

Maanmittaus 79:1-2 (2004)

Saapunut 6.9.2004

Hyväksytty 27.9.2004

## Metsähovin geodeettiset VLBI-mittaukset

**Markku Poutanen ja Jukka Piironen**

Geodeettinen laitos, Geodesian ja geodynamiikan osasto

PL 15 (Geodeetinrinne 2), 02431 Masala

markku.poutanen@fgi.fi, jukka.piironen@fgi.fi

***Tiivistelmä.** Geodeettinen laitos on aloittanut VLBI-mittaukset Metsähovissa yhteistyössä Teknillisen korkeakoulun Metsähovin radiotutkimus-  
aseman kanssa. Havainnot tehdään Metsähovin 13,7 m radioteleskoopilla,  
ja tarkoituksena on osallistua vuosittain 4-6 havaintokampanjaan. Tässä  
artikkelissa kerromme geodeettisista VLBI-mittauksista, miksi niitä teh-  
dään, miten havaintoja käytetään globaalien koordinaatistojen luonnissa  
ja ylläpidossa, sekä millä tavalla ja millaisella laitteistolla Geodeettinen  
laitos niihin osallistuu.*

***Avainsanat:** geodeettinen VLBI, VLBI-mittaukset, koordinaatistot,  
Metsähovin observatorio.*

### 1 Johdanto

Kaikkien tunteman GPS:n ohella geodesiassa on käytössä muutamia muitakin avaruusgeodeettisia mittausten menetelmiä, kuten satelliittilaser ja VLBI. Kullakin näistä on oma tehtävänsä globaalien koordinaatistojen luonnissa ja ylläpidossa, eikä niiden tuottamia havaintoja voi korvata toisilla menetelmillä.

Tarkin ja perustavinta laatua globaalisista mittausten menetelmistä on pitkäkantainterferometria, VLBI (Very Long Baseline Interferometry). Havainnot tehdään suurilla radioteleskoopeilla ja havaintokohteena on kaukaa aurinkokunnan ulkopuolelta tuleva radiotaajuinen säteily. Se on siis täysin riippumaton Maata kiertävistä satelliiteista. Pitkäkantainterferometriaksi kutsutaan menetelmää, jossa radioteleskoopit ovat niin kaukana toisistaan, ettei niiden yhdistäminen toisajassa ole mahdollista. Tällöin havaittavat signaalit taltioidaan magneettinauhoille (nykyisin myös tietokoneen kovalevyille) yhdessä tarkkojen aikamerkkien kanssa.

VLBI kehitettiin alun perin radiotähtitieteen tarpeisiin parantamaan teleskooppien erotuskykyä, mutta myös geodesiassa VLBI on nykyisin korvaamaton globaalien koordinaatistojen luonnissa ja ylläpidossa sekä Maan asennon ja pyörimisliikkeen seurannassa. Geodeettisessa VLBI-mittauksessa havaintokohteina

ovat satojen miljoonien valovuosien päässä olevat kvaasarit, jotka ovat voimakkaita pistemäisiä radiolähteitä. Eri puolilla maapalloa olevilla radioteleskoopeilla havaitaan kvaasareista tulevaa radiosäteilyä. Kun eri teleskoopeista ja useista kymmenistä kvaasareista saadut signaalit prosessoidaan, voidaan teleskooppien välimatkat laskea senttimetrien tarkkuudella.

Geodeettiset VLBI-havainnot koordinoidaan Kansainvälisen geodeettisen assosiaation (IAG) geodeettisen VLBI-palvelun kautta (IVS, International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) (IVS 2004). Vuodesta 2004 lähtien myös Geodeettinen laitos on osallistunut tähän toimintaan.

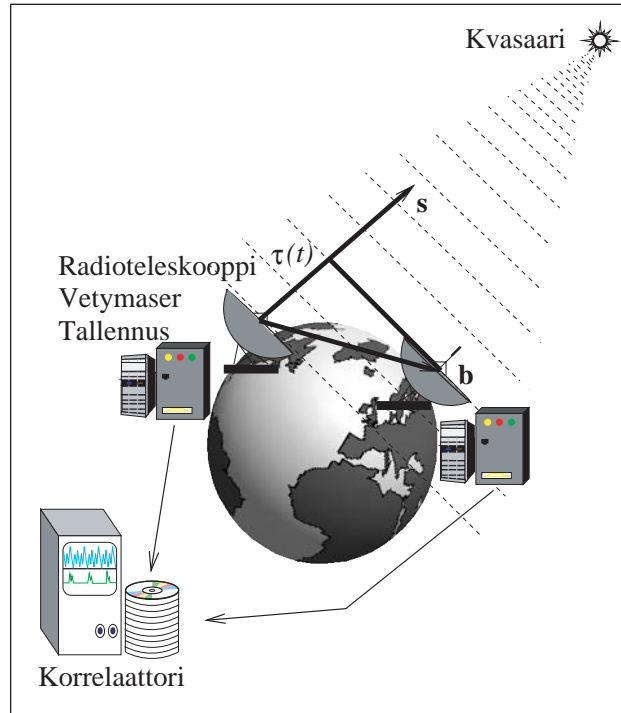
## 2 Mikä VLBI on?

Optisella alueella (aallonpituus  $\lambda \approx 500$  nm) kaukoputkella havaittavien yksityiskohtien erotuskykyä rajoittaa yleensä ilmakehä, jonka turbulenssit vääristävät tulevaa signaalia niin, että hyvissäkään olosuhteissa ei pystytä erottamaan alle kaarisekunnin päässä toisistaan olevia yksityiskohtia. Paljaan silmän erotuskyky on pari kaariminuuttia. Teleskoopin erotuskyky on luokkaa  $\lambda / D$ , missä  $\lambda$  on havaittavan säteilyn aallonpituus ja  $D$  teleskoopin läpimitta. Jo varsin pienellä kaukoputkella päästään optisella alueella kaarisekunnin erotuskykyyn, jolloin kaukoputken koon kasvattamisesta ei enää ole vastaavaa hyötyä ilmakehän häiriöiden vuoksi.

Radioalueella havaittavat aallonpituudet ovat millimetristä metreihin. Ainoa tapa radioteleskoopin erotuskyvyn lisäämiseksi on teleskoopin koon kasvattaminen. Tässä tulee kuitenkin raja vastaan hyvin nopeasti. Suurimmat liikuteltavat radioteleskoopit ovat läpimitaltaan n. 100 m (Green Bank, USA ja Effelsberg, Saksa; Karttunen ym. 2003). Jotta radioalueella saavutettaisiin samanlainen erotuskyky kuin optisella alueella, tarvittaisiin jopa kilometrien läpimittaisia antennoja. Esimerkiksi 3 cm aallonpituudella samanlaisen erotuskyvyn saaminen kuin pienellä 15 cm optisella kaukoputkella vaatisi 10 km läpimittaisen radioteleskoopin.

Ratkaisuksi kehitettiin jo 1960-luvulla interferometrinen menetelmä, jossa kahdesta (tai useammasta) antennista tuleva signaali yhdistetään. Idea sinänsä on vanha, sillä Michelson kokeili Mt. Wilsonilla optista interferometriä jo yli sata vuotta sitten. Optisella alueella vaikeudet olivat kuitenkin niin suuria, että vasta viime aikoina ESO:n (Euroopan eteläinen observatorio) VLT-teleskoopilla on päästy kokeilemaan interferometriä optisella ja lähi-infra aallonpituusalueilla. Tulevaisuudessa optisetkin VLBI:t ovat arkipäivää. Radioalueella interferometriset mittaukset sen sijaan ovat olleet rutiinia jo kolmen vuosikymmenen ajan.

Kaukaisesta radiolähteestä tuleva signaali voidaan ajatella ilmakehän ulkopuolella tasoallokseksi, jolloin teleskoopeihin saapuvan signaalin vaihe-ero on yksinkertaista määrittää (kuva 1). Vaihe-ero riippuu ainoastaan radiolähteen suunnasta kahden teleskoopin väliseen vektoriin nähden. Maapallon pyörimisen vuoksi antenneihin saapuvien signaalien välille syntyy tasaisesti muuttuva vaihe-ero, ts. radiolähdettä seuraamalla saadaan interferenssikuvio, joka riippuu sekä vastaanottimien keskinäisestä asennosta että radiolähteen ominaisuuksista.



**Kuva 1.** Geodeettisen VLBI:n periaate. Kaukaisesta kvasaarista tuleva yhdensuuntainen aaltorintama saapuu eriaikaisesti kahteen teleskooppiin. Teleskooppeihin saapuvan signaalin aikaeron perusteella voidaan määrittää teleskooppien välinen vektori  $\mathbf{b}$ , jos havaintoja on tehty useista eri puolilla taivasta olevista lähteistä. Aaltorintama häiriintyy ilmakehän läpi kulkiessaan, joten signaalin viive täytyy määrittää korreloimalla signaalit ja etsimällä korrelaatiofunktion maksimi.

Muutaman tunnin mittaisista havainnoista voidaan rekonstruoida erotuskyvyltään  $\lambda / D$  luokkaa oleva kartta, missä  $D = \|\mathbf{b}\|$  on radioteleskooppien välimatka. Lopputuloksena on, että menetelmällä saavutetaan likimain sama erotuskyky kuin antennilla, jonka koko olisi sama kuin näiden kahden antennin välimatka.

Teleskooppeihin tulevan signaalin viive  $\tau$  on Maahan kiinnitetyssä ja sen mukana pyörivässä koordinaatistossa

$$\tau(t) = \frac{\mathbf{b} \cdot \mathbf{s}(t)}{c} + \Delta\tau_a(t) + \Delta\tau_i + \Delta\tau_{tr}(t) + \Delta\tau_{ion}(t), \quad (1)$$

missä

- $\mathbf{b}$  on teleskooppien välinen vektori (vakio),
- $\mathbf{s}$  kvasaarin suuntavektori,
- $c$  valonnopeus,
- $\Delta\tau_a$  maan pyörimisliikkeestä ja äärellisestä valon nopeudesta johtuva

	vuorokautinen aberratio, ts. kvaasarin suuntaan tehtävä korjaus,
$\Delta\tau_i$	laite- ja kellokorjauksista johtuva viive,
$\Delta\tau_{tr}$	troposfäärin vaikutus signaaliviiveeseen ja
$\Delta\tau_{ion}$	ionosfäärin vaikutus signaaliviiveeseen.

Signaalien vaihe-ero  $\Phi$  on

$$\Phi(t) = 2\pi\nu\tau(t), \quad (2)$$

missä  $\nu$  on havaittavan signaalin taajuus.

Ilmakehä vääristää tulevaa aaltorintamaa, jolloin teleskooppeihin saapuvan signaalin vaihe muuttuu epäsäännöllisesti. Niinpä vaihe-eron määrittämiseksi signaalit korreloidaan, ja korrelaatiofunktion maksimin avulla löydetään kutakin ajanhetkeä vastaava vaihe-ero. Jos havaitut signaalit ovat  $V_1(t)$  ja  $V_2(t)$ , määritetään korrelaatiofunktion  $R$  maksimi,

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T V_1(t) V_2^*(t - \tau) dt, \quad (3)$$

missä  $T$  on aikaväli jonka yli integrointi tehdään, tähti tarkoittaa havaintofunktion kompleksikonjugaattia ja  $\tau$  on etsitty signaalien välinen viive.

Toistaiseksi korrelointi on vaatinut niin suurta laskentatehoa, ettei sitä ole voitu tehdä ohjelmallisesti, vaan tarkoitusta varten erityisesti rakennetussa korrelaattorissa. Datan määrä saattaa olla satoja megabittejä sekunnissa yhtä teleskooppiä kohti. Vuorokauden mittaisesta havaintojaksosta dataa kertyy jopa yli teratavu. Laskentatehojen kasvaessa myös ohjelmistopohjaiset korrelaattorit alkavat olla riittävän nopeita. Datansiirto internetin kautta on myös tulossa mahdolliseksi. Tähän saakka havainnot on siirretty fyysisesti magneettinauhoilla tai kovalevyillä paikasta toiseen.

Pitkäkantainterferometriassa (VLBI) radioteleskoopit sijaitsevat jopa eri mantereilla tai toinen antenni voi olla Maata kiertävässä satelliitissa. VLBI:llä saavutetaan 0,0001'' (0,1 millikaarisekuntia) erotuskyky, joka on useita kertaluokkia parempi kuin mihin optisella alueella päästään. VLBI:n kehitykseen vaikutti atomikellojen ja ajanmäärityksen kehitys. Riippumattomasti toimivien kellojen synkronointi on pystyttävä tekemään riittävällä tarkkuudella ja kellojen on oltava mittausten ajan stabiileita. Nykyisin käytetään vetymaseria, jonka aikastabiilisuus on luokkaa  $10^{-15}$ . Myös Metsähovin observatoriossa (kuva 2) sijaitsee vetymaser, josta 5 MHz:in taajuinen tarkka aikasignaali otetaan.

Radioastronomiassa VLBI on nykyisin laajasti käytössä. Sen avulla voidaan laatia suuren erotuskyvyn karttoja eri tähtitieteellisistä kohteista useilla eri aallonpituuksilla. Aktiiviset galaksien ytimet, galakseista lähtevien ainesuihkujen rakenne, kvaasarit, kompaktit maserlähteet ja tähtien syntyalueet ovat tyypillisiä astronomisen VLBI-tutkimuksen kohteita.

Voimakkaat pistemäiset radiolähteet, kvaasarit, löydettiin 1960-luvulla. Lähimmätkin kvaasarit ovat satojen miljoonien valovuosien päässä, kaukaisimmat

jopa yli 10 miljardin valovuoden etäisyydellä. Kvasaarien voimakas radiosäteily syntyy hyvin pienellä alueella; termi kvasaari tarkoittaaakin tähdenkaltaista radiolähdettä (quasistellar radio source). Säteilevä alue ei ole kooltaan juuri aurinkokuntaamme suurempi. Kvasaarien arvellaan olevan joidenkin galaksien ytimien lyhyt ja hyvin intensiivinen kehitysvaihe, johon mahdollisesti liittyy supermassiivinen musta aukko.



*Kuva 2. Metsähovin 13,7 metrin radioteleskooppi. Teleskoopilla tehdään myös geodeettisia VLBI-havainnoja. (Kuva: M. Poutanen)*

### 3 Geodeettinen VLBI

Geodeettisissa VLBI-mittauksissa radiolähteinä käytetään kvasaareita. Koska kvasaarien etäisyys on vähintään satoja miljoonia valovuosia, ne muodostavat ajasta ja paikasta riippumattoman kiintopisteverkon. Vaikka kvasaarien todelliset nopeudet olisivat hyvinkin suuria, eivät niiden keskinäiset paikat taivaalla muutu ihmismittapuun mukaan mihinkään. Toinen seuraus suuresta etäisyydestä on, että keskinäiset asemat säilyvät, tarkasteltiinpa niitä maapallolta tai Marsista. VLBI-mittaukset ovat siis paikasta riippumattomia.

Geodeettisissa mittauksissa VLBI-tekniikkaa käytetään tavallaan käänteisesti tähtitieteellisiin sovelluksiin verrattuna. Kohteen yksityiskohtia ei pyritäkään saamaan selville, vaan havaitsemalla eri puolilla taivasta olevia pistemäisiksi tiedettyjä kohteita, voidaan teleskooppien välinen vektori laskea.

Nykyisin geodeettisissa VLBI-havainnoissa käytetään mm. 2 GHz ja 8 GHz taajuuksia (15 cm ja 3,75 cm aallonpituuksia), jolloin pääosa ionosfäärin vaikutuksesta voidaan poistaa kahden taajuuden havainnoissa hieman samaan

tapaan kuin GPS-havainnoissakin. Teleskooppien välisen vektorin määrittämisessä päästään  $10^{-9}$  luokkaa olevaan suhteelliseen tarkkuuteen, ts. eri puolilla maapalloa olevien teleskooppien paikka toistensa suhteen pystytään määrittämään cm-tarkkuudella.

Koska VLBI:n kulmaerotuskyky on suuri, voidaan maapallon asento ja asennon muutokset havaita erittäin tarkasti. Siksi VLBI:tä käytetään Maan pyörimisliikkeessä ja navan paikassa tapahtuvien muutosten sekä Kuun aiheuttaman nutaation seurantaan. VLBI on riippumaton satelliittien radoista ja ratojen muutoksista, sekä Maan painovoimakentästä ja massakeskipisteen paikasta. Kvasaarit tarjoavat satelliiteista riippumattoman kiintopisteverkon, eikä VLBI-havaintoja voi tulevaisuudessa korvata millään satelliitteihin perustuvalla menetelmällä.



**Kuva 3.** IVS:n havaintoverkko vuoden 2004 alussa (IVS 2004).

VLBI-havaintojen koordinaattorina toimii Kansainvälinen VLBI-palvelu, IVS. Sen tehtävänä on tarjota palvelua sekä havaitsijoille että datan käyttäjille ja edistää geodeettisen VLBI-tekniikan käyttöä (kuva 3, taulukko 1). Melko ilmeistä kuitenkin lienee, ettei VLBI ole eikä siitä tule geodeetin tai maanmittarin yleistyökälyä; jo yksinomaan laitteiston koko ja hinta pitävät siitä tehokkaasti huolen.

#### 4 Koordinaatistot ja VLBI

VLBI on mukana kaikissa nykyisissä globaalien koordinaattijärjestelmien realisaatioissa. Emme voi kiinnittää sen paremmin Maahan kuin satelliitteihinkaan koordinaatistoa, joka olisi luotettavasti ja tarkasti rekonstruoitavissa myös haassa tulevaisuudessa. Maan pinnalla mannerlaatat liikkuvat toistensa suhteen, maapallon asento, pyörimisakselin navan paikka ja satelliittien radat muuttuvat jatkuvasti. Jos havainnot perustuisivat pelkästään satelliitteihin, ei meillä olisi keinoa erottaa mikä osa havaitusta muutoksesta johtuu havaintopisteen liikkeestä tai Maan asennon muutoksista, mikä osa satelliittiratojen muutoksista.

Koordinaatiston origolla ei geodeettisissa VLBI-havainnoissa sen sijaan ole merkitystä. Siksi satelliittilaseria tarvitaan koordinaatiston origon eli Maan massakeskipisteen realisointiin.

**Taulukko 1.** IVS:n määrittämät parametrit ja niiden tarkkuus. Lyhenne mas tarkoittaa millikaarisekuntia ja  $\mu\text{as}$  mikrokaarisekuntia. (IVS 2004)

Suure	Spesifi- kaatio	Tilanne 2004	Tavoite
Napavariaatio $x_p, y_p$	tarkkuus viive erotuskyky	$x_p \sim 100\mu\text{as}, y_p \sim 200\mu\text{as}$ 1 – 4 viikkoa – 4 kk 1 vrk	$x_p, y_p: 50 \mu\text{as} - 25 \mu\text{as}$ 4 – 3 vrk – 1 vrk 1 vrk – 1 h – 10 min
Aika UT1	tarkkuus viive erotuskyky	$5\mu\text{s} - 20 \mu\text{s}$ 1 viikko 1 vrk	$3\mu\text{s} - 2\mu\text{s}$ 4 – 3 vrk – 1 vrk 1 vrk – 10 min
Nutaatiotermit $\Delta\epsilon, \Delta\psi$	tarkkuus viive erotuskyky	$100 \mu\text{as} - 400 \mu\text{as}$ 1 – 4 viikkoa – 4 kk 1 vrk	$50 \mu\text{as} - 25 \mu\text{as}$ 4 – 3 vrk – 1 vrk 1 vrk
Maahan kiinnitetty koordinaatisto	tarkkuus	$5 \text{ mm} - 20 \text{ mm}$	$5 \text{ mm} - 2 \text{ mm}$
Tähtitieteellinen koordinaatisto	tarkkuus viive	$0,25 \text{ mas} - 3 \text{ mas}$ 3 – 6 kk	$0,25 \text{ mas}$ 3 kk – 1 kk

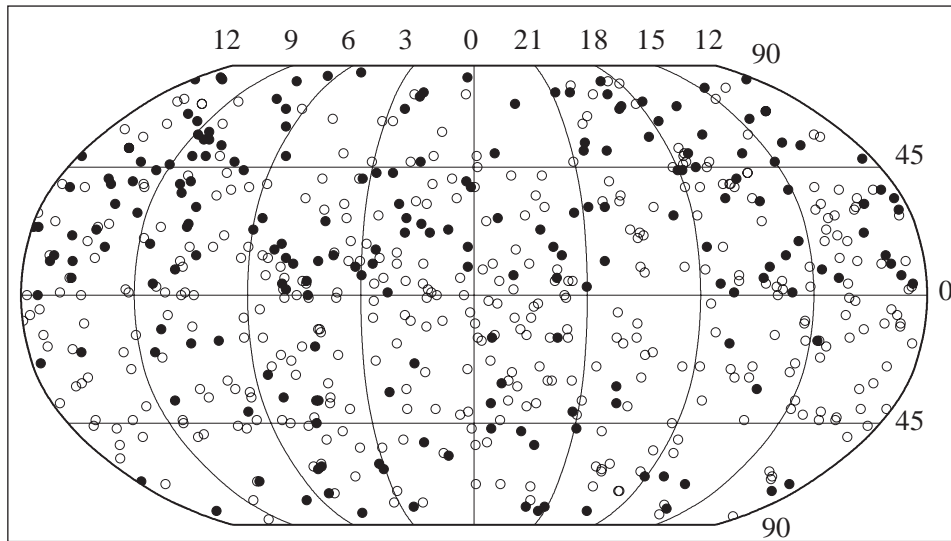
Vuonna 1991 Kansainvälinen tähtitieteellinen unioni IAU (International Astronomical Union) päätti yleiskokouksessaan uudistaa tähtitieteellisen koordinaatiston määrittelyyn. Syynä oli se, että käytössä ollut realisaatio, optisiin havaintoihin perustuva FK5-tähtiluettelo ei tarkkuudeltaan enää vastannut uusimpien havaintojen vaatimuksia. Uusi järjestelmä otettiin käyttöön vuoden 1998 alussa.

ICRS (International Celestial Reference System) on kinemaattinen, ts. se perustuu VLBI:n avulla mitattuihin kvasaarien paikkoihin. Aiempi FK5-määritelmä oli dynaaminen, ts. se perustui annettuna epookkina Maan ekvaattorin ja eklipti-

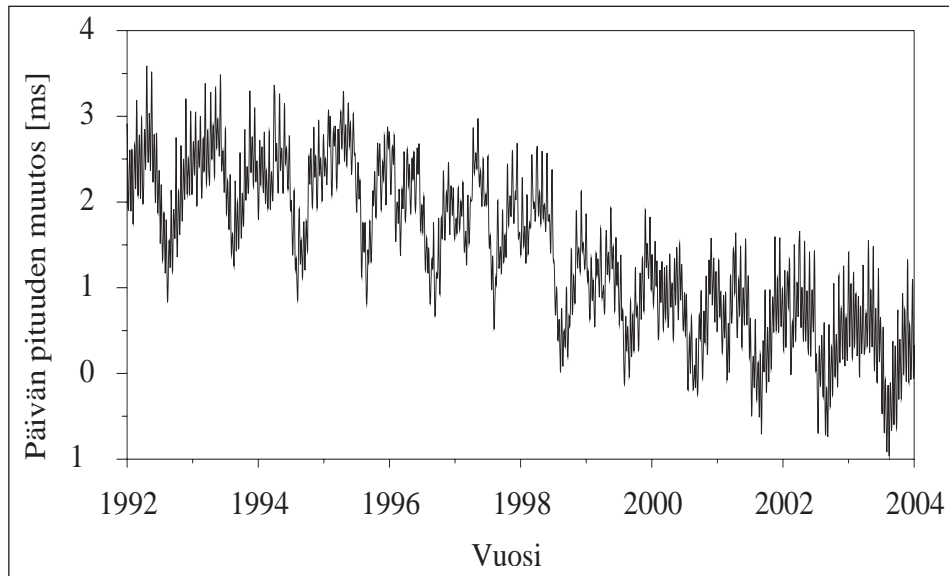
kan asentoon ja näiden leikkauspisteen, kevättasauspisteen, suuntaan. Uuden järjestelmän etuna on se, että se on kvasaarien kautta ajasta ja paikasta riippumaton. Järjestelmän origo on joko aurinkokunnan barysentrissä (massakeskipisteessä) tai Maan massakeskipisteessä. Jälkimmäinen soveltuu luonnollisesti Maata kiertävien satelliittien liikkeen kuvaamiseen.

Nykyisin IAG:n palveluna toimiva International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS ylläpitää ICRS:n realisaation ICRF:n (International Celestial Reference Frame) 667 kohteen primääriluetteloa (kuva 4). ICRF on Maan vuorokautisesta pyörimisliikkeestä ja navan suunnan vaihteluista riippumaton, ja soveltuu siksi satelliittien rataliikkeiden laskemiseen.

VLBI on linkki GPS-satelliittien ja maanmittarin välillä, vaikka käytännön mittaaja ei sitä välttämättä huomaakaan. Päästäksemme ICRF:stä Maahan sidottuun koordinaatistoon, jossa kaikki geodeettiset mittaukset suoritetaan, on tunnettava prekessio- ja nutaatiotermit, napavariaatio ja maapallon pyörimisnopeudessa tapahtuvat muutokset. Yhteisellä nimellä näitä kutsutaan Maan asennon parametreiksi, EOP (Earth Orientation Parameters). Ne määritetään pääosin geodeettisten VLBI-havaintojen avulla. IERS koordinoi parametrien laskemisen ja jakelun (kuva 5).



**Kuva 4.** ICRS:n määrittelevät ekstragalaktiset kohteet (212 täytettyä ympyrää) ja muut ICRF-realisaatiossa käytetyt kohteet (avoimet ympyrät). Vaaka-akselilla rektaskensio, pystyakselilla deklinaatio.



**Kuva 5.** Vuorokauden pituuden muuttuminen. Vuotuinen vaihtelu on 1–2 millisekuntia ja pitempiaikaiset muutokset useita millisekunteja. Maan asennon ja pyörimisliikkeen muutoksia seurataan VLBI-havaintojen avulla (lähde US Naval Observatory, USNO 2004).

IERS ylläpitää myös Maahan kiinnitettyä globaalia koordinaattijärjestelmää, ITRS (International Terrestrial Reference System), ja sen realisaatiota ITRF (International Terrestrial Reference Frame). ITRS on määritelty Kansainvälisen Geodeettis-Geofysikaalisen Unionin, IUGG yleiskokouksessa Wienissä 1991 (McCarthy ja Petit 2004).

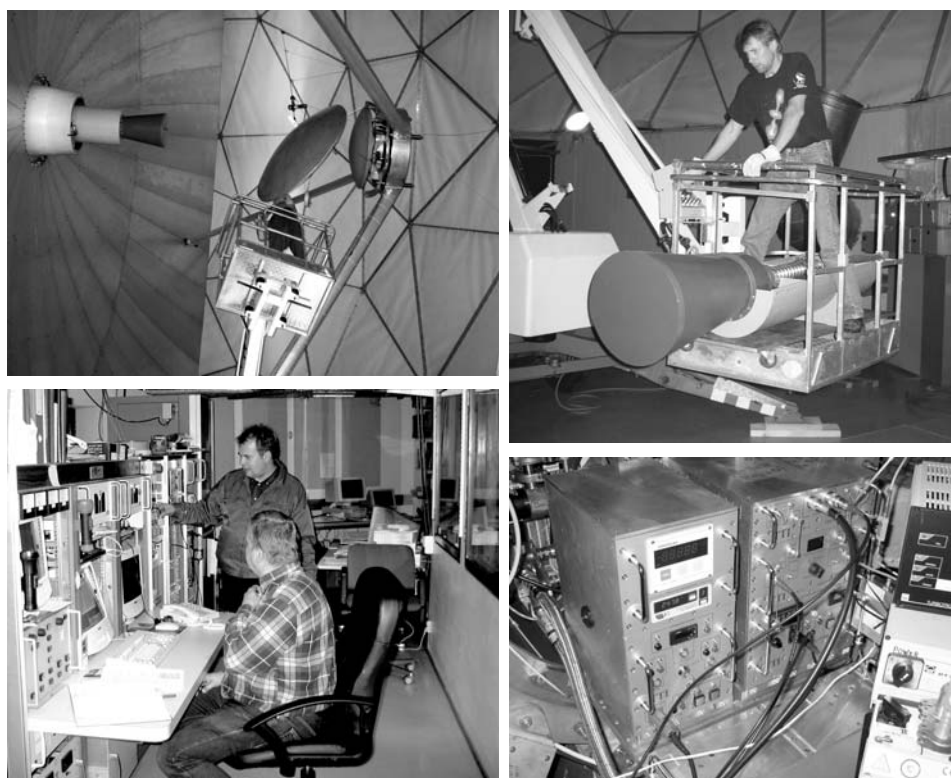
Aiemmin lähes vuosittain, nykyisin muutaman vuoden välein julkaistava realisaatio, ITRF perustuu satelliittilaser-, kuulaser-, DORIS- ja VLBI-, sekä myös globaalin GPS-verkon havaintoihin. Uusin realisaatio on ITRF2000. Se perustuu eri tutkimusryhmien tekemiin laskuihin, jotka yhdistetään IERS:ssä. Riippumattomien ratkaisujen ja havaintosarjojen käytöllä pyritään pienentämään satunnaisia ja systemaattisia virheitä.

ITRF2000 on globaalissa skaalassa tarkin globaaleista koordinaatistorealisatioista, ja sitä käytetään nykyään lähes yksinomaan, kun koordinaatteja tarvitaan tutkimuskäytössä. Suomalaisista pisteistä ITRF:n laskennassa ovat Geodeettisen laitoksen Metsähovin tutkimusaseman satelliittilaser, GPS, sekä Metsähovi/Sjökullassa olevat VLBI- ja DORIS-pisteet, sekä Suomen pysyvän GPS-verkon, FinnRef:in Sodankylän, Vaasan ja Joensuun asemat. Tulevaisuudessa myös Metsähovin VLBI-piste on mukana näissä laskuissa.

Ensimmäinen geodeettinen VLBI-yritys tehtiin jo vuonna 1980-81, jolloin Metsähovin teleskooppi oli mukana kuuden eurooppalaisen aseman kampanjassa (Beyer ym. 1982). Vuonna 1988, eurooppalaisen koordinaatiston syntyvaiheessa Eurooppaan mitattiin 12 pistettä käsittävä VLBI-verkko. Metsähovista 3 km pääs-

sä olevalle Sjököllan koekentälle perustettiin piste, jonne kahdella rekka-autolla tuotiin siirrettävä VLBI-laitteisto. Mitattu 12 pisteen verkko toimi EUREF-koordinaatiston runkona. Kun 90 pisteen tihennys seuraavana vuonna mitattiin GPS:n avulla, tasoitettiin havainnot pitäen VLBI-pisteitä kiinteinä, joten VLBI-havainnoista saatiin verkon orientointi ja mittakaava.

Vaikka uudemmassa ETRS89-järjestelmässä ja sen kansallisissa realisatioissa, kuten Suomen uudessa EUREF-FIN -koordinaatistossa on muodollisesti luovuttu vanhoista VLBI-havainnoista, on VLBI kuitenkin implisiittisesti mukana myös Suomen uudessa koordinaatistossa. Ainakin välillisesti tämä tapahtuu ITRF-verkon kautta, johon olemme eurooppalaisen pysyvän GPS-verkon kautta sidotut.



**Kuva 6.** Metsähovin geodeettiset VLBI-mittaukset syyskuussa 2004. Ylhäällä vasemmalla Henry Rönnberg asentaa mittauksessa käytettävää suurempaa apupeiliä. Vastaanottimen syöttötorvi näkyy antennin keskellä kuvan vasemmassa reunassa. Ylhäällä oikealla Erkki Oinaskallio on juuri lähdessä nostamaan syöttötorvea ylös antenniin. Vasemmalla alhaalla Jukka Piironen (edessä) ja Ari Mujunen tutkivat vastaanottimen tilaa ja testiarvoja ennen havaintojen aloittamista. Oikeassa alakuvassa näkyy heliumjäähdytteisen vastaanottimen etupaneeli. Vastaanotin, siihen kytketty syöttötorvi ja apupeili nostetaan ylös antenniin noin vuorokautta ennen mittauksen alkua, jotta vastaanotin ehtii jäähtyä ja stabiloitua. (Kuvat: M. Poutanen)

## 5 Metsähovin VLBI-laitteisto

Metsähovin VLBI-havainnot tehdään espanjalaisen TTI-firman rakentamalla vastaanottimella. Se on kopio espanjalaisen Yebesin radioteleskoopin vastaavasta. Vastaanotin nostetaan pari päivää ennen havaintokampanjan alkua Teknillisen korkeakoulun Metsähovin radiotutkimusaseman 13,7 metrisen radioteleskoopin fokukseen. Vastaanotin sijaitsee antennin keskellä noin 10 metrin korkeudessa, jonne se nostetaan korinosturin avulla (kuva 6). Nostaminen ei ole ihan ongelmantonta, koska vastaanotin painaa yhteensä yli sata kilogrammaa. Sen vuoksi se on paloitettu kahteen osaan, jotka liitetään taas yhteen noston jälkeen. Itse havaintojen aikana antennin vastaanottimien tila on miehittämätön.

Vahvistin toimii X- (8 MHz) ja S-kaistoilla (2 MHz), joka on noin kerta-luokkaa pienempi taajuusalue, kuin mitä on yleensä Metsähovissa käytössä. Siksi teleskoopin apupeili on korvattava suuremmalla. Myös parimetrisen apupeili hinataan ylös ennen havaintojen alkua ja poistetaan mittausten päätyttyä.

Havaintokaistoilla on useita taajuuksia, joita havaitaan yhtäaikaaisesti. Jotta kohina pysyisi mahdollisimman pienenä, jäähdytetään vastaanottimen ilmaisin 13 asteeseen absoluuttisen nolapisteen yläpuolelle nestemäisen heliumin avulla. Ironista kyllä, vastaanotettuun signaaliin sekoitetaan keinotekoisia kohinaa kalibroinnin vuoksi. Lisäksi vetymaser-kellosta ympäriin 5 MHz:in aikaisignaali havaintoihin. Sen avulla saadaan vaadittava aikatarkkuus havaintoihin. Tämän jälkeen kokonaissignaali vietään kaapeleilla amerikkalaiseen Field System -moduuleihin, jossa signaalista muokataan nauhoitettavaksi kelpavaa dataa.

Data nauhoitetaan toistaiseksi vanhalla kelavideonauhurilla, koska sen kapasiteetti riittää yhden kokonaisen vuorokauden havaintojen tallentamiseen. Havaintokampanjat kestävätkin yleensä 24 tuntia. Tällä hetkellä on VLBI:n suhteen tapahtumassa merkittävä kehitysaskel, koska kiintolevyt alkavat kapasiteettinsa suhteen olla riittävän suuria. Ensimmäinen nauhan korvaava standardi Mark V onkin käytössä jo useilla radioteleskoopeilla. Tallennusjärjestelmä koostuu toisiinsa kytketyistä vaihdettavista kiintolevyistä, joilla saavutetaan yli teratavun kapasiteetti. Tuolloin nauhoihin liittyvät epävarmuudet ja vikaantumisvaara poistuvat.

Havainto-ohjelma on valmiiksi ohjelmoitu ja teleskooppi sekä nauhoitus toimivat automaattisesti, joten paikan päällä on ainoastaan yksi henkilö valvomassa, että laitteet ja nauhoitus toimivat ongelmitta. Ohjelman aikana radioteleskooppi havaitsee muutamaa kymmentä kvasaaria useaan kertaan päivässä. Myös muut ohjelmaan kuuluvat radioteleskoopit havaitsevat samoja kohteita samaan aikaan. Usein jopa yli kymmenen radioteleskoopeja on yhtä aikaa ohjelmassa mukana (taulukot 2 ja 3).

Mittausten päätyttyä havaintoasemat lähettävät nauhat korrelaatiokeskukseen. Tulokset saadaan yleensä kahden viikon sisällä. Metsähovi osallistuu projekteihin, joissa nauhat lähetetään Bonnissa sijaitsevaan korrelaatiokeskukseen. Korreloinnissa eri asemien havainnot yhdistetään ja niistä erotetaan interferenssit.

Interferenssien kohdasta voidaan päätellä kuinka paljon havainnot samasta kohteesta eroavat ajallisesti eli kaavan suure  $\tau(t)$ . Virhelähteet otetaan huomioon ja lopulta pistemäisten kvasaarien havainnoista pystytään laskemaan havaintoon liittyvien asemien välimatka 1-2 senttimetrin tarkkuudella. Kun havaintoja suoritetaan useita kertoja vuodessa usean vuoden ajan, niistä pystytään näkemään mm. mannerten liikunta toisiinsa nähden sekä maapallon asentoon ja pyörimiseen liittyvää tietoa.

**Taulukko 2.** Esimerkki IVS:n havaintoaikataulusta syyskuulta 2004. Metsähovi on mukana EUROPE-73 -kampanjassa (koodi Mh). Korrelaattori tarkoittaa paikkaa jossa datat prosessoidaan. (IVS 2004)

Kampanja	Päivämäärä	Aloitusaika UT	Kesto [h]	Mukana olevat asemat	Korrelaattori
IVS-R4137	SEP02	18:30	24	ApFtGcNySvWz	WASH
IVS-CRDS13	SEP06	12:00	24	HhHo	WASH
EUROPE-73	SEP06	12:00	24	65McMhNtNyOnSvWzYb	BONN
IVS-R1139	SEP07	17:00	24	GcNyOnTsWfWz	BONN
IVS-E3032	SEP08	18:00	24	ApSsSvYk	PENT
IVS-R4138	SEP09	18:30	24	ApFtNySvWz	WASH
IVS-R1140	SEP13	17:00	24	GcHhOnShWfWz	WASH
JADE-0409	SEP14	02:00	24	AiCcS3Ts	GSI
IVS-T2033	SEP14	17:30	24	FtGcGgNyOnSmSvUrWfWzYbYk	BONN
APSG-14	SEP15	18:00	24	GcHoKkShTsUr	WASH
IVS-R4139	SEP16	18:30	24	ApFtGcNySvWz	WASH
IVS-R1141	SEP20	17:00	24	GcHhShWfWz	BONN
IVS-R&D-7	SEP22	18:00	24	ApGcWfWz	HAYS
IVS-R4140	SEP23	18:30	24	ApFtNySvWz	WASH
IVS-R1142	SEP27	17:00	24	GcHhMcShWfWz	BONN
APSG-15	SEP29	18:00	24	GcHoKkShTsUr	WASH
IVS-R4141	SEP30	18:30	24	ApFtGcKkNySvWz	WASH

**Taulukko 3.** Esimerkki EUROPE-73:n havaintoaikataulusta. Yksittäistä kvasaaria (sarake "Source") havaitaan keskimäärin muutaman minuutin ajan (sarake "Dur").

Scan date = 2004SEP06 DOY = 250	Line #	Source	Az	El	Cable	Start Record	Start Data	Stop Data	Dur
250-1200	7	0552+398	302	28	CW	11:59:50	12:00:00	12:01:56	1:56
250-1215	27	0014+813	3	52	CW	12:15:11	12:15:21	12:18:41	3:20
250-1225	46	4C39.25	264	50	NEUTR	12:25:39	12:25:49	12:26:29	0:40
250-1230	64	1611+343	111	51	NEUTR	12:30:13	12:30:23	12:31:42	1:19
250-1233	82	1749+096	104	19	NEUTR	12:32:56	12:33:06	12:36:26	3:20
250-1242	100	1334-127	177	17	NEUTR	12:42:17	12:42:27	12:45:04	2:37
250-1246	118	1308+326	189	62	NEUTR	12:46:16	12:46:26	12:49:46	3:20
250-1252	136	1741-038	117	10	NEUTR	12:52:25	12:52:35	12:53:15	0:40
250-1312	154	OJ287	268	25	NEUTR	13:12:25	13:12:35	13:15:55	3:20
250-1317	172	0552+398	316	21	CW	13:16:54	13:17:04	13:18:26	1:22
250-1327	190	0014+813	7	52	CW	13:26:50	13:27:00	13:30:20	3:20
250-1340	208	1611+343	133	59	NEUTR	13:40:00	13:40:10	13:41:28	1:18
250-1342	226	1923+210	92	26	NEUTR	13:42:48	13:42:58	13:46:18	3:20
250-1359	244	1334-127	197	16	NEUTR	13:58:56	13:59:06	14:01:42	2:36

## 6 Yhteenveto

Geodeettinen VLBI on korvaamaton kaikkein perustavinta laatua olevana mittausmenetelmänä. Nyt Metsähovissa aloitetut geodeettiset VLBI-mittaukset tuovat merkittävän lisän Geodeettisen laitoksen toimintaan ja vahvistavat Metsähovin asemaa kansainvälisenä mittausasemana. Metsähovissa ovat käytössä kaikki merkittävät nykyiset havaintomenetelmät, sillä VLBI:n ja GPS:n ohella siellä on myös satelliittilaser (SLR), DORIS (Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite), GLONASS ja suprajohtava gravimetri. Lisäksi Metsähovissa on Suomen painovoiman peruspiste, absoluuttigravimetriä kansainvälinen vertauspaikka, fotogrammetrinen testikenttä, vaaituksen testikenttä ja Helsingin yliopiston seismologian laitoksen seismometri.

**Viiteluettelo**

Beyer, W., J. Campbell, F.J. Lohmar, H. Seeger, A. Sundau, F. Brouwer, G.J. Husti, G. Lundqvist, B.O. Rönnäng, R.T. Schilizzi, R.S. Booth, P. Richards and S. Tallqvist (1982). Project ERIDOC (European Radiointerferometry and Doppler Campaign). Proc. Symp. No. 5: Geodetic Applications of Radio Interferometry. IAG, Tokyo, Japan, May 7-8, 1982. NOAA Technical Report NOS95, NGS24, p. 105-119.

IVS (2004). International VLBI Service for geodesy and astrometry, verkkosivut, <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/>

Karttunen H., K.-J. Donner, P. Kröger, H. Oja ja M. Poutanen (2003). Tähtitieteen perusteet. 4. laitos. Ursa, Helsinki.

McCarthy, D.D. and G. Petit (Ed., 2004). IERS Conventions (2003). IERS technical note 32. Central Bureau of IERS – Observatoire de Paris. <http://www.iers.org>

USNO (2004): US Naval Observatory, verkkosivut, <http://maya.usno.navy.mil/>