

poljima stalnih geodetskih točaka na kopnu. Akustičke se metode koriste i za navigaciju podmornica, podvodna istraživanja te za precizno navođenje platformi za bušenje. Osim za pozicioniranje plovila, akustičke su metode nezamjenjive za precizno mjerenje dubina. Ultrazvučni dubinomjeri ili ehosonderi su potisnuli klasične, neposredne metode mjerenja dubina, a u kombinaciji s GPS-tehnologijom predstavljaju moćno sredstvo za ekonomično pridobivanje točnih trodimenzionalnih koordinata morskog, jezerskog ili riječnog dna u jedinstvenom koordinatnom sustavu. Povezivanjem tako dobivenih koordinata sa srednjom razinom vode koju opažaju mareografi, dobivaju se stvarne dubine dna u realnom vremenu.

### Mareografi, geoid i visinski datum

Problem definicije geodetskog datuma vrlo je star i tek se u posljednje vrijeme počinje realizirati na svjetskoj razini. Dok su globalni satelitski sustavi za pozicioniranje načelno riješili taj problem u geometrijskom smislu, ostaje i dalje problem rješavanja jedinstvenog fizikalno definiranog visinskog sustava. Još iz XIX. stoljeća potiče definicija osnovne plohe visinskog sustava - geoida - uz pomoć idealizirane površine oceana zamišljeno produženom ispod zemaljskog kopna. Brojne stanice za opažanje razine mora - mareografi - desetljećima iz sata u sat bilježe kretanje vodenih masa prouzročene plimotvornim silama, morskim strujama i vjetrom. Danas, zahvaljujući satelitskim opažanjima morske površine (satelitska altimetrija) znamo da ekvipotencijalna ploha geoida često odstupa od srednje razine mora. Dugotrajna mareografska mjerenja kombinirana s preciznim nivelmanskim radovima upućuju i na sekularne promjene srednje razine mora i u interdisciplinarnoj suradnji s oceanografijom daju svoj doprinos interpretaciji i prognozi globalnih klimatskih promjena

### Hidrografski informacijski sustavi

Važan zadatak pomorske geodezije je stvaranje teorijskih temelja i praktična realizacija višenamjenskih hidrografskih informacijskih sustava: prostorno-vremenskih baza podataka u realnom vremenu dostupnih svim zainteresiranim korisnicima. Pretpostavka za stvaranje kvalitetnih baza podataka o pomorskom dobru, plovnim putovima i pripadajućim objektima su integracija permanentnih opažanja mareografa i limnigrafa (uređaji za utvrđivanje trenutne razine slatkih voda) i aktualnih batimetrijskih podataka s dinamičkim pozicijama pokretnih objekata.

*doc. dr. sc. Damir Medak*  
Geodetski fakultet, Zavod za geomatiku,  
[www.geof.hr/~dmedak](http://www.geof.hr/~dmedak)

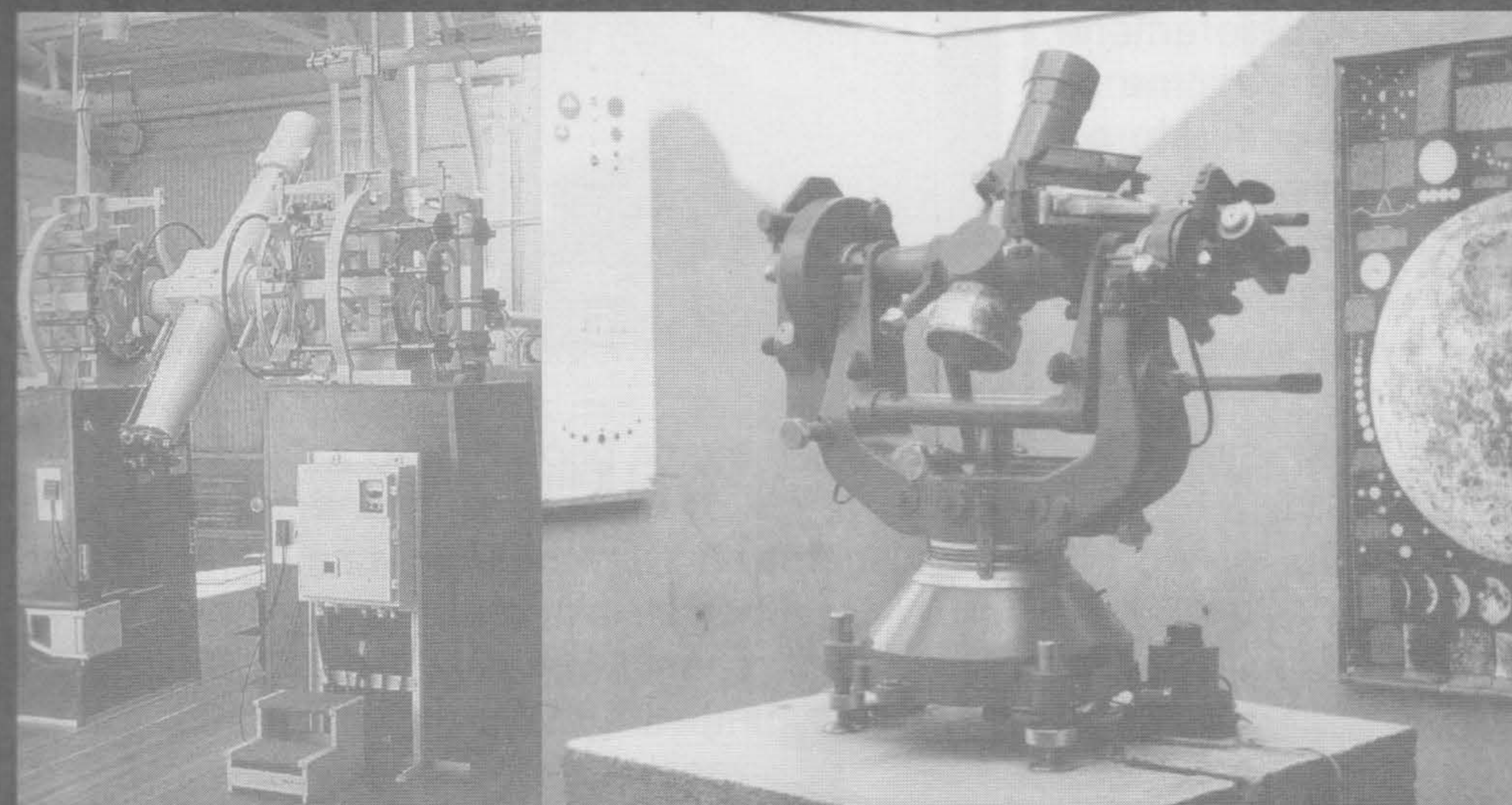
Iz općenite definicije astronomije kao znanosti o svemiru proizlazi da je astronomija multidisciplinarna znanost, koja se sastoji od niza znanstvenih i stručnih područja, i čija se istraživanja izravno ili neizravno prožimlju s istraživanjima u drugim prirodnim i tehničkim znanostima. Ponajprije astronomiju dijelimo na klasičnu i modernu. Jedna je grana klasične astronomije i položajna astronomija. Određivanje položaja i kretanja nebeskih tijela, mjerenje nepravilnosti Zemljine rotacije i kretanje polova samo su neki zadaci položajne astronomije ili astrometrije. Dio položajne astronomije u kojoj opažanjem nebeskih tijela određujemo astronomske koordinate stajališta na Zemlji (širinu i duljinu) ili određujemo smjer prema nekoj točki na Zemlji (azimut) nazivamo geodetskom astronomijom.

Optička astrometrijska mjerenja obavljaju se vrlo preciznim i složenim instrumentima. Najprecizniji su fundamentalni astrometrijski instrumenti (meridijanski krug, veliki pasažni instrument), a postavljeni su samo na nekoliko desetaka astronomskih opservatorija. Tim se instrumentima kontinuirano prati nepravilnost Zemljine rotacije i promjena širine (kretanje pola) i određuju nebeske ekvatorske koordinate nekoliko stotina zvijezda. Za izradu zvjezdanih kataloga koordinate zvijezda obično određujemo ekvatorskim instrumentima od prije određenih koordinata odabranih zvijezda. Za razliku od fundamentalnih, astronomsko-geodetski instrumenti (univerzalni instrument),

manjih su dimenzija, neznatno slabije točnosti, i većina ih je prenosiva. Zbog svoje visoke preciznosti i prenosivosti upotrebljavaju se za određivanja geografskih (astronomskih) koordinata stajališta, ali i u geodeziji za triangulaciju I. reda.

U drugoj polovini dvadesetoga stoljeća, optička astrometrijska mjerenja promjenljivosti Zemljine rotacije i kretanje Zemljine rotacijske osi (kretanje polova), određivanja precesije i nutacije i drugo, zamijenila su vrlo precizna radiointerferometrijska mjerenja. Naime, sredinom 1960tih razvijaju radioastronomi tehniku mikrovalne radiointerferometrije, koja je omogućila poboljšano proučavanje zvijezda, galaktika i međuzvjezdanog prostora, ali i našla veliku primjenu u položajnoj astronomiji i u nekim geoznanostima poglavito u geodeziji i geofizici.

bez povećanja površine antene, nađeno je u gradnji složenih sustava antena odnosno nizova antena. Dakle, zbog prostornog razlučivanja vrlo slabih izvora i određivanja strukture radioizvora, radioastronomi su po načelima optičke interferometrije konstruirali radiointerferometre, koji se sastoje od dva ili više antenskih sustava u području kratkih i ultrakratkih valova. Svaki radioteleskop prima valove druge faze, a ukupan zapis nastaje interferencijom (zbrajanjem signala što ih svaki radioteleskop prima neovisno). Ako su dakle valovi u istoj fazi nastaje pojačanje, odnosno ako su u protufazi poništenje. Uvođenjem radiointerferometara kod kojih je duljina baze (udaljenosti između dva ili više radioteleskopa) jednaka efektivnom promjeru radioteleskopa, izbjegnuta je potreba gradnje velikih antena, a znatno je povećana razlučivost.



*Meridijanski krug i univerzalni instrument Wild T4.*

Dva su zahtjeva što ga postavlja radioastronomija: utvrditi postojanje radioizvora, najčešće onih izvora kojima su signali vrlo slabi i postići što veće razlučivanje ili rezoluciju, odnosno što preciznije odrediti smjer pristizanja signala. Mogućnosti razlučivanja radioteleskopa ograničena je. Naime, kutna razlučivost radioteleskopa određena je omjerom valne duljine radijacije i promjerom teleskopa. Tako naprimjer, radioteleskop koji prima radiovalove valne duljine 3,75 cm ( $\gg$  8 GHz) treba imati promjer 15 km, da bi postigao rezoluciju optičkog teleskopa promjera objektiva 20 cm. Rješenje problema povećanja rezolucije radioteleskopa, bez povećanja osjetljivosti, tj.

U prvim su interferometrijskim mjerenjima radiosignali primani prijammnicima s oscilatorom i preko kablova prenošeni u korelator, kako bi se odredilo vremensko ili fazno kašnjenje. Takva kratkobazisna interferometrija (SBI - Short Baseline Interferometry) u kojoj je potrebna fizička veza između dva radioteleskopa, u uporabi je djelomično i danas, a duljina baze ograničena je na desetak kilometara.

Razvoj radiointerferometrije dugih baza tijesno je povezan s razvojem vrlo preciznih satova i frekvencijskih standarda, odnosno razvojem neovisnog zapisivanja radiosignala. Krajem šezdesetih godina konstrukcijom visoko stabilnih satova, primljeni se radiosignali zajedno s vremenom pojedinačno zapisuju na svakoj anteni i pohranjuju na magnetske trake, te kasnije prenose na korelator i koreliraju s ostalim podacima. Fizička veza između antena ne postoji, a duljina baze ograničena je samo zahtjevom da radioizvor istodobno bude dovoljno

dugo vremena "vidljiv" s dva radioteleskopa. To je tehnika dugobazisne interferometrije (VLBI - Very Long Baseline Interferometry).

U dvije znanstvene discipline - astrofizici i geodeziji - dugobazisna je interferometrija ponajviše razvijana i primjenjena. Naime, u astrofizičkim studijama ustrojstvo i položaj radioizvora određuje se prema poznatoj duljini baze interferometra. Orijentacija i duljina baze određuje se u geodeziji uz pretpostavku da su položaji radioizvora poznati. Dvojnost problematike dugobazisne interferometrije dovela je do suradnje između te dvije znanstvene discipline.

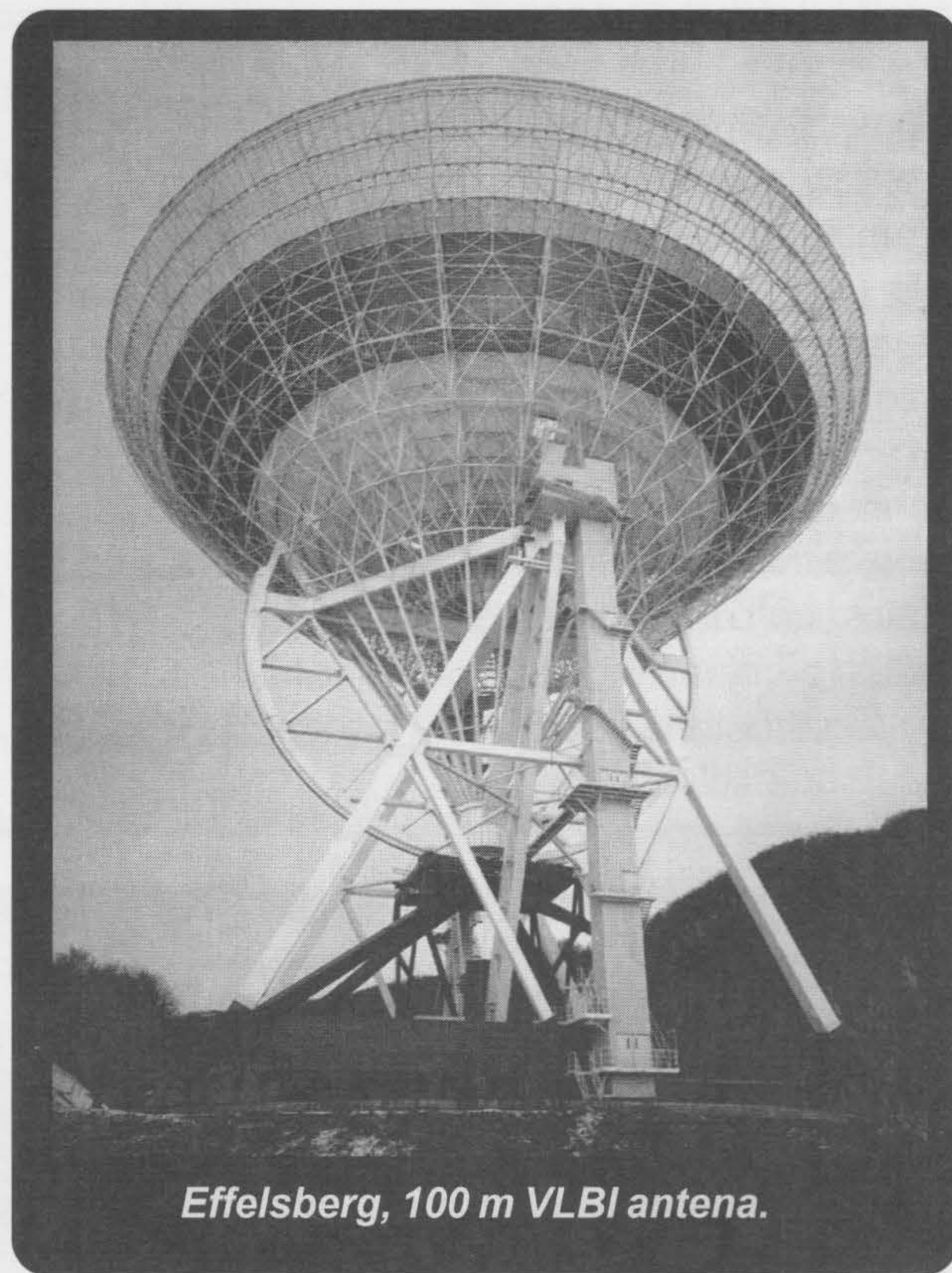
### Geometrija VLBI

VLBI je u osnovi geometrijska metoda određivanja duljine i orijentacije vrlo duge baze, mjerenjem razlike vremena dolaska valnog fronta na dvije radioantene na krajevima baze. Naime, valni front ne dolazi na obje antene istodobno i osnovna opažana veličina je vremensko kašnjenje, koje je proteklo od trenutka prijama valnog fronta izvangalaktičkog radioizvora na jednoj anteni do trenutka prijama istog valnog fronta na drugoj anteni baze. Vremensko kašnjenje  $\Delta t$  pojednostavljeno je iskazano jednadžbom

$$\Delta t = \frac{s}{c}$$

Kašnjenje radiosignala funkcija je geometrijskog,

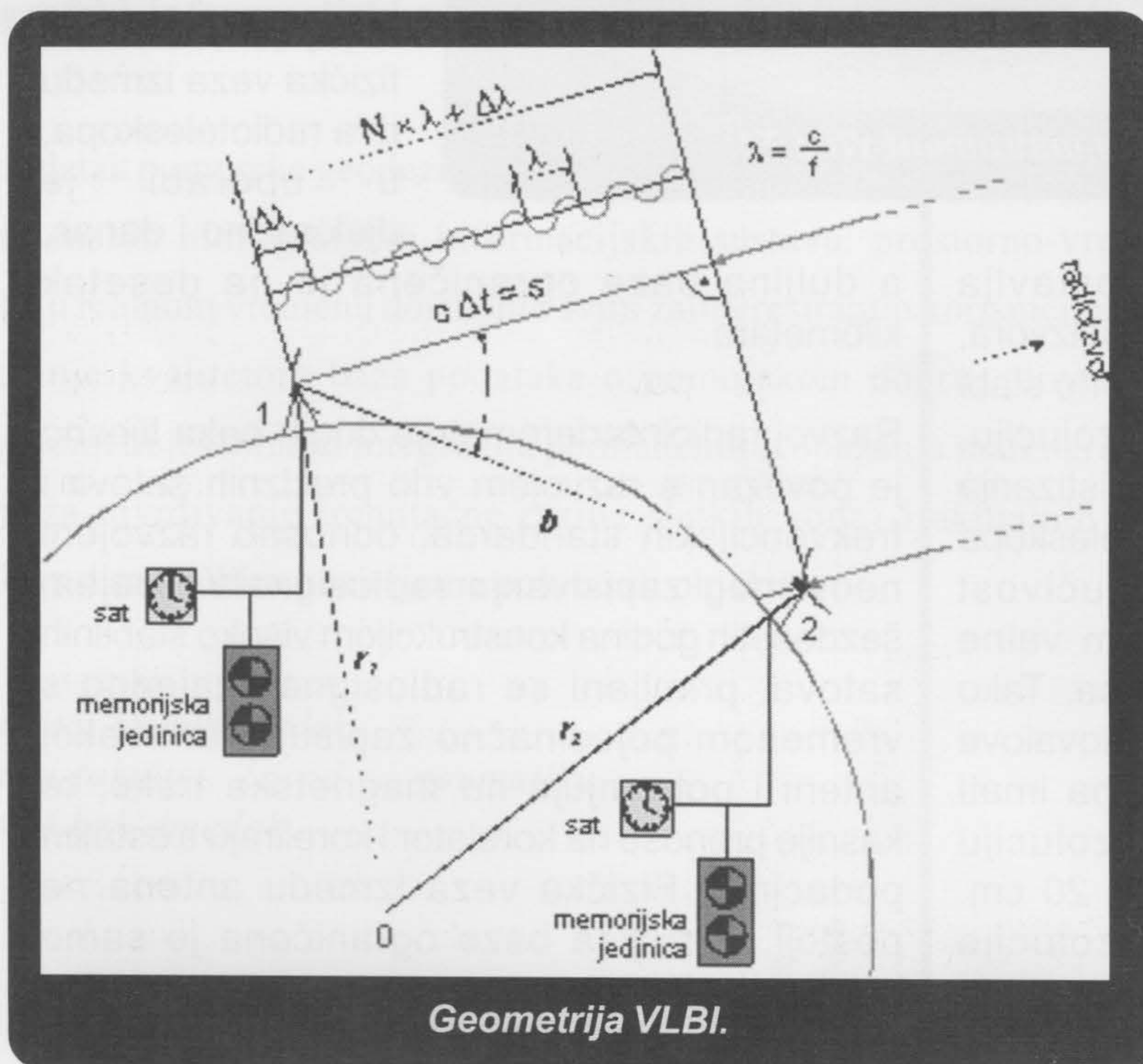
satnog, troposferskog i ionosferskog zaostajanja. Uz pretpostavku da radioval prolazi potpunim vakuumom i bezpogrešnosti i usklađenosti instrumentarija, interferometrijsko



Effelsberg, 100 m VLBI antena.

je zaostajanje tada geometrijsko zaostajanje, i nije dulje od 20 milisekundi ( $1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$ ) s promjenama od 3,1 ms, uzrokovano Zemljinom rotacijom. Geometrijska komponenta kašnjenja općenito je najveća komponenta mjenenog zaostajanja. Satno zaostajanje ovisno je o stabilnosti stajališnog sata. Tako naprimjer hidrogenski MASER može u 24-satnoj sesiji kasniti ili brzati i do 0,19 ms. Troposfersko zaostajanje iznosi oko 6,6 nanosekundi ( $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ ), a ionosfersko aproksimativno do 0,2 ns.

Uobičajen zemaljski VLBI sustav sastoji se od najmanje dvije antene koje istodobno primaju signale s nekog svemirskog radioizvora. Fizička veza između antena ne postoji, jer antene mogu biti međusobno udaljene i tisuće kilometara. Signali svemirskih radioizvora vrlo su male snage. Potrebni su stoga radioteleskopi

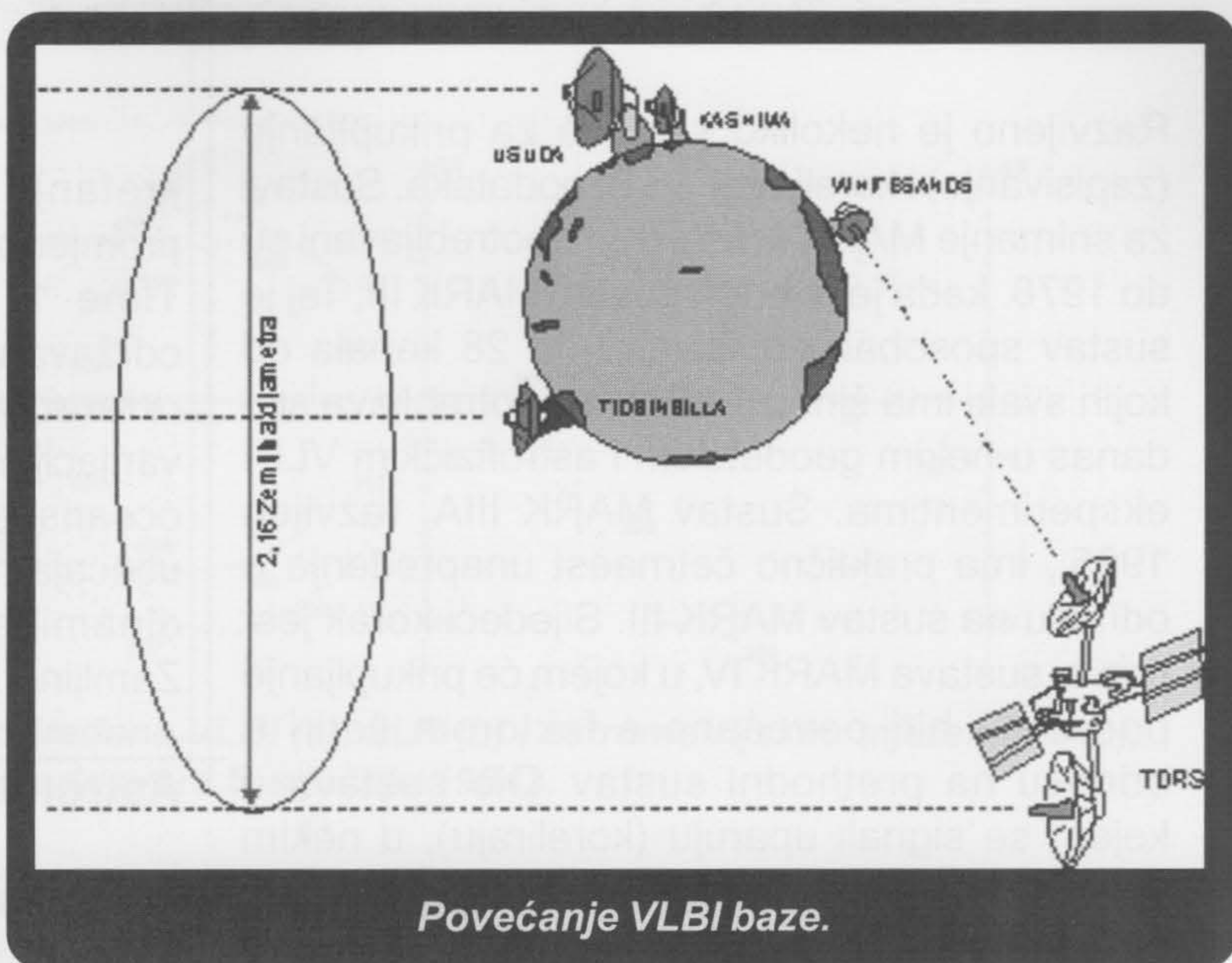


Geometrija VLBI.

velikih promjera antena (veći od 10 m). Najveće VLBI antene su npr. radioteleskop Max Planck (Instituta Effelsberg blizu Bonna u Njemačkoj) promjera antene 100 m, Lovell teleskop (Jodrell Bank u Velikoj Britaniji) promjera antene 76 m, NASA ini teleskopi u kalifornijskoj pustinji Mojave te Madridu i Canberri promjera antene 64 m, te teleskop Owens Valley na California Institute of Technology promjera antene 40 m i drugi.

Ako je više antena manjih promjera uključeno u zajednički interferometrijski sustav, a neke su antene međusobno vrlo udaljene, tada čine interferometrijski niz vrlo duge baze. Takav je američki interferometrijski niz vrlo duge baze (VLBA - Very Long Base Array) sustav od 10 identičnih 25 m radioteleskopa, raspoređenih od Havaja (Mauna Kea), uzduž američkog teritorija do Djevičanskih otoka (St. Croix). Rezolucija tog sustava je do 0,0002". Maksimalna duljina baze za radioteleskope na Zemlji iznosi oko 1,5 RÄ, iako je optimalna duljina otprilike jednaka Zemljinom polumjeru. Znatnije povećanje duljine baze moguće je lansiranjem radioteleskopa u svemir.

U prvoj polovini devedesetih lansirani su u Zemljinu orbitu radioteleskopi koji su povezani sa zemaljskom VLBI mrežom. Na taj način počinje epoha svemirskog VLBI. U najjednostavnijem slučaju svemirskog VLBI

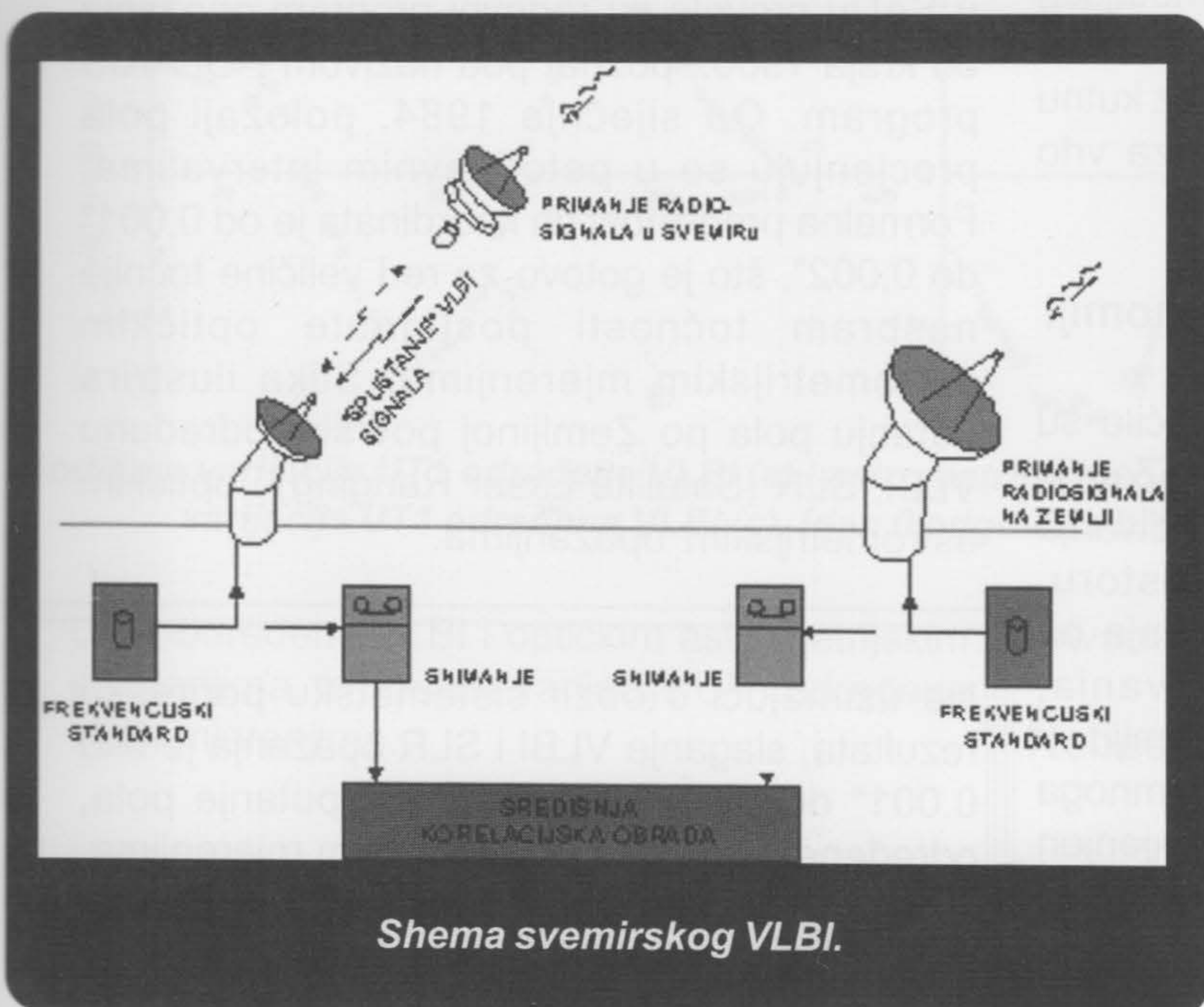


Povećanje VLBI baze.

jedna je stanica orbitalni VLBI satelit, a druga je zemaljski radioteleskop. Radioteleskop u svemiru opažat će neki ekstragalaktički radioizvor u konjunkciji s mrežom antena na Zemlji, i prosljeđivati primljene signale do telemetrijske stanice na Zemlji. Nakon transmisije podaci se pohranjuju na specijalne magnetske trake. Mjerenja na svemirskim radioteleskopima zajedno s mjerenjima na zemaljskim radioteleskopima obrađuju se u središnjoj korelacijskoj stanici.

Za dobivanje još veće kutne rezolucije potrebno je više svemirskih VLBI. Istodobna interferometrijska dugobazisna opažanja s pomoću dva ili više VLBI satelita, pretpostavlja se, bit će vrlo brzo realnost i dominantna dugobazisna tehnika.

Interferometrijski sustav s velikim brojem antena, nizovima radioteleskopa (VLA - Very Large Array) po sadržaju instrumentarija se ne razlikuju od dugobazisnih interferometara osim po broju antena, dakako manjih promjera, i činjenice da antene mogu biti međusobno fizički povezane. Tako se VLA nedaleko Soccoroa u Novom Meksiku (SAD) sastoji od 27 antena promjera 25 m, pomičnih po tračnicama, složenim u tri pojedinačna niza u obliku slova Y, s krakovima duljine 21, 21 i 19 km. Svaki je par antena jedan interferometar, pa imamo 351 nezavisni interferometar, različitih duljina baza i smjerova. Antene su povezane sa središtem za obradu podataka, valovodovima duljine oko 75 km. Rezolucija tog sustava je između 0,13" i 2".



Shema svemirskog VLBI.

Razvijeno je nekoliko sustava za prikupljanje (zapisivanje) i koreliranje VLBI podataka. Sustavi za snimanje MARK I i MARK II upotrebljavani su do 1978. kada je uveden sustav MARK III. Taj je sustav sposoban zapisivati i do 28 kanala od kojih svaki ima širinu 2 MHz, a upotrebljava se i danas u nekim geodetskim i astrofizičkim VLBI eksperimentima. Sustav MARK IIIA, razvijen 1985., ima praktično četrnaest unapređenja u odnosu na sustav MARK III. Sljedeći korak jest razvoj sustava MARK IV, u kojem će prikupljanje podataka biti povećano s faktorom četiri u odnosu na prethodni sustav. Dio sustava u kojem se signali uparuju (koreliraju), u nekim ranim VLBI eksperimentima, obavljao se na standardnim računalima, što je bilo nepraktično zbog vrlo duge obrade. Danas se upotrebljavaju korelatori za posebne namjene, ali je čak i tada vrijeme obrade dugo. Naprimjer, korelator sustava MARK III može obrađivati samo jedan bazis u jednom trenutku, a vrijeme potrebno za obradu je otprilike isto kao i vrijeme potrebno za opažanje. Brži sustav MARK IIIA, u stanju je istodobno baratati i s 10 baza s 5 postaja.

Svemirski radioizvori emitiraju energiju izrazito inkoherentnog signala širokog spektra frekvencija od  $10^7$  do  $10^{11}$  Hz. VLBI prijarnici podešeni su samo na prijam određenih frekvencija. Karakteristične frekvencije su iz X-područja (valna duljina oko 4 cm ili frekvencija  $8 \times 10^9$  Hz) i S-područja (valna duljina 15 cm ili frekvencija  $2 \cdot 10^9$  Hz). Procjenjuje se da postoji oko 1500 izvangalaktičkih izvora čiji je intenzitet dovoljno jak da bi ga se moglo promatrati teleskopima srednjeg i velikog promjera, ali svi nisu odgovarajući za geodetski (astrometrijski) VLBI. Od tih 1500 izvora oko 25% smatra se točkastim izvorima, kad ih se promatra uz kutnu rezoluciju od 0.001", i mogu poslužiti za vrlo precizna astrometrijska opažanja.

### **Primjene VLBI u geodetskoj astronomiji**

Razvoj i primjene VLBI tehnike omogućile su globalna, brza i najpreciznija mjerenja na Zemlji, mjerenja kretanja čvrste Zemlje, ali i određivanja položaja Zemlje u svemirskom prostoru. Određivanje položaja i promjene položaja na Zemlji, te interpretacije tih određivanja, omogućila su puno novih saznanja o Zemlji. VLBI unapređuje mjerenja u astrometriji i mnoga istraživanja u geoznanostima te je primjenjen (između ostalog) u sljedećim područjima: izučavanju promjenljivosti Zemljine rotacije i

kretanje Zemljine rotacijske osi, iskazane promjenom svjetskog vremena UT1 (Universal Time 1) i kretanjem polova, definiranju i održavanju nebeskog i zemaljskog inercijalnog referentnog sustava, izučavanju globalnih varijacija nivoa oceana, izučavanju atmosfere, oceanske plime i oseke kao i vjetrova i njihovog utjecaja na elastičnu Zemljinu koru, izučavanju dinamike Zemljine kore, izučavanju oblika Zemljine kore i graničnog omotača, i drugome.

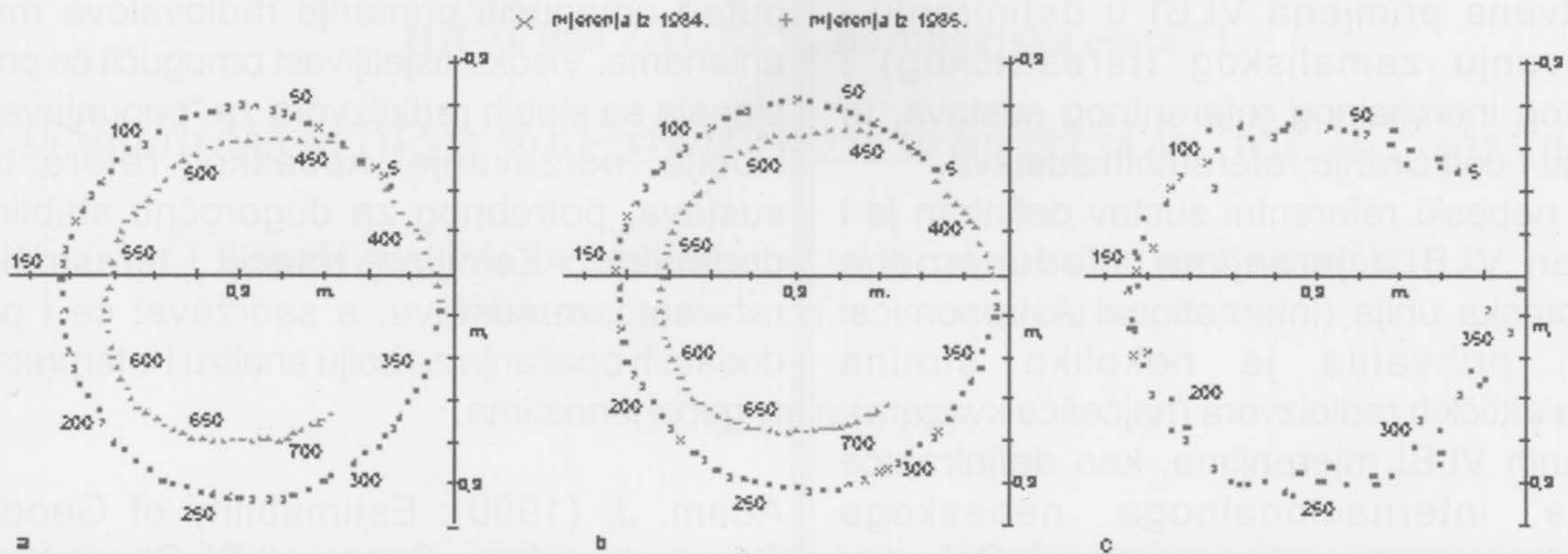
### **Astrometrijske veličine određene VLBI**

Astrometrijskim VLBI mjerenjima određujemo gibanje baze u prostoru, a uz pretpostavku da su te baze čvrsto vezane za Zemlju, rotacijsko gibanje Zemlje odnosno nepravilnosti u brzini rotacije, kao i gibanje pola. Nadalje, astrometrijskim VLBI mjerenjima određujemo precesiju i nutaciju, definiramo i održavamo nebeski i terestrički referentni sustav i drugo.

### **Gibanje pola i nepravilnosti Zemljine rotacije**

Koordinate položaja pola, od 1972. određivane VLBI mjerenjima, neredovito su distribuirane. Sistematizirani rezultati postali su dostupni tek uvođenjem IRIS (International Radio Interferometric Surveying) programa. Taj program obuhvaća tri permanentne stanice u SADu (Fort Davis, Texas; Westford, Massachusetts; Richmond, Florida) i četvrtu Wettzell u Njemačkoj, kao i nekoliko drugih stanica koje povremeno daju podatke. Stanice u SADu provele su redovni program opažanja od kraja 1980., poznat pod nazivom POLARIS program. Od siječnja 1984. položaji pola procjenjuju se u petodnevnim intervalima. Formalna preciznost tih koordinata je od 0,001" do 0,002", što je gotovo za red veličine točnije naspram točnosti postignute optičkim astrometrijskim mjerenjima. Slika ilustrira putanju pola po Zemljinoj površini određenu VLBI, SLR (Satellite Laser Ranging) i optičkim astrometrijskim opažanjima.

Ne uzimajući u obzir sistematsku pogrešku rezultata, slaganje VLBI i SLR opažanja je oko 0.001" do 0.002". Nestabilnost putanje pola, određene optičkim astrometrijskim mjerenjima, posljedica je pogrešaka mjerenja. Danas IERS



Putanja pola po Zemljinoj površini određena VLBI (a), SLR (b) i astrometrijskim mjerenjima (c), (dan 5 odgovara 5. siječnju 1984.).

(International Earth Rotation Service) preko svojih tjednih i mjesečnih publikacija (IERS Bulletin A i B) ili putem Interneta distribuira Zemljine orijentacijske parametre.

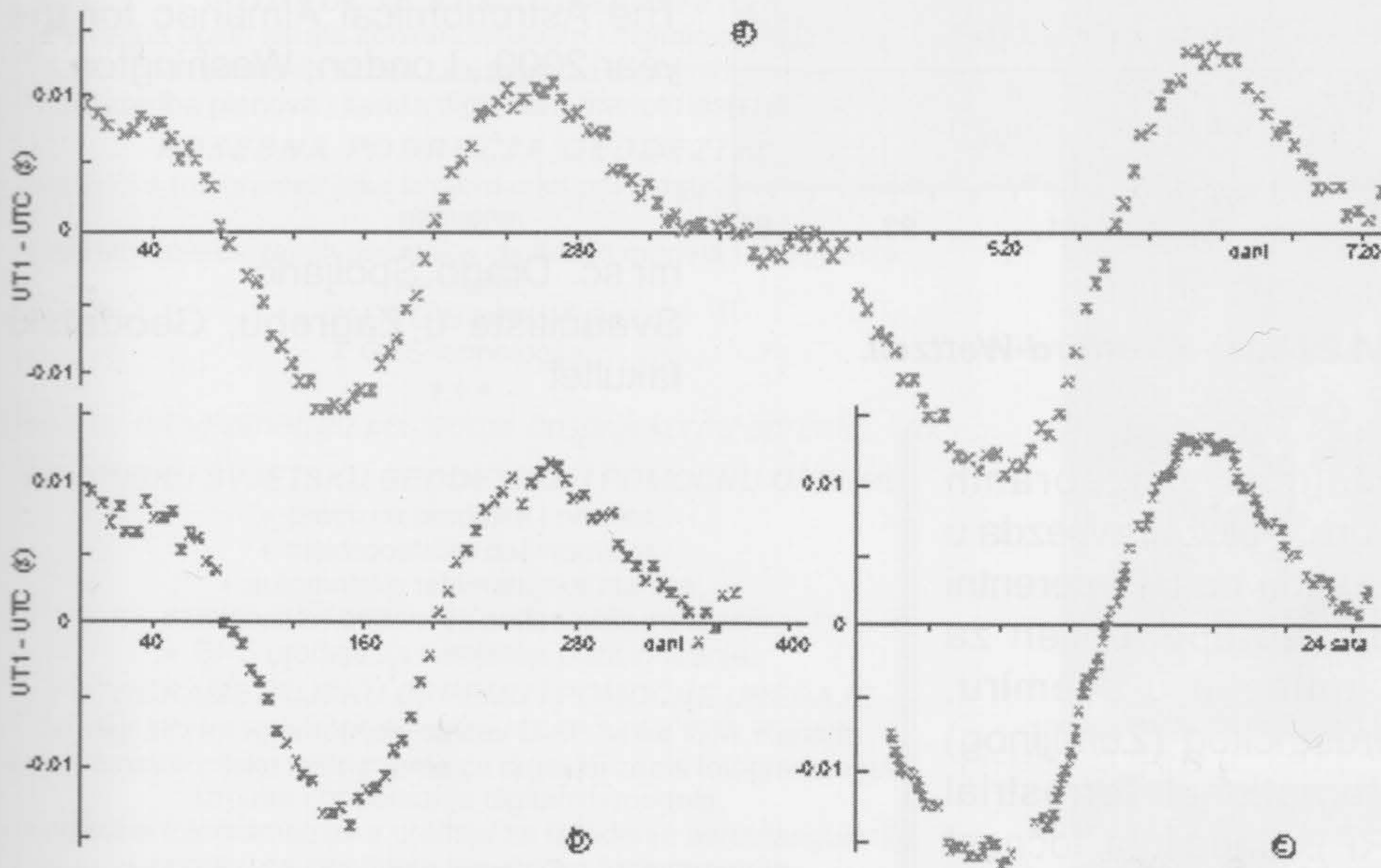
Od 1972. povremeno su VLBI tehnikama mjerene promjene (varijacije) UT0 ili UT1. Da bi odredili UT1 moramo poznavati kretanje pola. Procjene za kretanje pola u pravilno razmaknutim kratkim intervalima, postale su dostupne od početka 1984., a od travnja 1985. postoje gotovo kompletne serije dnevnih UT1 procjena. Na slici su prikazane godišnje varijacije

### Promjene duljine i orijentacije baze

U najranijim geodetskim VLBI eksperimentima iz 1969. određene su duljine baza s nesigurnostima od oko 2 m. Nekoliko godina kasnije, preciznost mjerenja iznosila je oko 10 cm na 4000 km dugoj bazi. Razvojem VLBI tehnike dostignuta je danas preciznost od 1 mm u horizontalnom smislu i 2 do 3 mm u vertikalnom smislu.

Ponavljanje mjerenja u nekom vremenskom

razdoblju omogućuje praćenje promjena duljine i položaja baza. Tako je višegodišnjim mjerenjima duljine VLBI baze između Westforda (SAD) i Wettzella (Njemačka) uočeno produljenje baze, koje geoznanstvenici objašnjavaju pomicanjem kontinentata -



Godišnje varijacije UT1 određene VLBI (a) i astrometrijskim opažanjima (b), i dnevne varijacija UT1 određene VLBI (c), (dan 0 odgovara 0. siječnju 1984.)

UT1, određene VLBI i optičkim astrometrijskim opažanjima, te dnevne varijacije UT1 određene VLBI mjerenjima.

“otvaranjem vrata Atlanskog oceana”.

### Nebeski i zemaljski referentni okvir

VLBI mjerenjima određujemo danas položaje antena na Zemlji i položaje kvazara na nebu s nedostignutom točnošću. Stoga je

jedinstvena primjena VLBI u definiranju i određivanju zemaljskog (terestričkog) i nebeskog inercijalnog referentnog sustava, te spajanju i unificiranju referentnih sustava.

Važeći nebeski referentni sustav definiran je i određen VLBI mjerenjima. Međunarodna astronomska unija (International Astronomical Union) prihvatila je nekoliko stotina izvangalaktičkih radioizvora (najčešće kvazara), određenih VLBI mjerenjima, kao definirajuće objekte internacionalnoga nebeskoga referentnog sustava (International Celestial Reference System - ICRS) i njegovu realizaciju International Celestial Reference Frame (ICRF), kao prostorno-fiksni okvir ostvaren na visoko

puta i omogućiti primanje radiovalova malim antenama. Visoka osjetljivost omogućit će prijam signala sa slabih radioizvora za "popunjavanje" i bolje "održavanje" nebeskog referentnog sustava, potrebnog za dugoročnu stabilnost podataka o Zemljinoj rotaciji i terestričkom referentnom sustavu, a sadržavat će i puno dodatnih opažanja za bolju analizu i interpretaciju u geoznanostima.

Adam, J. (1990): Estimability of Geodetic Parameters from Space VLBI Observables. Report No. 406, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus.

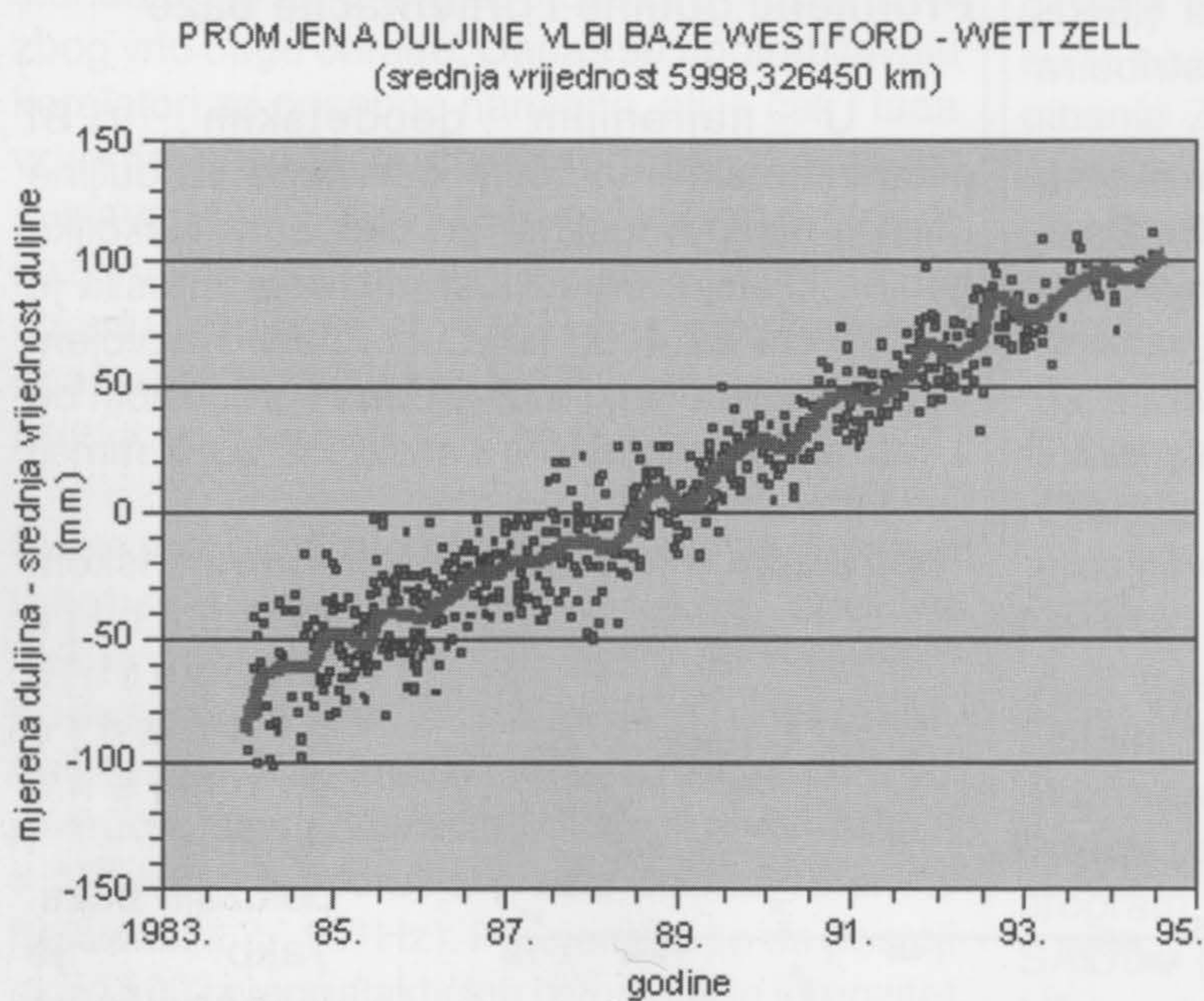
Brosche, P. (1979): Astrometrijske i geodetske primjene radiointerferometrije.

(predavanje prof. Broschea na Geodetskom fakultetu 2.04.1979.)

Campbell, J., Witte, B. (1978): Grundlagen und geodätische Anwendung der Very Long Baseline Interferometry. Zeitschrift für Vermessungswesen, 1, 10-20.

Gipson, J. (1996): The Synergy of VLBI and GPS. GPS World, 2, 49-55.

The Astronomical Almanac for the year 2000., London, Washington.



**Produljenje VLBI baze Westford-Wetzell.**

točnim radio-položajima izabranih izvangalaktičkih radioizvora. Položaji zvijezda u našoj galaktici vezani su sada na taj referentni nebeski okvir koji je ujedno upotrebljen za mjerenje Zemljine orijentacije u svemiru, odnosno orijentacije terestričkog (Zemljinog) referentnog okvira (International Terrestrial Reference Frame - ITRF). Sadašnja točnost položaja antena je nekoliko milimetara, a položaji kvazara određeni su s točnošću od nekoliko desetisucinki kutne sekunde.

Glavni ciljevi današnjih svemirskih VLBI projekata u biti su astrofizička istraživanja. Razvoj VLBI u položajnoj astronomiji i geodeziji u prvom je redu proširenje primjene kao i ponovna poboljšana preciznosti mjerenja. Sustav za prikupljanje podataka MARK IV povećat će širinu snimanja radiospektra do četiri

mr.sc. Drago Špoljarić  
Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet