

„PONTÁLLANDÓSÍTÁS” AZ ÉGEN – MILYEN KVAZÁROK ALKALMASAK AZ ÉGI VONATKOZTATÁSI RENDSZER KIJELÖLÉSÉRE?

Frey Sándor*, Moór Attila*



Defining the celestial reference points – which quasars are the best suited? - We briefly introduce the International Celestial Reference Frame (ICRF) and summarise why the radio-loud active galactic nuclei (quasars) are the most suitable objects for its definition. We discuss the quasars' positional stability and its possible relation to their radio structure imaged with Very Long Baseline Interferometry (VLBI) at the milli-arcsecond angular scale.

Keywords: VLBI, celestial reference system, quasars

Röviden bemutatjuk a nemzetközi égi vonatkoztatási rendszert (ICRF) és összefoglaljuk, hogy miért a rádiósugárzó aktív galaxismagok (kvazárok) a legalkalmasabbak a rendszer definiálására. Szó-lunk a kvazárok pozíciós stabilitásáról. Megvizsgáljuk, hogy az összefüggésben lehet-e a kvazárok ezred-ívmásodperces szögskálán, nagyon hosszú bázisvonalú rádió-interferometriás (VLBI) mérés-ekkel megfigyelt szerkezetével.

Kulcsszavak: VLBI, égi vonatkoztatási rendszer, kvazárok

1 Bevezetés

A nagyon hosszú bázisvonalú rádió-interferometria (*Very Long Baseline Interferometry*, VLBI) egy az 1960-as évek második felében eredetileg rádiócsillagászati célra kifejlesztett technika. Működésének alapelve, hogy egymástól távol – akár különböző földrészeken – elhelyezett rádióteleszkópokkal egyidőben ugyanazt az égi rádióforrást figyelik meg. A távoli égitestekről beérkező rádió-hullámokat detektálják, digitalizálják, mágneses adathordozóra (szalagokra, mágneslemezekre) rögzítik. (A nagy távolságokat csak a legutóbbi években sikerült szélessávú optikai adatátviteli hálózatok segítségével valós időben is áthidalni; a jövőben ennek az ún. e-VLBI technikának a további elterjedése várható.) Az interferométer-hálózat egyes elemeinél rögzített adatokat utólag visszajátszva egy központi számítógép segítségével állítják elő az interferenciát. A csillagászok így rendkívül nagy szögfelbontással tanulmányozhatják a távoli, kompakt rádiósugárzó égitestek szerkezetét. A rendszer szögfelbontását ugyanis nem az egyes antennák mérete, hanem a köztük levő távolság határozza meg.

A távoli égitestekről érkező hullámfront más-más időpontban éri el a különböző rádióteleszkópokat. Ez a késés függ többek közt az égi rádióforrás irányától, a forgó Föld szilárd kérgén rögzített antennák egymáshoz viszonyított pillanatnyi geometriai helyzetétől, a földi ionoszférában és troposzférában bekövetkező, a hullámterjedést befolyásoló jelenségektől, a helyi frekvencia-etalonok (atomórák) paramétereitől. Geodéziai szempontból fontos mérési adat a hálózat különböző bázisvonalain (az egyes antennapárokot összekötő szakaszokon) mért időkésés, illetve annak idő szerinti deriváltja (Frey 2007). Geodéziai célú VLBI megfigyelések világszerte rendszeresen, szolgáltatászerűen folynak. Ezeket jelenleg a Nemzetközi VLBI Szolgálat (*International VLBI Service for Geodesy and Astrometry*, IVS) koordinálja. A mérések célja például a Föld forgási szögsebességének és a pólusmozgásnak a nyomon követése, az antennák és a kijelölt égi rádióforrások koordinátáinak meghatározása. Napjainkban a VLBI pozíció- és iránymérések a földfelszínen centiméteresnél, az égen ezred-ívmásodpercesnél (*milli-arcsecond*, mas) is pontosabbak (Sovers et al. 1998). Fontos kiemelni, hogy a Föld forgásának változásait hosszabb időtávon, nagy pontossággal kizárólag a VLBI technikával tudjuk tanulmányozni. Ennek oka, hogy a VLBI vonatkoztatási rendszerét távoli, fényes aktív galaxismagok (kvazárok) jelölik ki. Ez a rendszer a kvazárok nagy – jellemzően több

* FÖMI Koszmosz Geodéziai Observatóriuma, 1592 Budapest, Pf. 585
és MTA-BME Fizikai Geodézia és Geodinamikai Kutatócsoport, 1521 Budapest, Pf. 91
E-mail: frey@sgo.fomi.hu

milliárd fényéves – távolsága, és az ebből adódó elhanyagolható sajátmozgása miatt az inerciarendszer jelenleg ismert legjobb gyakorlati megvalósításának tekinthető.

2 A kvazárok, mint égi vonatkoztatási pontok

Az 1960-as évek elején felfedezett *kvazárokról* (vagyis csillagszerűnek tűnő kompakt rádióforrásokról) tudjuk, hogy távoli galaxisok magjaiban találhatóak. Hatalmas sugárzási teljesítményüket a központi, nagytömegű (több millió vagy milliárd naptömegnyi) fekete lyukba hulló anyagból nyerik. A fekete lyukba a környezetéből befogott anyag egy része a rendszer forgástengelye mentén relativisztikus sebességgel kidobódik. Az így létrejövő anyagsugarakban (*jetekben*) az erős mágneses térben, közel fénysebességgel mozgó, elektromosan töltött részecskék bocsátják ki az általunk is észlelhető rádiósugárzást. Asztrofizikai szempontból a VLBI megfigyelések jelentősége a kvazárok „működésének” megértése, a jetek legbelső szerkezetének és tulajdonságainak vizsgálata.

Az égi vonatkoztatási rendszer kijelölése szempontjából a kvazárok ideálisnak tűnnek, a már említett kozmológiai léptékű távolságuk és kis szögmeretük miatt. A jelenleg elérhető optikai csillagkatalógusok pontosságát meghaladva, a kvazárok által kijelölt nemzetközi égi referenciarendszer (*International Celestial Reference Frame*, ICRF) számít 1997 óta a hivatalos fundamentális égi rendszernek (Ma et al. 1998). Az ICRF definícióját bő két évtizedes VLBI megfigyeléssorozat előzte meg, amelynek eredményeképpen összesen 212 extragalaktikus rádióforrás (kvazár és más típusú aktív galaxismag) koordinátáit rögzítették.

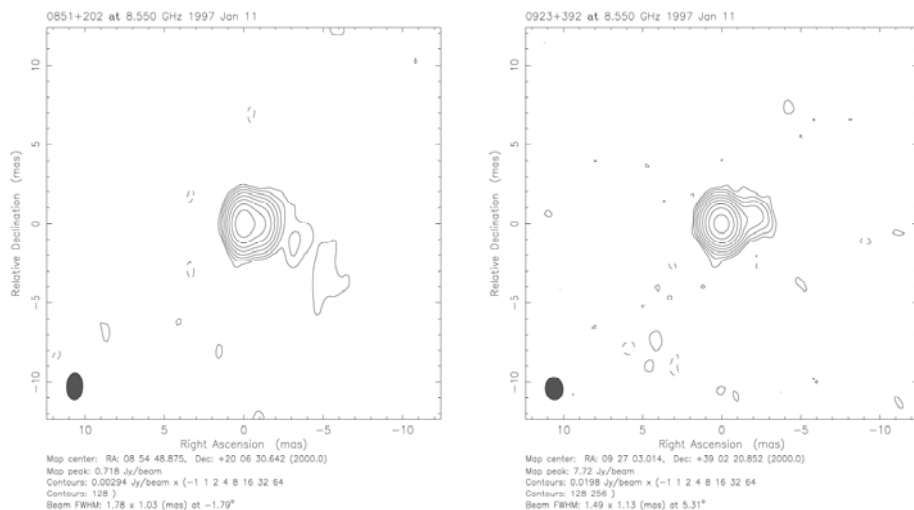
2.1 A kvazárok pozíció-változásai

Az ICRF bevezetése óta eltelt idő alatt tovább finomodtak a megfigyelési módszerek. Kiderült, hogy a megnövekedett pontossági igények kiszolgálása érdekében szükség van a rendszer javítására. Mára a geodéziai VLBI programok egyik legnagyobb, nehezen modellezhető hibaforrássává vált a nem kellőképpen pontos égi vonatkoztatási rendszer. A problémák egyik része, hogy a referenciapontok viszonylag ritkán, és nem egyenletesen fedik le az égboltot. Technikai okokból jóval több definiáló rádióforrás található az északi égbolton, mint a délin. (A déli féltekén a földi VLBI hálózatok kiépítettsége kisebb.) Másrészt kiderült, hogy a rendszer „állandósítására” kiválasztott kvazárok pozíciója hosszabb időtávon mégsem elegendően stabil. Annak idején az égi alappontok kijelölésénél elsődleges szempont volt a hosszú, a VLBI korai időszakaira visszanyúló megfigyeléssorozat. Így jellemzően a legfényesebb kvazárok kerültek a mintába, amelyeknek a nagyfelbontású rádiószerkezete nem feltétlenül „pontoszerű”. Valóban, az immár több évtizedre visszanyúló koordináta-idősorok alapján akár a 0.1 mas/év nagyságrendjébe eső elmozdulások is mérhetőek számos kvazár esetében. Jelenleg napirenden van az ICRF újradefiniálásának kérdése, amire egy sor javaslat született (pl. Lambert és Gontier 2009, és az ottani hivatkozások). Ezek főleg gyakorlatiasan, az ideális égi alappontok kiválasztási módszere felől közelítik meg a kérdést. Kevesebb hangsúlyt kap, hogy egyáltalán miért is változik e távoli kvazárok pozíciója?

2.2 A kvazárok nagyfelbontású rádiószerkezete és fizikája

A távoli kvazárok rádiószerkezetét a néhány GHz-es frekvencia-tartományokban VLBI technikával vizsgálva, a következő általános kép tárul elénk (1. ábra). Szinte minden esetben látunk egy domináns, fényes és viszonylag kisméretű „magot”. Ez a rádiósugárzás valójában a kvazár irányából induló, felénk mutató jet egy olyan részéből származik, amelynél az adott frekvencián már nem hatolhatunk „mélyebbre” (az onnan érkező sugárzás elnyelődik). Valójában a különböző frekvenciákon más-más mélységig látunk: minél magasabb a rádióhullámok frekvenciája, annál közelebb kerülünk a központi fekete lyukhoz. (Magát a fekete lyukat közvetlenül természetesen nem észlelhetjük.)

A kvazárok VLBI rádióképeinek másik jellegzetes összetevője az optikailag vékony „jet”. Itt a központi fekete lyuk környezetéből eltávolodó anyagkilövellés távolabbi részleteit, esetenként lökéshullámokat figyelhetünk meg, amelyek fényesebb csomók formájában mutatkoznak.



1. ábra. A 0851+202 (OJ 287, *balra*) és a 0923+392 (4C 39.25, *jobbra*) kvazár 8.6 GHz frekvencián, 1997. január 11-én készült kontúrtérképei (fényességeloszlásuk). Az amerikai VLBI hálózat (VLBA) felbontása itt észak-déli irányban 1.5–1.8 mas, kelet-nyugati irányban kb. 1 mas. A hálózat irányfüggő szögfelbontását az ábrák bal alsó sarkában látható ellipszisek jelképezik. (Képek: *US Naval Observatory Radio Reference Frame Image Database*, <http://torf.usno.navy.mil/RRFID>)

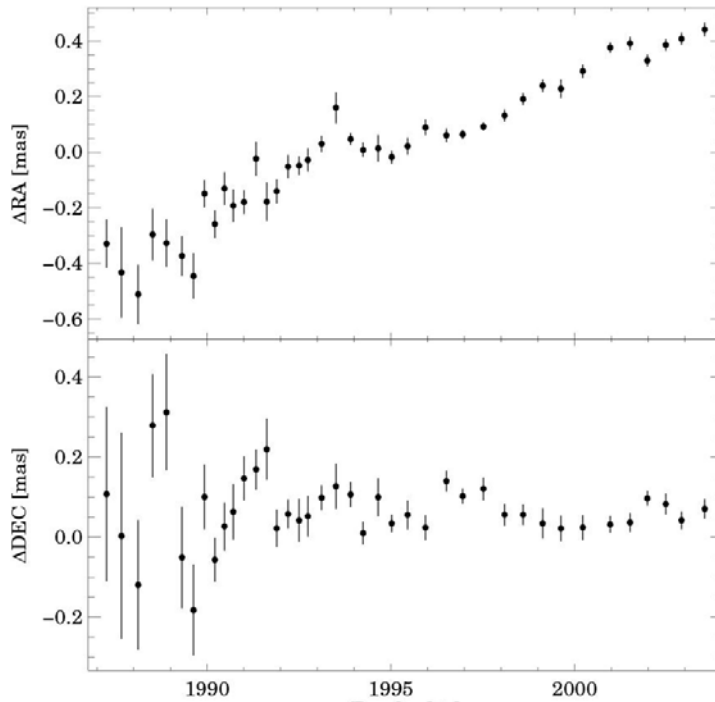
Gyakorlatilag minden esetben aszimmetrikus szerkezetet (a magból kiinduló egyirányú jetet) látunk. Ennek az a magyarázata, hogy a központi fekete lyuk környezetéből két ellentétes irányban kiinduló anyagsugarak egyike többé-kevésbé pontosan a látóirányunkba mutat. Ennek a sugárzása – relativisztikus hatások miatt – jelentősen felerősödik, míg a másik, ellenkező irányba induló a detektálhatóság határa alá halványul. Fontos megemlíteni, hogy a szerkezet sok esetben rövid (néhány éves vagy akár hónapos) időskálán észrevehető változásokat mutat! Ennek hátterében is a kis látószög és a plazmacsomók fénysebességhez közeli sebességei állnak (Frey 2002).

3 A kvazárok szerkezete és látszó elmozdulása közti összefüggés vizsgálata

Joggal merülhet fel a kérdés, hogy van-e kimutatható kapcsolat a kvazárok VLBI technikával feltérképezhető *rádiószerkezete*, annak összetettsége, illetve a *koordináta-változások* között. Ennek az összefüggésnek a léte valószínű, mivel a referenciapont helye valójában a fényességeloszlás „súlypontjával” kell egybeessen. Ha a fényességeloszlás változik, annak hatással kell lennie a kvazár észlelt pozíciójára is. Másképpen megfogalmazva: bár az igen távoli aktív galaxisok sajátmozgása tényleg elhanyagolható, rádiószerkezetük változása a VLBI pontossági szintjén már nem mindig az!

Ilyen jellegű vizsgálatok korábban történtek ugyan (pl. Fey et al. 1997, Titov 2007), de csupán néhány egyedi kvazárra vonatkozóan. Mostanra lehetővé vált, hogy a kérdést egy nagyobb mintán, statisztikai szempontból közelítsük meg. Publikussá váltak egyrészt az égi vonatkoztatási rendszert kijelölő kvazárok hosszú időn át rendszeresen készített VLBI térképeiből származtatott szerkezeti modellek (Piner et al. 2007). Másrészt a különböző geodéziai és asztrometriai VLBI adatfeldolgozó központok előállították ugyanezen kvazárookra a koordináta-változásokból lineáris közelítéssel becsült sebességértékeket (pl. MacMillan és Ma 2007). Mi az Oleg Titov által az OCCAM geodéziai VLBI adatfeldolgozó program (Titov et al. 2004) segítségével, mintegy 4 millió mérési adat felhasználásával előállított koordináta-idősorokat használtuk, amelyek jellemzően az 1984-től 2007-ig terjedő intervallumot fogják át. Példaképpen a legmarkánsabb változásokat mutató kvazárok egyikének, az 1. ábra jobb oldalán is látható 4C 39.25 jelűnek a koordináta-változásait mutatjuk be (2. ábra).

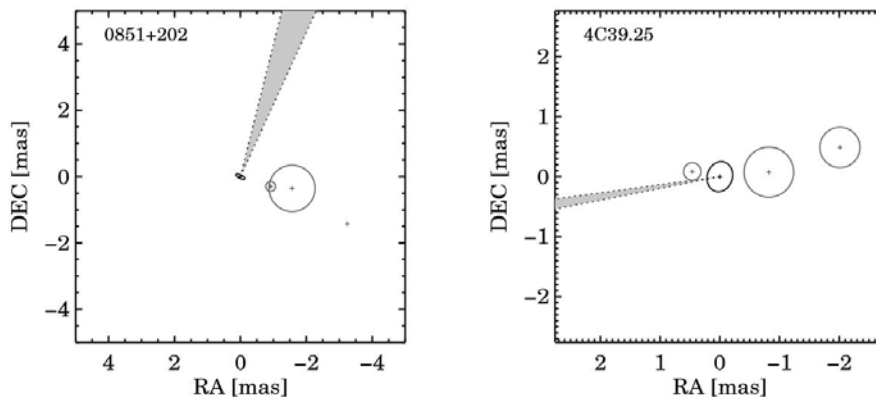
Munkánk során első lépésként azt a célt tűztük ki, hogy megállapítsuk: hogyan függ össze a kvazárok nagyfelbontású rádiószerkezetére jellemző irány (*a jet iránya*) és a mért *koordináta-változások iránya* (3. ábra). Ha helytálló a feltételezés, hogy a pozíció eltolódását a jetben megjele-



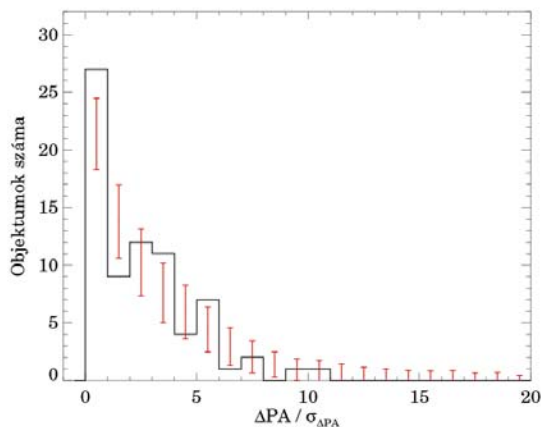
2. ábra. A 0923+392 (4C 39.25) egyenlítői koordinátáinak (rektaszenciójának és deklinációjának) változása ezred-ívmásodpercben (mas) mérve. Különösen szembevetű a rektaszenció változása (*fenti*). A csúszó átlagolással kapott pontokhoz tartozó hibaértékek egyúttal azt is jelzik, hogy a mérési és adatfeldolgozási technika hogyan vált pontosabbá az eltelt kb. két évtized folyamán.

nő vagy onnan eltűnő, annak mentén esetleg kifelé mozgó rádiokomponensek okozzák, akkor várható, hogy esetleg korrelációt találunk a fent említett két irány között is.

Vizsgálati módszerünk és eredményeink minden részletére itt nem tudunk kitérni, publikálásuk előkészületben van (Moór et al. 2009). Előzetes eredményeink azt mutatják, hogy egy 75 kvazárt



3. ábra. 0851+202 (OJ 287, *balra*) és a 0923+392 (4C 39.25, *jobbra*) kvazár 8.6 GHz-en készített VLBI térképeiből előállított fényességeloszlási modellek komponensei. Az illesztett Gauss-függvények (Piner et al. 2007) középpontját keresztek, félértékszélességét ellipszisek jelölik. A jetek jellemző iránya a komponensek elhelyezkedése alapján jól kivehető, kvantitatív módon kezelhető. A geodéziai VLBI mérésekből a pozícióeltolódásra kapott irányt és annak bizonytalanságát a központi „magból” kiinduló szürke nyálábok iránya és szélessége mutatja. A két példa közül az egyik (4C 39.25) egy igen jó iránybeli egybeesést, a másik (0851+202) ugyanakkor egy közel merőleges jet-elmozdulás viszonyt mutat. (Ez utóbbi jelentős szögeltérés nem egyedi eset a vizsgált mintában.)



4. ábra. A vizsgált 75 elemű kvazárminta VLBI szerkezete (Piner et al. 2007) alapján definiált jeterány és a koordináta-változások iránya (Titov, személyes közlés) közötti szögeltérés (ΔPA) és hibája ($\sigma_{\Delta PA}$) közötti arány, hisztogramon ábrázolva (folytonos vonal). Ezer hasonló, de véletlenszerűen beállított irányokkal rendelkező mintával végzett szimulációink átlagát és az értékek szórását jelképezik a grafikonra rajzolt függőleges szakaszok. A két irány értelmezéséhez segítenek a 3. ábrán bemutatott példák. A valódi mintában a ΔPA értékek eloszlása 0° és 90° között közel egyenletes.

tartalmazó minta alapján *nincs* nyilvánvaló összefüggés a koordináta-változások iránya és a jetre jellemző irány között (4. ábra).

Ez az állítás úgy értendő, hogy a vizsgált kvazárok közt nagyjából egyformán fordulnak elő olyanok, amelyeknél a két irány egybeesik, s olyanok is, amelyeknél nem. (A vizsgált 75 kvazár közül 16 tartozik az ICRF-et jelenleg definiáló elsődleges referenciapontok közé.)

Mivel magyarázható ez az elsőre furcsának tűnő eredmény? Emlékeztetünk rá, hogy a VLBI rádióképek szögfelbontása ~ 1 mas, a jetek jellemző szögkiterjedése pedig ~ 1 -10 mas. A koordináta-változások nagyságrendje ugyanakkor legfeljebb ~ 0.01 -0.1 mas/év. Ez a rendelkezésre álló hosszú idősorok alapján ~ 0.001 mas/év pontossággal mutatható ki (pl. MacMillan és Ma 2007). Mindez azt is jelenti, hogy a geodéziai VLBI megfigyelések során kapott kvazár-koordináták bizonytalansága jóval belül esik azon a szögskálán, amelyről közvetlen interferometrikus képalkotással információhoz juthatunk. Ha a mért pozíció-eltolódások kapcsolatba hozhatók a nagyfelbontású rádiószerkezettel – aminek az ellenkezőjére egyelőre nincs bizonyíték –, akkor az úgy lehetséges, hogy a kvazárok a mostaninál 1-2 nagyságrenddel kisebb szögskálán más jellemző irányokkal (is) írhatók le. Ez a feltételezés a VLBI képalkotás szögfelbontásának növelésével lenne ellenőrizhető a jövőben. Erre a megfigyelési hullámhossz csökkentése és/vagy az űr-VLBI technika – a VLBI bázisvonalak kiterjesztése a Föld méretein túlra, mesterséges holdon elhelyezett rádióteleszkóppal – kínál lehetőséget. A relativisztikus jetekben – nagyobb, az ezred-ívmásodperces és ívmásodperces skálák között – jól ismertek ilyen irányeltérések (pl. Conway és Murphy 1993).

4 Összefoglalás

A VLBI fontos űrgeodéziai technika, amelynek kvázi-inerciális vonatkoztatási rendszerét (ICRF) távoli rádiósugárzó aktív galaxismagok jelölik ki. Közülük egy 75 elemű minta statisztikai elemzése azt mutatta, hogy a kvazárok ~ 1 -10 mas skálájú rádiószerkezetére jellemző irány nincs nyilvánvaló összefüggésben a legfeljebb ~ 0.01 -0.1 mas/év nagyságrendű koordináta-változásaik irányával. Küszöbön áll az ICRF definíciójának pontosítása, újraértelmezése. Ennek során elsődleges szempont lesz, hogy olyan kvazárokat válasszanak alappontul, amelyeknek az elmúlt évtizedekben mért koordináta-eltolódásai minimálisak. Mind asztrofizikai, mind geodéziai szempontból továbbra is nyitott kérdés, hogy mi az összefüggés a kvazárok rádiószerkezete, fizikai tulajdonságai, valamint az egyes esetekben mérhető látszólagos pozíció-változások között.

Köszönetnyilvánítás. Köszönettel tartozunk Oleg Titovnak (Geoscience Australia) a kvazárok koordináta-idősorainak rendelkezésünkre bocsátásáért. Kutatásainkat részben az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok (OTKA) támogatásával végezzük, a K72515 sz. szerződés alapján.

Hivatkozások

- Conway JE, Murphy DW** (1993): Helical jets and the misalignment distribution for core-dominated radio sources. *Astrophys. J.*, 411, 89-102
- Fey AL, Eubanks TM, Kingham KA** (1997): The Proper Motion of 4C 39.25. *Astron. J.*, 114, 2284-2291.
- Frey S** (2002): Kvazárok. Meteor Csillagászati Évkönyv 2003, Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 222-234.
- Frey S** (2007): Alappontok az égen. *Geod. Kart.*, 59;8-9, 29-35.
- Lambert S, Gontier A-M** (2009): On radio source selection to define a stable celestial reference frame. *Astron. Astrophys.*, 493, 317-323.
- Ma C, Arias EF, Eubanks TM, Fey AL, Gontier A-M, Jacobs CS, Sovers OJ, Archinal BA, Charlot P** (1998): The International Celestial Reference Frame as Realized by Very Long Baseline Interferometry. *Astron. J.* 116, 516-546.
- MacMillan D S, Ma C** (2007): Radio source instability in VLBI analysis. *J. Geod.*, 81, 443-453.
- Moór A, Frey S, Titov OA, Bakos J** (2009), *Astron. Astrophys.*, előkészületben.
- Piner BG, Mahmud M, Fey AL, Gospodinova K** (2007): Relativistic Jets in the Radio Reference Frame Image Database. I. Apparent Speeds from the First 5 Years of Data. *Astron. J.*, 133, 2357-2388.
- Sovers OJ, Fanelow J, Jacobs CS** (1998): Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results. *Rev. Mod. Phys.*, 70;4, 1393-1454.
- Titov O, Tesmer V, Böhm J** (2004): OCCAM v.6.0 Software for VLBI Data Analysis. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2004 General Meeting Proceedings. Edited by N. R. Vandenberg and K. D. Baver, NASA/CP-2004-212255, 267-271.
- Titov OA** (2007): Apparent Proper Motions of Radio Sources from Geodetic VLBI Data. *Astron. Lett.*, 33; 7, 481-487.