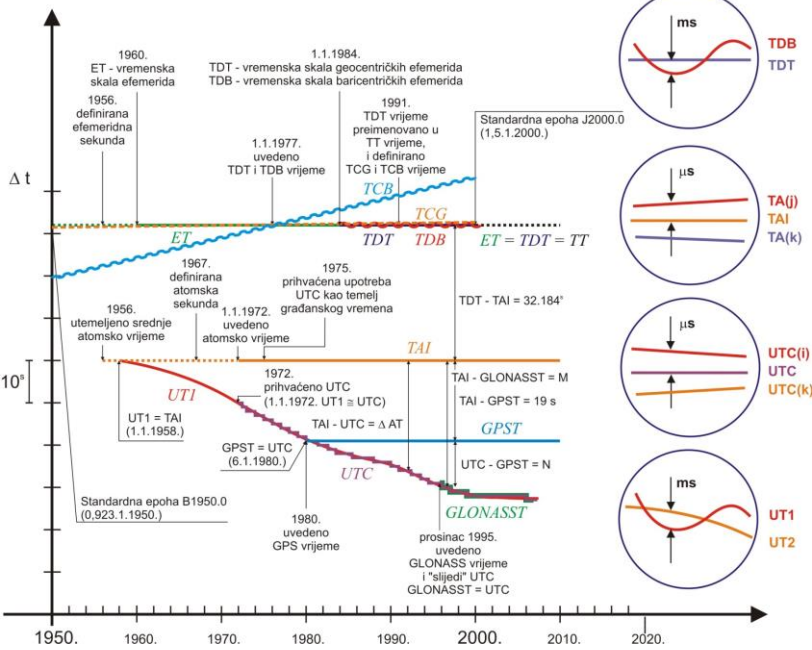
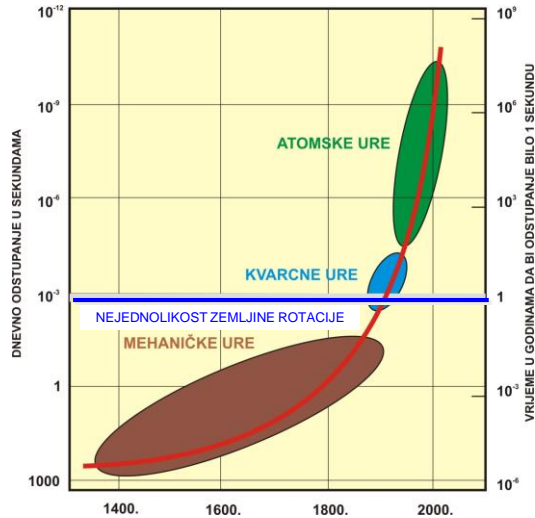
dnevna točnost 2 do 3×10^{-3} s
(≈ 1 s na godinu)

kvarcne ure:

dnevna točnost 2 do 3×10^{-6} s

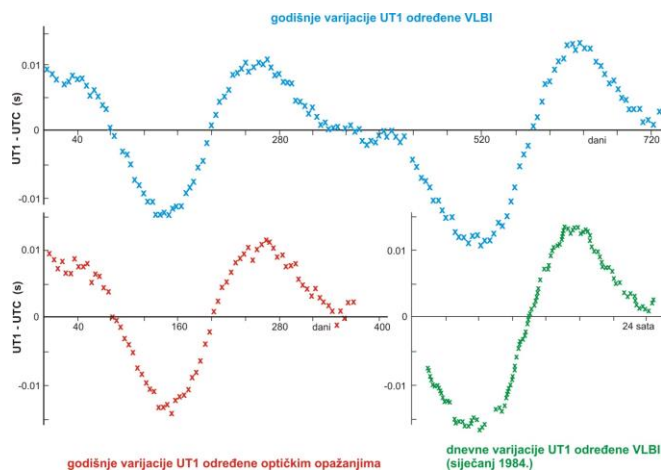
atomske ure:

dnevna točnost 2 do 3×10^{-15} s



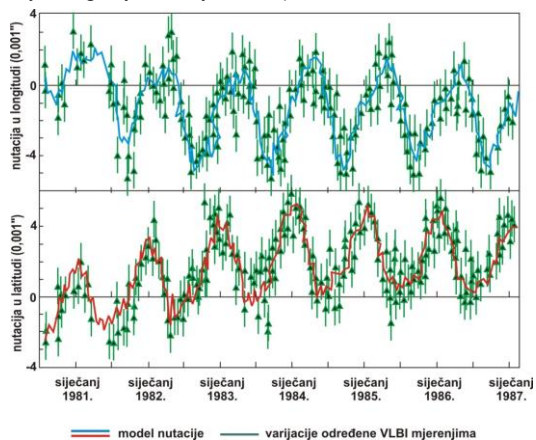
NEJEDNOLIKOST ZEMLJINE ROTACIJE

- od 1972. - povremeno određivane varijacije UT0 ili UT1
- od 1985. - kompletne serije dnevnih UT1 procjena



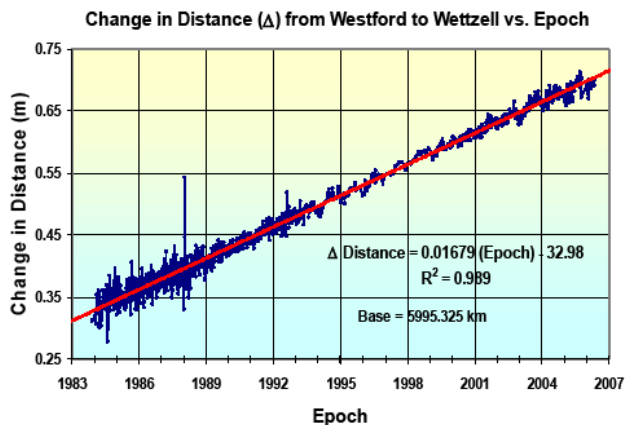
KONTROLA MODELA PRECESIJE KONTROLA I ODREĐIVANJE VARIJACIJA NUTACIJE

- nutacija – teorija/modeli (ponekad primijenjene male varijacije/fluktuacije koje omogućuju korekciju modela)
- precesija – teorija/modeli

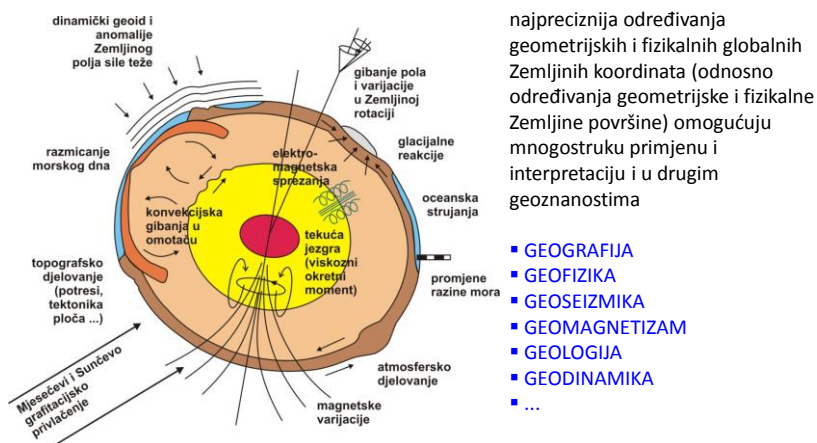


PRAĆENJE PROMJENE DULJINE BAZE I PROMJENE POLOŽAJA STAJALIŠTA

- promjene duljine baze WESTFORD (SAD) – WETTZELL (Njemačka) /5995,325 km/
- VLBI opažanja su potvrdila produljenje baze za oko 40 cm u periodu od 1984. - 2006. ("otvaranje dna Atlanskog oceana")



MULTIDISCIPLINARNA GEOZNA NSTVENA ISTRAŽIVANJA





International Association of Geodesy

<http://www.iag-aig.org/>

IAG službe (servisi), http://www.iag-aig.org/index.php?tpl=text&id_c=1&id_t=102

...

[International GNSS Service](#) (IGS, 1989., → 1994.)

[International VLBI Service](#) (IVS, 1999.)

[International Laser Ranging Service](#) (ILRS, 1998.)

[International Doris Service](#) (IDS, 2003.)

[Global Geodetic Observing System](#) (GGOS, 2004.)

[International Earth Rotation and Reference Systems Service](#) (IERS, 1987./88.)

[Time Section of the International Bureau of Weights and Measures](#) (BIPM, 1875.)



International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS

<http://www.iers.org/>

International Astronomical Union, IAU (<http://www.iau.org/>) i

International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG (<http://www.iugg.org/>),

osnivaju 1987. **International Earth Rotation Service, IERS** (radno 1. 1. 1988.),
2003. servis preimenovan u:

International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS

Temeljni ciljevi IERS su služiti astronomskim, geodetskim i geofizičkim zajednicama/organizacijama pružajući sljedeće:

- ICRS i njegova realizacija ICRF
- ITRS i njegova realizacija ITRF
- Zemljine orijentacijske parametre (EOP)
- geofizičke podatke za interpretaciju vremensko/prostornih varijacija u ICRF, ITRF i EOP
- standarde (normative), konstante i modele (tj. konvencije)