



Alappontok az égen

Dr. Frey Sándor

Földmérési és Távérzékelési Intézet,

Kozmikus Geodéziai Observatórium

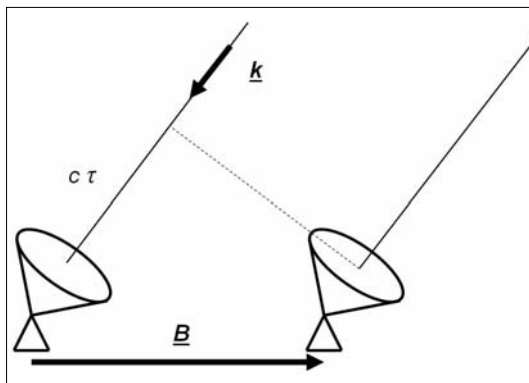
MTA-BME-FÖMI Fizikai Geodéziai és Geodinamikai Kutatócsoport

A csillagászok számára a nagyon hosszú bázisonalú rádió-interferometria (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) egy olyan megfigyelési technika, amelynek segítségével rendkívül nagy szögfelbontással tanulmányozhatják az égbolt kompakt rádiósugárzó égitestjeinek szerkezetét. A geodéziával és más földtudományokkal foglalkozók számára a VLBI mást jelent: gyakorlatilag az egyetlen eszközt, amellyel a Föld bolygó mozgása kellő pontossággal követhető az inercia-rendszerben. A technika e két alkalmazása mégis számos ponton kapcsolódik egymáshoz. Ebben a cikkben azt járjuk körül, hogy milyen „alappontok” definiálják az égi vonatkoztatási rendszert, napjainkban hogyan igyekeznek tovább javítani a rendszer pontosságán, s milyen fejlődés várható az elkövetkezendő egy-két évtizedben.

A VLBI geodéziai alkalmazásával, annak jelentőségével a kezdetektől fogva a Geodézia és Kartográfia szaklap olvasói is megismerkedhettek (pl. Halmos 1974; Fejes 1986). Mivel ezek az összefoglaló írások meglehetősen régen jelentek meg, célszerűnek tűnik röviden áttekinteni a technika működésének lényegét.

Hogyan működik a VLBI?

A Föld felszínén egymástól messze, akár interkontinentális távolságokban levő rádióteleszkópokat egy időben ugyanarra az égi rádióforrásra irányítanak. A távoli égitestekről beérkező rádióhullámokat detektálják. Mivel a valós idejű összeköttetés az antennák nagy távolsága miatt általában nem kivitelezhető, a digitalizált méréseket – természetesen a helyi atomórák pontos időjelével együtt – mágneses adathordozóra rögzítik. Az interferenciát utólag, a mérések visszajátszásával állítják elő a korrelátorban. Fontos megjegyezni, hogy napjainkban a szélessávú adattovábbítás robbanásszerű fejlődése lehetővé tette, hogy több ezer kilométerre, akár más-más földrészeken levő antennákat közvetlenül összekössenek. Így az adatokat rögzítésük nélkül is fel lehet dolgozni.



1. ábra VLBI kísérlet vázlatos ábrázolása.

A gyakorlatilag végtelen távoból, a \mathbf{k} egységvektorral jellemzett irányból érkező párhuzamos hullámfrontok a \mathbf{B} bázisvonal-vektort kijelölő antenna-pár tagjait τ időkésséssel érik el. Első közelítésben $\tau = -\mathbf{k} \cdot \mathbf{B} / c$, ahol c a fény terjedési sebessége. A gyakorlatban a VLBI hálózatok több antennával és bázisvonallal működnek.

Néhány éven belül minden bizonnyal széles körben, rutinszerűen elterjed a valós idejű VLBI mérési módszer, amely a geodéziai VLBI közösségnek a 2010-es évtizedre felvázolt stratégiai céljai (Niell et al. 2005) közt is szerepel.

Ugyanaz a hullámfront más-más időpontban érkezik a különböző antennákhoz (1. ábra). A geodéziai VLBI alapvető mérési adata ez az időkésség. Mielőtt a távoli égitestből indult rádiósugárzás elérné az első antennát, már keresztülhaladt a galaxisközi és csillagközi téren, valamint a Föld légkörén is. Ennek során az elektromágneses és gravitációs terek hatottak rá. Miközben a jel eléri a következő antennát, a Föld mozgása is befolyásolja a beérkezési idejét. Mindezeket a hatásokat is figyelembe kell venni akkor, amikor a méréseket értelmezzük. Első geometriai közelítésben egy bázisonal az időkésség függ a rádióforrás térbeli irányától és az antenna-párokat összekötő vektor irányától és nagyságától. A mért adatok információtartalmát, a belőlük

meghatározható paramétereket és azok pontosságát nagyban meghatározza a kísérlet megtervezése. A geodéziai célú VLBI észlelések során általában törekszenek arra, hogy minél rövidebb időközönként minél több térbeli irányba végezzenek méréseket. A feldolgozás során becsülhető paraméterek között található antennafüggő (pozíció, óraparaméterek, troposzférikus késés) és globális (a Föld forgása, a rádióforrások égi koordinátái) mennyiségek is. Maga a VLBI mérési módszer, illetve a pontos eredmények mögött álló modellek a modern fizika meglepően széles skáláját fedik le, a légköri hullámterjedés leírásától kezdve a tektonikus és árapálymozgásokon át az általános és speciális relativitás elméletéig (Sovers et al. 1998). A VLBI pontosságára napjainkban a Föld felszínén a centiméteresnél jobb helymeghatározás, az égen az ívmásodperc ezredrészénél (másképpen a nanoradiánál) is pontosabb relatív szögtávolság-mérés a jellemző. Erdemes itt azt is megemlíteni, hogy a VLBI és a rádiós műholdas helymeghatározás (GPS) között számos közös pont fedezhető fel, gondoljunk csak az időmérés szerepére, vagy az ionoszférikus és troposzférikus hullámterjedésre.

Mivel az égitestekről érkező rádiósugárzás igen gyenge, észlelésükre nagy gyűjtőfelületű antennákat kell alkalmazni. A Földön (történelmi okokból túlnyomórészt az északi féltekén) több tucat ilyen, jellemzően 20–100 m átmérőjű VLBI antenna épült. Körülbelül ugyanilyen számban telepítettek már rövidebb-hosszabb ideig működő, valamint kisebb méretű, mobil antennákat.

Az 1990-es évek elejétől kezdve a nemzetközi geodéziai közösség nagy energiát fektetett a globális, permanensen üzemelő műholdas helymeghatározó földi állomáshálózat kiépítésébe, a mai nevén Nemzetközi GNSS Szolgálat (International GNSS Service, IGS) létrehozásába – fényes eredménnyel! Manapság a globális műholdas helymeghatározó rendszerek (GPS, GLONASS) sokkal sűrűbb hálózattal rendelkeznek, s pontosságban egyáltalán nem maradnak el a klasszikus űrgeodéziai technikát képviselő VLBI-től. Egy GPS állomás kiépítése nagyságrendekkel kevesebbe kerül egy VLBI antenna megépítésénél, s az üzemeltetés nagyfokú automatizálásának lehetősége segít a minél egyenletesebb globális hálózati lefedettség elérésében is.

Felmerülhet a kérdés, hogy szükség van-e egyáltalán a továbbiakban VLBI mérésekre? A válasz egyértelműen igen. Ennek alátámasztására egy dolgot mindenképpen érdemes kiemelni.

A műholdas helymeghatározó rendszerek esetén a földi pontmeghatározásokhoz a külső referenciát a műholdak szolgáltatják. Ezek a Föld gravitációs terében, ugyanakkor számos nehezen modellezhető, nem-gravitációs eredetű erőhatásnak is kitéve mozognak. GPS-mérésekkel *rövid* (néhány napos vagy hetes) időtávon rendkívül pontosan meg tudjuk határozni a Föld forgási szögsebességében vagy a forgástengely irányában (precesszió, nutáció) bekövetkező változásokat. De ennél hosszabb távon nem kerülhetjük el, hogy e mozgásokat egy külső inerciarendszerben írjuk le. Erre pedig jelenleg *csak* a VLBI képes, mivel a távoli extragalaktikus rádióforrások jelölik ki azt a vonatkoztatási rendszert, amely a legjobb közelítéssel inerciarendszernek tekinthető (pl. Campbell 2004).

Égi alappontjaink

Eljutottunk tehát a rádió-interferometriás mérések mögött álló „alaphálózathoz”. Az 1960-as évek elején felfedezett kvazárokról mára tudjuk, hogy távoli – akár több milliárd fényévre levő – galaxisok magjában található. Hatalmas teljesítménnyel sugároznak, energiájukat a galaxis közepén levő több millió vagy milliárd naptömeggel egyenértékű fekete lyukak környezetéből nyerik. A fekete lyukba folyamatosan behulló tömeg egy része a rendszer forgástengelye mentén relativisztikus sebességgel kidobódik. Az így létrejövő anyagsugarakban (*jet*ekben) elektromosan töltött részecskék mozognak a fényét megközelítő sebességgel, erős mágneses térben. A rádiótávcsöveinkkel az általuk kibocsátott szinkrotron-sugárzást fogjuk fel.

A rádiósugárzó aktív galaxismagok (kvazárok) ideálisnak tűnnek egy égi vonatkoztatási rendszer kijelöléséhez. Egyrészt rendkívül távol vannak, ezért sajátmozgásuk az égen tőlünk nézve elhanyagolhatóan kicsi. Általában nagyon kis szögkiterjedésűek, emiatt még a legjobb felbontást nyújtó VLBI hálózatokkal is sokszor (de nem mindig!) pontszerűnek látszanak. Hosszú évek kutatómunkájának eredményeképpen a Nemzetközi Csillagászati Unió (IAU) 1997-ben a kvazárok rádióartományban mért pozícióival definiált nemzetközi égi referencia-rendszert (International Celestial Reference Frame, ICRF) választotta fundamentális égi rendszernek, felváltva ezzel a korábban a csillagoknak a fény látható tartományában, optikai úton mért pozícióin alapuló rendszert. A definíció következtében a koordi-

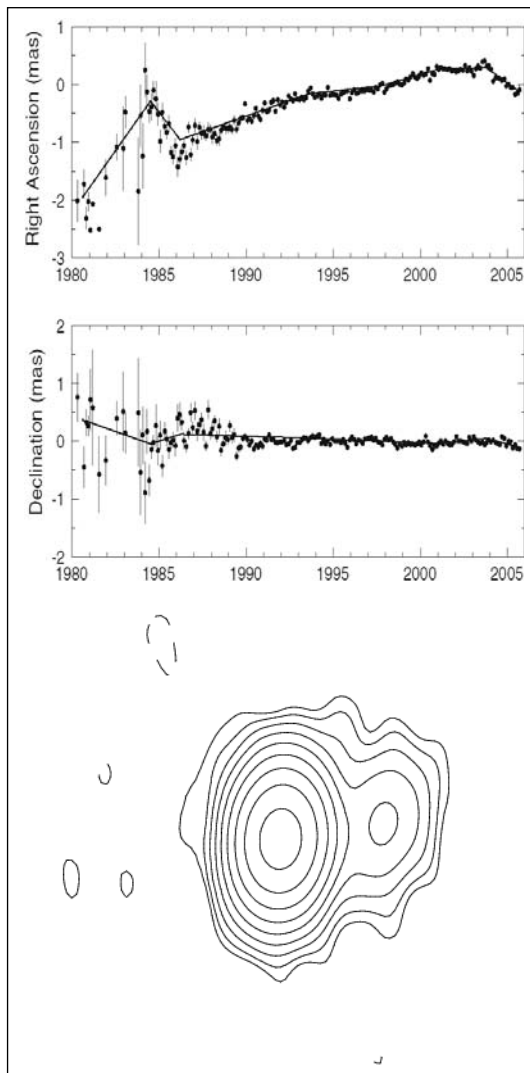
náta-tengelyek többé formálisan már nem kötődnek az égi egyenlítő és az ekliptika síkjához, hanem 212 darab VLBI technikával mért kvazár és rádiógalaxis nemzetközileg egyezményesen rögzített koordinátaíhoz (Ma et al. 1998). Ezeket természetesen úgy határozták meg, hogy minél zökkenőmentesebb legyen az átmenet a történelmileg megszokott égi vonatkoztatási rendszerből az újonnan definiáltba.

Az ICRF definícióját húsz évnél is hosszabb, 2,3 és 8,4 GHz-es frekvenciákon végzett VLBI megfigyelés-sorozat előzte meg. (Az alacsonyabb frekvenciára azért van szükség, hogy a diszperzív földi ionoszféra frekvenciafüggő késleltető hatását figyelembe lehessen venni; ugyanilyen elven működik a kétfrekvenciás GPS mérés.) Az elmúlt évtizedben nyilvánvalóvá vált, hogy a rendszer javításra, további finomításra szorul. Ezért időszerű az ICRF újradefiniálása.

Küszöbön álló változások

Mi(k) is a gond(ok) az égi hálózatunkkal? A szemléletes magyarázathoz természetesen kínálják magukat a földi analógiák. Először is kiderülhet, hogy az „állandósításkor” nem a legjobb pontokat választottuk, azok pozíciója nem eléggé stabil. A kvazárok esetén ez akkor fordul elő, ha ezred-ívmásodperces szögskálán a szerkezetük komplex, ráadásul néhány év leforgása alatt is jelentősen változik. Márpedig ez gyakran gesik! Ilyenkor a fényességeloszlás maximumának helye, amely referenciapontként szolgál az égen, észrevehető mértékben elmozdulhat (2. ábra). Az ICRF-et definiáló objektumok kiválasztásánál annak idején elsődleges szempont volt a hosszú időt felölelő, gazdag mérési adatsor. Csakhogy e feltétel jellemzően a legfényesebb (legerősebben rádiósugárzó) kvazároknál teljesült, ezek ugyanakkor gyakran mutatnak jelentős szerkezeti változtatásokat (MacMillan & Ma 2007). Ezért ma már nem is mindig választanánk ezeket „fix pontnak”.

Egy másik probléma, hogy a hálózat sűrítésére szorulna. A gyakorlati munkát (más égitestek pontos pozíciójának meghatározását) nehezíti, hogy egy véletlenszerűen kiválasztott égi ponttól akár igen messze, az északi égbolton legfeljebb 13° , a délin 15° szögtávolságban adott esetben nem találunk egyetlen ICRF forrást sem. A VLBI technika ugyanakkor alkalmas arra, hogy jellemzően legfeljebb 2–3°-os távolságban levő rádiósugárzó objektumok relatív helyzetét igen precízen,



2. ábra A 4C39.25 (J0927+3902) jelű kvazár egyenlítői koordinátáinak – rektaszenciójának (fent) és deklinációjának (középen) – változása 1980 és 2006 között (MacMillan & Ma 2007).

A pontok 45 napos átlagértékeket jelölnek.

A grafikonokon a technika pontosságának javulása is jól nyomon követhető. Az alsó ábrán, egy 2004. februárjában készült 8 GHz-es VLBI kontúrtérkép kivágásán látható, hogy a kvazár nagyfelbontású rádiószerkezete a rektaszenció irányában (vízszintesen) kiterjedt. Az időben változó fényességű komponensek szögtávolsága itt kb. 2 ezred-ívmásodperc (mas). A kép az USA Haditengerészeti Observatóriumában (US Naval Observatory, USNO) fenntartott, nyilvánosan elérhető adatbázisból származik (<http://rorf.usno.navy.mil/RRFID/>).

ezred-ívmásodpercen belüli pontossággal meghatározza. Az ún. fázisviszonyítás technikájának lényege, hogy a VLBI hálózattal egy kalibrátor forrást és egy célforrást rövid (a légköri koherenciadön belüli) időközönként felváltva észlelünk. A légköri és műszeres eredetű hibák közel azonosak, ezért a feldolgozás során lényegében kiejtethetők. Így a gyakran sokkal halványabb célforrás relatív helyzetét meg tudjuk határozni. Szerkezetének feltérképezésére is mód nyílik, hiszen akár milyen hosszú időt eltölthetünk megfigyelésével: a VLBI hálózat érzékenysége így elvben tetszőlegesen mértékben javítható. A módszer alkalmas arra is, hogy egy-egy ismert, pontos ICRF koordinátákkal rendelkező kalibrátor közvetlen égi környezetét felmérjük, s így ott a hálózatunkat lokálisan sűrítjük (Mosoni et al. 2006; Frey et al. 2007). Általában elmondhatjuk, hogy az égbolt egy 2°-os sugarú tartományában kb. 10 kompakt, VLBI technikával detektálható – a „szokásosnál” 1–2 nagyságrenddel halványabb – aktív galaxismagot találunk.

Az ICRF sűrítésére – ezen belül külön a déli égbolton, ahol a VLBI megfigyelések feltételei nehezebbek – számos sikeres program indult (ld. Fey & Gaume 2006, valamint az ottani hivatkozások). Ma több mint 3000 olyan aktív galaxismag listája érhető el, amelyeknek a koordinátáit ezred-ívmásodperces vagy jobb pontossággal ismerjük (Petrov 2007). Az ICRF forrásokról folyamatosan gyűlő adatok értéke az, hogy egy vagy több időpontban a rádióforrások szerkezetére vonatkozó információt is tartalmaznak. Ezeknek az ismereteknek a birtokában kell majd kiválasztani azokat az objektumokat, amelyek a legígéretesebbek az ICRF újradefiniálása szempontjából.

Történnek erőfeszítések arra is, hogy a hagyományosnál magasabb (24 és 43 GHz) frekvenciákon végzett VLBI mérések nyomán is létrejöjjön egy égi referencia-hálózat. Ennek egyik fő célja a bolygóközi térségbe küldött űrszondák navigációjának elősegítése. Ezek a frekvenciákon – a kvazárok rádiósugárzási mechanizmusából következően – a rendszert kijelölő objektumaink sokkal kompaktabbnak, pontszerűbbnek látszanak. Ezért felmerült olyan elképzelés is, hogy az ICRF definíciójának megújításakor a most alkalmazottnál magasabb frekvencia-párra kellene áttérni. Gondot jelent ugyanakkor, hogy így kevesebb szóba jöhető, viszonylag fényes rádióforrást találunk. Természetesen az antennák vevőberendezéseit is le kellene cserélni, nem is beszélve arról, hogy a legtöbb működő geodéziai

VLBI antenna „tányérjának” felülete nem elég pontos ahhoz, hogy milliméteres hullámhosszra dolgozzon.

Érdekes fizikai tény, hogy a különböző rádiófrekvenciákon más-más mélységben „látunk bele” a kvazárok jetjeibe. Minél magasabb a frekvencia, annál közelebb kerülünk az aktív galaxismagot működtető fekete lyuk közvetlen környezetéhez. Természetesen az ideális viszonyítási pont maga a gigantikus fekete lyuk volna, de annak közvetlen megfigyelésére nincs lehetőség. A jelenleginél nagyobb pontossági szinten, valamint az alacsony és magas frekvenciákon végzett pozíciómérések összevetésekor fontos lehet, hogy mekkora ez a frekvenciafüggő pozíció-eltolódás. Saját korábbi vizsgálataink (Paragi et al. 2000) alapján, a hagyományos geodéziai VLBI frekvenciákat alapul véve, ez a hatás az időkézésben ~1 ps változást is okozhat.

Mit kezdenek az optikai csillagászok az ICRF-fel?

Az asztrometriai célú csillagászati kutatások túlnyomó része továbbra is hagyományosan a látható fény tartományában folyik, például a Tejútrendszer csillagainak mozgását tanulmányozandó. Nem könnyű ugyanakkor a rádiótartományban definiált égi referencia-rendszer optikai tartománybeli megvalósítása. A gond legfőbb forrása, hogy míg a kvazárok optikailag túl halványak, addig a fényes csillagokra egyáltalán nem jellemző az erős rádiósugárzás – igen nehéz tehát közös összekötő pontokat találni. A látható fény tartományában az Európai Űrügynökség (ESA) HIPPARCOS asztrometriai mesterséges holdjának katalógusa az irányadó. Kapcsolatát az ICRF-fel mindössze 12 (!) csillag relatív, a hozzájuk közeli irányban látszó kvazárokhoz viszonyított rádió-interferometriás méréseivel teremtették meg (Kovalevsky et al. 1997). A csillagoknak érzékelhető sajátmozgásuk van az égen. Ennek mérési bizonytalansága miatt a két rendszer kapcsolatának pontossága az idő előrehaladtával lassan, de biztosan romlik.

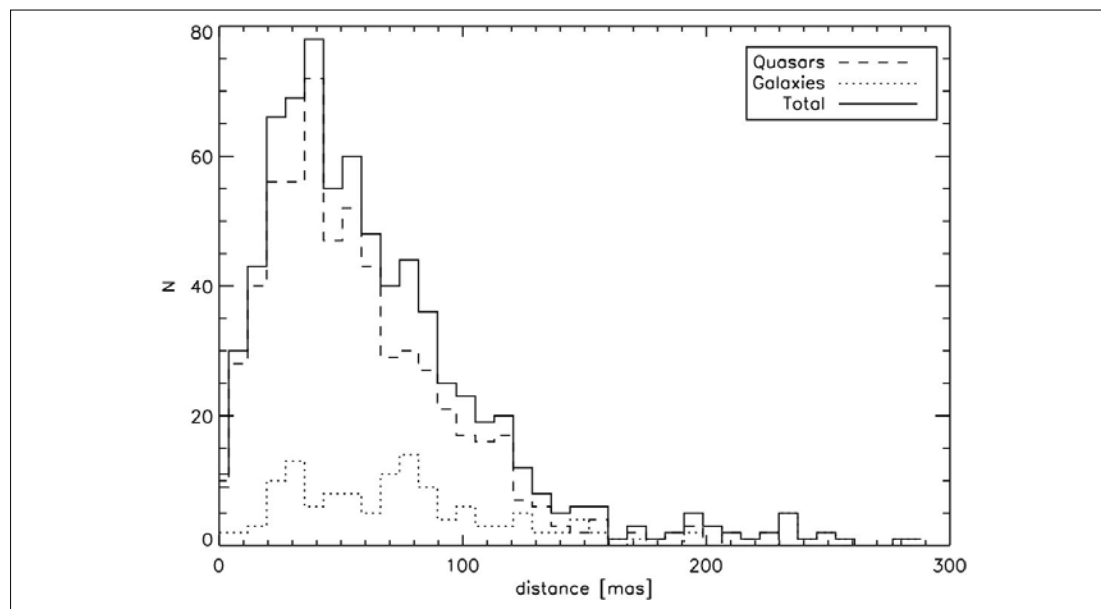
A belátható jövőben égi „rendszerváltásra” kell felkészülni. Folytatva a földi analógiákkal kezdett példálózást, olyan ez, mint ahogyan a műholdas technika az elmúlt években betört a földmérés gyakorlatába, kikényszerítve a hagyományos hálózatok szerepének átértékelését.

Az ESA 2010 körül tervezi felbocsátani Gaia űrszondáját. Az optikai hullámhossz-tartomány-

ban a HIPPARCOS-nál sokkal nagyobb érzékenysége révén immár nagyszámú (a becslések szerint mintegy félmillió) kvazárt is észlelni tud – milliárdnyi csillag mellett. A „definiáló pontok” hatalmas száma révén a Gaia extragalaktikus rendszerének pontossága várhatóan meg fogja haladni a jelenlegi, VLBI technikán alapuló ICRF-ét is. Ugyanakkor először nyílik lehetőség arra, hogy közvetlenül is összekapcsolhassuk a rádió és optikai égi referencia-rendszert. Szép számmal akadnak majd olyan kvazárok, amelyeket mindkét technikával meg tudunk figyelni. Erre az összekapcsolásra, minél több potenciális „közös pont” felkutatására a VLBI közösségnek is készülnie kell (Frey 2005). Az összekapcsolásra a folyamatosság fenntartása, és a VLBI technika korábban már említett egyedülálló globális geodéziai szerepe miatt is szükség lesz.

Minél pontosabban vagyunk képesek mérni, annál inkább előtérbe kerülhetnek olyan szisztematikus hibahatások, amelyek megnehezítik méréseink értelmezését. Ha a rádió és optikai rendszerek közvetlen összekapcsolásán gondolkodunk, jogosnak (bár a gyakorlatban

egyelőre nehezen ellenőrizhetőnek) tűnik például az a feltételezés, hogy ahonnan a kvazárok rádiósugárzása és látható fénysugárzása ered, az térben ugyanoda esik. Habár vannak ennek alátámasztására igen jó, fizikai alapokon nyugvó érvek, mégis előfordulhat, hogy az alapfeltételezés nem minden esetben helytálló! Gondoljunk akár egy kettős kvazárra vagy egy, a galaxis magjától némileg távolabb eső, kompakt rádiósugárzó tartományra. Erre vonatkozóan itthon is végeztünk egy érdekes vizsgálatot: összehasonlítottuk a jelenleg elérhető legnagyobb optikai kvazár-adatbázis, a nagyszabású Sloan Digitális Égboltfelmérés (SDSS) katalógusában megtalálható, ugyanakkor VLBI mérésekből származó pontos koordinátákkal is rendelkező aktív galaxismagok pozícióit (Frey et al. 2006). A VLBI pozíciós pontossága ezred-ívmásodperces (mas) vagy ennél is jobb. Az SDSS által a látható fény tartományában elért 60 mas pontosság ezzel nem vetekedhet. Ugyanakkor a rádió és optikai pozíciók különbségének eloszlása (3. ábra), a nagy értékeknél mutatkozó viszonylagos többlet arra figyelmeztethet, hogy akadhat néhány „gyanús”



3. ábra Az SDSS-ben illetve VLBI technikával mért pozíciók ezred-ívmásodpercben (mas) kifejezett szögtávolságának eloszlása a két adatbázis 735 közös objektuma (595 kvazár – szaggatott vonallal, 140 galaxis – pontozott vonallal) alapján. A megfigyelt eloszlás alátámasztja azt, hogy az SDSS optikai pozíciók pontossága mindkét koordinátában kb. 60 mas. (Az optikai felvételeken pontszerűnek tűnő kvazároknál a pozíciós pontosság jobb, a kiterjedtnek látszó galaxisok esetén némileg gyengébb.) Az eloszlás 200 mas feletti vége arra enged következtetni, hogy előfordulhatnak olyan objektumok, ahol a rádió és optikai fényességeloszlás csúcsa nem feltétlenül esik egybe (Frey et al. 2006).

objektum: ezeknél nem zárhatjuk ki, hogy nem ugyanazt a viszonyítási pontot látjuk a két elektromágneses hullámsávban.

A címlapon szereplő színes ábrán látható egy szuperpontos ICRF koordinátákkal rendelkező kalibrátor kvazár (J0603+2159, piros kereszttel jelölve) környezetében az Európai VLBI Hálózattal 2006 novemberében talált kompakt rádióforrások (Frey et al. 2007). A szaggatott vonal az Ikrék, Orion és Bika csillagképek egy részét lefedő 2° sugarú kört határolja. Az így megtalált aktív galaxismagok látható fényben is megfigyelhetők. Segítségükkel az optikai égi vonatkoztatási rendszer lokálisan, nagy pontossággal az ICRF-hez köthető, s a jövő évtized óriás optikai teleszkópjainak asztrometriai kalibrációját segíti majd. A hét halvány kvazár ICRF koordinátáinak pontossága 1 ezred-ívmásodpercen (mas) belüli. A skálákról az eredetileg feltételezett pozícióhoz viszonyított relatív eltérések olvashatók le, mas egységekben. A képek bal alsó sarkában látható ellipszis a VLBI hálózat irányfüggő szögfelbontását jellemzi.

Összefoglalásul megállapíthatjuk, hogy a VLBI szerepe az űrgeodéziai mérési technikák között továbbra is meghatározó. A Nemzetközi VLBI Szolgálat (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, IVS) következő évtizedre kidolgozott stratégiájában (Neill et al. 2005) fontos szerepet kap többek között a lényegében az 1970-es és 80-as évek technológiáját képviselő globális mérőhálózat elemeinek megújítása és kibővítése, az adatfeldolgozási módszerek fejlesztése, a pontosság növelése, a megfigyelések sűrítése. A fejlődés része az égi vonatkoztatási rendszer közeljövőben esedékes pontosítása is. Az ezirányú kutatások egy-egy területén mi is részt veszünk. Munkánkunk új keretet ad a Magyar Tudományos Akadémia által támogatott Fizikai Geodéziai és Geodinamikai Kutatócsoport. Ennek programjában a globális geodéziai megfigyelőrendszerrel (Global Geodetic Observing System, GGOS; Ádám 2007) kapcsolatos számos feladat helyet kapott.

Kutatásainkat az OTKA a T046097 számú pályázat keretében támogatja. Az Európai VLBI Hálózattal végzett méréseinket az EU 6. kutatás-fejlesztési keretprogramjában futó RadioNet (R113CT 2003 5058187) pályázat tette lehetővé.

IRODALOM

Ádám J. (2007): A Föld globális megfigyelése. *Magyar Tudomány*, 114. kötet, 5. szám, pp. 563–576

Campbell, J. (2004): VLBI for geodesy and geodynamics. In: *The Role of VLBI in Astrophysics, Astrometry and Geodesy*, eds. Mantovani F., Kus A., NATO ASI Series II., Vol. 135, pp. 359–381 (Kluwer: Dordrecht)

Fejes I. (1983): Merre tart a VLBI-technika? *Geodézia és Kartográfia*, 35. kötet, 2. szám, pp. 83–88

Fey, A.–Gaume, R. (2006): Future Realizations of the ICRF: Radio and Optical. In: *The International Celestial Reference System and Frame*, eds. Souchay J., Feissel-Vernier M., IERS Technical Note No. 34, pp. 21–27 (Verlag des BKG: Frankfurt am Main)

Frey, S. (2005): VLBI survey of weak extragalactic radio sources as a potential link between the radio and optical reference frames. In: *The Three-Dimensional Universe with Gaia*, eds. Turon C., O’Flaherty K.S., Perryman M.A.C., ESA SP-576, pp. 683–686

Frey, S.–Veres, P.–Vida, K. (2006): Comparing the SDSS and VLBI quasar and galaxy positions. In: *Proc. 8th European VLBI Network Symposium*, ed. Marecki A., *Proceedings of Science*, PoS(8thEVN)072

Frey, S.–Platais, I.–Fey, A. L. (2007): Linking Deep Astrometric Standards to the ICRF. In: *Proc. 18th European VLBI Geodesy and Astrometry Working Meeting*, eds. J. Böhm, A. Pany, H. Schuh, *Geowissenschaftliche Mitteilungen*, Heft Nr. 79, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation, megjelenés alatt (Technische Universität Wien)

Halmos F. (1974): Hosszú bázisú rádióinterferométeres mérések geodéziai alkalmazása. *Geodézia és Kartográfia*, 26. kötet, 5. szám, pp. 338–346

Kovalevsky, J.–Lindegren, L.–Perryman, M. A.C.–Johnston, K.J.–Kislyuk, V.S.–Lestrade, J.–F.–Morrison, L.V.–Platais, I.–Röser, S.–Schilbach, E.–Tucholke, H.–J.–de Vegt, C.–Vondrak, J.–Arias, F.–Gontier, A.–M.–Arenou, F.–Brosche, P.–Florkowski, D. R.–Garrington, S.T.–Kozhurina-Platais, V.–Preston, R. A.–Ron C.–Rybka, S.P.–Scholz, R.–D.–Zacharias N. (1997): The HIPPARCOS catalogue as a realisation of the extragalactic reference system. *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 323, pp. 620–633

Ma, C.–Arias, E. F.–Eubanks, T. M.–Fey, A. L.–Gontier, A.–M.–Jacobs, C. S.–Sovers, O. J.–Archinal, B. A.–Charlot, P. (1998): The International Celestial Reference Frame as Rea-

- lized by Very Long Baseline Interferometry, *Astronomical Journal*, Vol. 116, pp. 516–546
- MacMillan, D. S.–Ma, C. (2007): Radio source instability in VLBI analysis. *Journal of Geodesy*, Vol. 81, pp. 443–453
- Mosoni, L.–Frey, S.–Gurvits, L. I.–Garrett, M. A.–Garrington, S. T.–Tsvetanov, Z. I. (2006): Deep Extragalactic VLBI-Optical Survey (DEVOS). I. Pilot MERLIN and VLBI observations. *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 445, pp. 413–422
- Niell, A.–Whitney, A.–Petrachenko, W.–Schlüter, W.–Vandenberg, N.–Hase, H.–Koyama, Y.–Ma, C.–Schuh, H.–Tuccari, G. (2005): VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems, IVS WG3 Final Report, 32 pp. (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry)
- Paragi, Z.–Fejes, I.–Frey, S. (2000): Indications for frequency dependent radio core position in 1823+568. In: Proc. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2000 General Meeting, eds. Vandenberg N.R., Baver K.D., NASA/CP-2000-209893, pp. 342–345
- Petrov, L. (2007): VLBI Source Position Catalogue, Solution 2007a, http://vlbi.gsfc.nasa.gov/solutions/2007a_astro
- Sovers, O. J.–Fanselow, J. L.–Jacobs, C. S. (1998): Astrometry and geodesy with radio

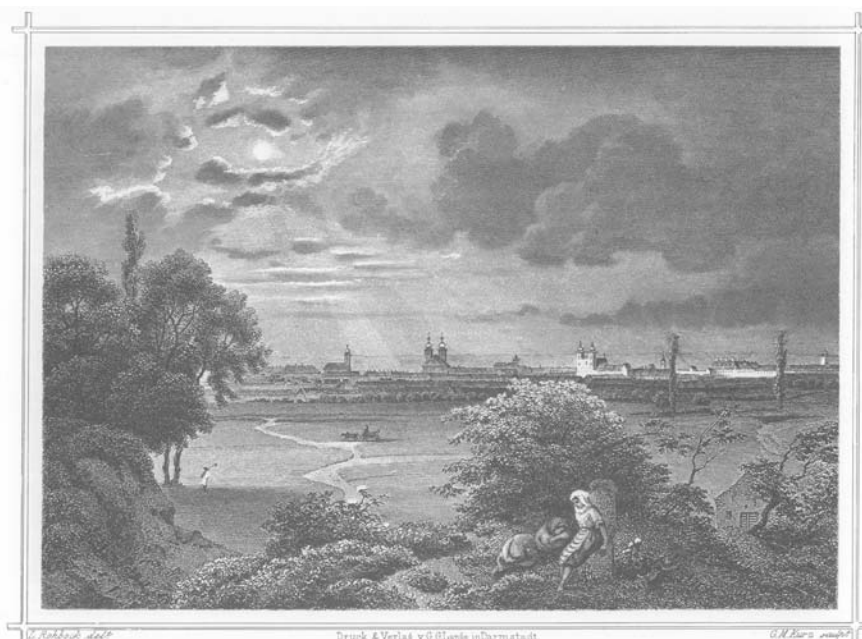
interferometry: experiments, models, results. *Reviews of Modern Physics*, Vol. 70, No. 4, pp. 1393–1454

Celestial reference points

Frey, S.

Summary

For astronomers, the technique of Very Long Baseline Interferometry (VLBI) is a tool for studying the high-resolution structure of compact celestial radio sources. On the other hand, VLBI can measure Earth rotation and orientation, as well as station positions and velocities with high accuracy. For applications in geosciences, this technique is unique in its ability to provide a direct link to the quasi-inertial reference frame defined by the positions of distant active galactic nuclei (quasars). After briefly reviewing the basic concept of geodetic VLBI measurements, we describe how the celestial reference frame is established. We show the current trends and discuss why the re-definition of the reference frame is under consideration. We also introduce our own results from the last couple of years. These studies are related to quasar positions and local densifications of the celestial reference frame.



Székesfehérvár

(Magyarország és Erdély eredeti képekben, Darmstadt 1856; Lange Gusztáv György)