

ОДРЕЂИВАЊЕ ПОЛОЖАЈА ЗВЕЗДА У ОКОЛИНИ РАДИО-ИЗВОРА

МИОДРАГ ДАЧИЋ, СОФИЈА САЦАКОВ И
ЗОРИЦА ЦВЕТКОВИЋ

Астрономска опсерваторија, Волгина 7, 11050 Београд

Резиме. Захваљујући високој тачности дугобазичне радио-интерферометрије и могућности-ма посматрања вангалактичких радио-извора, последњих година се нагло развија радио-астрометрија. Јасна је потреба да се досадашња и будућа оптичка посматрања везују за радио-интерферометријска мерења. Међународној активности која је покренута ради формирања јединственог референтног система доприноси и Астрономска опсерваторија у Београду учествујући у посматрањима звезда, чији ће положаји на посредан начин повезивати оптичка и радио-интерферометријска мерења.

Међу задацима који су у последње време искрсли пред фундаменталном и посматрачком астрометријом, упоредо са формирањем квалитативно нових координатних система, важно место заузима изучавање узајамне оријентације традиционалних оптичких фундаменталних система и нових координатних система који се формирају везивањем за компактне вангалактичке радио-изворе. Посебно је важно да се обезбеди таква веза између оптичких и радио-интерферометријских координатних система, како би се на што погоднији начин користиле могућности које и једни и други дају. Другим речима, потребно је да се добије такав координатни систем који је везан за вангалактичке радиоизворе, а у коме ће се користити и оптичка и радио-интерферометријска посматрања. Циљ је одређивање положаја и проучавање кретања небеских објеката, како у размерама Сунчевог система, тако и у нашој Галаксији, па и ван њених области.

Говорећи о положајима и кретањима објеката у Сунчевом систему и Васиони, треба имати у виду посебне координатне системе у којима се добија што је

могуће објективнија слика њихових положаја и кретања. Формирање оваквих система у астрономији праћено је великим тешкоћама, али се током времена остварује корак по корак, заједно са развојем науке и технике.

1. Формирање инерцијалног система у астрономији

У класичној механици као основни и "привилеговани" системи рачунања координата усвојени су инерцијални системи, чија је основна карактеристика праволинијско и равномерно кретање. За задавање таквог инерцијалног система у астрономији, класична механика усваја појам апсолутног простора, који је у Њутново време поистовећиван са мноштвом, како се тада сматрало, непокретних звезда. После откривања сопствених кретања звезда, појавила се потреба тачног одређивања положаја и рачунања кретања упоришних објеката при практичној реализацији инерцијалног координатног система. Почетком двадесетог столећа астрономи почињу да бирају вангалактичке маглине које могу да послуже као упоришни објекти за формирање инерцијалног координатног система. Међутим, већ у остваривању првих посматрачких програма, појавиле су се велике тешкоће при одређивању положаја ових маглина које имају велике угловне димензије и врло су слабог сјаја ($m > 14$).

Године 1963. откривено је вангалактичко порекло квазара које је могуће посматрати и у оптичком опсегу, и у радио-дијапазону таласних дужина. Примена дугобазичне радио-интерферометрије за одређивање угловних положаја ових извора зрачења означила је почетак нове етапе у формирању инерцијалног координатног система. У данашње време се сматра да је за успешно решавање проблема астрономије и геодинамике неопходан такав инерцијални систем чије се осе посредством некаквих услова везују с правцима ка вангалактичким радио-изворима, а почетак с телима Сунчевог система. Конкретно, координатни почетак може бити смештен у барицентар Сунчевог система. Строго разматрајући постављени задатак, овакав координатни систем био би квази-инерцијалан, јер се координатни почетак ипак креће с малим убрзањем, а правци оса се могу мењати.

С тачке гледишта теорије релативности, инерцијални системи који су сада у пракси реализовани не могу се сматрати строгим, али су погодни за изучавање кретања у оквиру Сунчевог система, па и Галаксије.

Треба рећи и то да данас у астрономској литератури нема јединствене терминологије и прецизних дефиниција основних координатних система. Конкретно, под инерцијалним координатним системом подразумевају се они системи код којих правци оса немају обртног кретања у односу на "непокретне објекте". Због тога се терминима "инерцијалан" и "фундаменталан" често придаје једно исто значење.

Како није било могућности да се на неки други начин реализује инерцијални координатни систем, као апроксимација и практично остварење коришћени су такозвани фундаментални системи. Положаји звезда у фундаменталном каталогу задају фундаментални координатни систем, а то је обично екваторски

систем за неку одређену епоху, на пример, за 1950.0 или 2000.0. Посматрања на основу којих је састављен фундаментални систем рађена су у различитим временским периодима, а сем тога, подаци из каталога који се користе потребни су за неки други тренутак, а не за 1950.0 или 2000.0. Због тога је за обједињавање посматрања и коришћење фундаменталног система за сваки тренутак потребно знати понашање тог система у времену и простору, тј. како се обрће и неравномерно креће, а такође да се знају и сопствена кретања звезда, које су носиоци фундаменталног система. То значи, за практично коришћење потребни су положаји и сопствена кретања звезда фундаменталног каталога, као и што тачнији систем астрономских константи којима се дефинише фундаментални координатни систем за произвољни тренутак.

Гледано с практичне стране, у разним задацима тражи се и различит степен рачунања промене координатног система, односно, његовог кретања. За неке задатке довољно је да координатни систем не ротира, јер праволинијско кретање координатног почетка нема значаја. С друге стране, ни инерцијални координатни систем не задовољава потребе при решавању низа задатака у звезданој астрономији, пошто кретање координатног почетка, чак и када је праволинијско и равномерно, деформише праву слику о кинематици звезда у Галаксији. Уопште узевши, да би се што детаљније могла изучавати сва кретања небеских објеката, потребно је да се у највећој могућој мери искључи кретање координатног система. Било би идеално када бисмо имали неки "непокретни" систем, подразумевајући под тим термином координатни систем са потпуно познатим кретањима. Овакав "непокретни" систем коме тежи астрометрија за сада је недостижан циљ, што важи и за инерцијални координатни систем.

Фундаментални каталог FK5 представља практичну реализацију координатног система, који је данас усвојен као међународни стандард. Формирање фундаменталног координатног система и састављање каталога FK5 резултат је крупних међународних радова, који обједињују најбоља достигнућа у области фундаменталне астрометрије. Међутим, остварење инерцијалног система високе тачности (до 0.001) је за сада неоствариво применом метода терестричке астрометрије.

2. Инерцијални координатни систем и вангалактички радио-извори

Један од начина реализације инерцијалног координатног система високе тачности је његово везивање за вангалактичке радио-изворе (у основи су то квазари и језгра галаксија) и може се остварити методама дугобазичне радио-интерферометрије. При формирању овог система, основна претпоставка је да се углови између праваца ка таквим "упоришним објектима" не мењају са временом. Савремена знања о могућностима методе, распореду и броју радио-извора, њиховој структури и сопственим кретањима дозвољавају очекивање да систем буде формиран са тачношћу до неколико лучних милисекунди и са истом таквом стабилношћу у току неколико деценија.

Основне тешкоће у реализацији постављеног задатка могу се појавити услед

недовољног познавања структуре радио-извора и утицаја атмосфере. За сада је установљено да већина радио-извора не представља тачкасте објекте, јер им је структура веома сложена, различита за разне таласне дужине зрачења и променљива са временом. У случају да се занемари структура појединих радио-извора, грешке њихових положаја у систему могу достићи неколико милисекунди. Да би се ово избегло треба поштовати два услова: а) на основу добро проучене структуре радио-извора изабрати оне чији положаји детаља структуре достижу $0''.001$; б) на основу оперативног одређивања структуре радио-извора увести одговарајуће поправке за ту структуру. У првом случају није сигурно да стабилну фазу постојања радио-извора неће сменити нестабилна, а у другом, неопходна је специјална служба одређивања структуре радио-извора. Сем тога, при формирању инерцијалног координатног система вангалактичких радио-извора потребно је применити традиционалну претпоставку у астрометрији: да је средње кретање свих извора, усвојених за задати систем, једнако нули. Ова претпоставка задовољава ниво тачности која је за ред величине или, у сваком случају, неколико пута виша од тачности постигнуте у класичној астрометрији.

Међутим, како ће се и надаље посматрања у оптичком дијапазону користити за добијање информација о Васиони, а такође и за практичне потребе, формирање и повишење тачности фундаменталног система звезда неће изгубити своју актуелност. Могуће је да ће се убудуће само изменити прилаз решавању овог проблема.

С обзиром да ће радио-интерферометријска посматрања допринети формирању инерцијалног координатног система високе тачности, потребно је да се нешто више каже о развоју и могућностима дугобазичне радио-интерферометрије.

3. Могућности дугобазичне радио-интерферометрије

Први радио-интерферометар направљен је у Аустралији 1948. године и коришћен је за одређивање положаја и размера извора радио-зрачења на Сунцу. Педесетих година овога века направљено је неколико радио-интерферометара помоћу којих су добијене координате више радио-извора. Током времена тачност одређивања положаја радио-извора је повећавана, тако да су у Кембриџу на радио-интерферометру са базом од 5 km (растојање између два телескопа) добијане координате са истом тачношћу као и у оптичкој астрономији. За мерење малих угловних растојања учињен је покушај да се изграде дугобазични радио-интерферометри, али је дужина базе била ограничена могућностима кабловске радио-везе. У следећем кораку веза је остваривана помоћу радија. Познати пример за то је MTRLI (Велика Британија) са базом од 134 km.

У бившем Совјетском Савезу још 1965. године предложена је идеја о радио-интерферометру са независном регистрацијом. У том случају дужина базе може да буде произвољно велика. Поља зрачења регистрована на антенама интерферометра и показивања стандарда учесталости снимали би се на магнетну

траку, која би затим била обрађена на компјутерима. У 1967. години ова идеја је реализована у Канади и у САД. Дугобазични интерферометар се може користити и као геодетски инструмент. Године 1968. помоћу радио-интерферометра је измерена база дужине од преко 2000 km са тачношћу ± 20 m.

У садашње време радио-интерферометрија се користи за одређивање релативних (с тачношћу $\pm 0''.003$) и апсолутних (с тачношћу $\pm 0''.01$ до $\pm 0''.05$) координата, при чему је тачност упоређивања часовника до 10 наносекунди, мерење дужине база 4 до 6 cm, одређивање светског времена с тачношћу до 0.007 милисекунди, а тачност координата светског пола до 3 cm.

Помоћу радио-интерферометра одређивано је гравитационо одступање зрака у гравитационом пољу Сунца (с грешком $\pm 0''.0023$), положај астронаута на Месецу (с тачношћу од 1 - 3 cm), а били су установљени и ликови многих радио-извора. Помоћу ових мерења може се одредити паралакса Галактичког радио-извора на фону упоришних вангалактичких радио-извора (до растојања од 20 килопарсека), што дозвољава да се провери космолошка природа црвеног помака, може да се измери сопствено кретање галактичких радио-извора (с тачношћу од $\pm 0''.001$ до $\pm 0''.0001$), да се одреди место образовања пулсара као и њихова старост. По поремећајима у кретању радио-звезда могу се открити њихови пратиоци.

Имајући у виду овако високу тачност, најкоректнији начин одређивања координатних система је радио-интерферометријска метода, при чему се посматрају непокретни и компактни вангалактички радио-извори, а то су квазари и језгра неких галаксија. Али и по овој методи одређивање константе прецесије отежано је тиме што не може да се добије апсолутна ректасцензија и да се посматрају планете ради одређивања поправке тачке пролећне равнодневице и нагиба еклиптике према екватору.

Метода дугобазичне радио-интерферометрије омогућује да се изучава ротационо кретање Земље у односу на стваран непокретан координатни систем и да се одреди секуларно кретање Земљиних полова. Радио-интерферометријска мерења не зависе од правца вертикале, који је оптерећен недовољно изученим дугопериодичним и краткопериодичним осцилацијама. Мерења дугих база омогућавају да се закључује о кретањима блокова Земљине коре, и да се одстране утицаји ових кретања на посматрање померања Земљиних полова. Дугобазична радио-интерферометријска посматрања су за један или два реда величине тачнија од оптичких посматрања и могу се непрекидно обављати у току 24 часа, што омогућава стално праћење свих промена које се дешавају у ротационом кретању Земље.

Примери су узети из књиге *"Увод у радио-астрометрију"* (Губанов et al. 1983).

4. Веза оптичких и радио-интерферометријских координата

Имајући у виду тачност и велике могућности дугобазичне радио-интерферометрије, потпуно је јасна тежња да се оптичка посматрања повезују са радио-ин-

терферометријским, односно, да се формира усаглашен радио-оптички систем координата захваљујући коме ће се појавити могућност одређивања положаја и кретања различитих објеката у јединственом координатном систему. Зато је задњих деценија наступила нагла преоријентација од посматрања вангалактичких маглина ка вангалактичким радио-изворима, који имају своје ликове у оптичком дијапазону. Десетине чланака с теоријама, практичним разрадама и посматрањима посвећена су проблемима везивања оптичког и радио-интерферометријског система.

Један од најпростијих начина за решавање овог задатка је упоређивање координата заједничких објеката оба система, добијене коришћењем, с једне стране метода оптичке астрометрије, а с друге, средствима радио-интерферометрије. Без обзира на привидну једноставност, овакав прилаз је везан са низом тешкоћа, као што је огромна разлика у сјају објеката ова два система. То захтева специфична решења, која искључују, или, у крајњој линији, умањују нагомиланање случајних и, посебно, систематских грешака везаних за величину објеката. Један од могућих путева за решавање овог проблема је коришћење посредничких система упоришних звезда, односно, вишестепено проширивање фундаменталног система на слабе вангалактичке изворе. Овакви системи треба да су одабрани сагласно са коришћењем инструмената у датој етапи:

- систем слабих звезда до привидне величине $m = 9$ у сегментима од 2 степена око радио-извора добијен из меридијанских посматрања;
- систем слабих звезда привидне величине 12 до 14 добијен средствима фотографске астрометрије;
- за крајње слабе радио-изворе користе се звезде привидне величине $m = 16$ до $m = 18$ у улози посредника, при чему ова два система слабих звезда треба да укључе звезде у областима до 0.5 степени око радио-извора.

Радио-оптички извори, тј. извори који зраче и у оптичком и у радио подручју, обично су оптички веома слаби. Мада њихове привидне величине не треба да буду слабије од 18^m , у списку 234 извора који је предложила Комисија 24 МАУ, гранична привидна величина је померена до 22^m . Јасно је да веза фундаменталног система FK5 са таквим изворима може бити само посредна и представимо је овим ланцем (Гуляев, 1987):

FRS – RS1 – RS2 – RS3 – RRS .

што је извор сјајнији, из ланца се једна карика може прескочити. По оваквој скали добијени су оптички положаји појединих, посебно интересантних радио-извора, као и мањих група од 4 - 5 извора. Обављена су и посматрања већих група радио-извора.

Карице повезивања оптичког и радио-система приказане у овом ланцу су следеће:

FRS — основни систем координата какав је, на пример, FK5. Координатни системи овог типа сматрају се практичном реализацијом инерцијалног система који се формира на бази апсолутних астрометријских, радио-интерферометри-

јских и других посматрања.

RS1 — упоришни системи координата првог реда који служе за решавање широког круга задатака позиционе астрономије, а делимично и задатака астрофотографских посматрања. Ови системи се реализују у виду изведених каталога, на пример, AGK3R, SRS и других који су састављени на основу релативних меридијанских посматрања.

RS2 — упоришни системи другог реда који у основном служе за масовно одређивање координата слабих објеката, изучавање кинематике звезданих система и друго. Ови системи се формирају фотографским методама, где се за упоришне објекте узимају звезде чије су координате познате у системима RS1. Као промер за овакве системе може се навести AGK3.

RS3 — упоришни системи трећег реда. Користе се за одређивање координата врло слабих објеката ($m > 12$), на пример, квазара. При формирању RS3, а у зависности од типа инструмента, користе се упоришни системи RS1 или RS2.

R.R.S — радио-интерферометријски систем координата, добијен из радио-посматрања вангалактичких објеката.

Поред наведених, могу се разматрати још неки системи координата који не улазе у овај ланац. На пример, RSS — упоришни системи специјалне намене. Затим, могу се узети системи координата који служе за одређивање параметара Земљине ротације на основу астрономских података добијених из посматрања. Такође и системи координата који служе за обраду путања вештачких сателита и друго.

У последњих десетак година развијена је врло широка активност на реализацији везе између оптичког и радио-система координата. Ради повећања тачности оптичких положаја, извршена су специјална меридијанска посматрања посредних звезда класе RS2. На Вашингтонској опсерваторији је посматрано 120 звезда у околини 11 радио-извора. Посматран је низ звезда у околини радио-извора на опсерваторијама у Брорфелду, Херстмонсоу, на острву Палма. На вертикалном кругу Кијевске опсерваторије добијени су положаји 254 звезда (из AGK3 и SAO) у околини радио-извора.

У последње време све се више посматрају и радио-звезде која омогућавају везу два система без посредничких посматрања. Како би се посматрања могла користити за повезивање система, за радио-звезде су постављени следећи услови: фотографска магнитуда треба да је $m < 11$, затим, да немају суседе у околини од $0''.3$ до $15''.0$ и да им је слаба променљивост. Нажалост, таквих радио-звезда нема много. На пример, до 1982. године било је познато 143 радио-звезде, а постављене услове је задовољавало само них око тридесетак. Сем тога, нема гаранције да се оптички и радио-положаји оваквих звезда поклапају на нивоу $0''.001$, што је један од основних услова за радио-изворе који се користе у повезивању оптичког и радио-интерферометријског координатног система.

5. Допринос Београдске опсерваторије

Овој међународној активности допринела је и Астрономска опсерваторија

у Београду урадивши положаје упоришних звезда у околини радио-извора који припадају класи RS2. Из Кијева је добијен списак од 315 звезда распоређених у 87 сегмената са радио-изворима у зони -44° до $+90^\circ$ (Лазоренко, 1982). Године 1987. завршена су посматрања 290 звезда распоређених у 78 сегмената са радио-изворима и 198 звезда из FK5. Положаји су добијени из посматрања урађених на Меридијанском кругу Београдске опсерваторије релативном методом (Сацаков et al. 1991). Грешка једног посматрања износи $\pm 0^{\text{m}}.024 \text{ sec}\delta$ за ректасцензију и $\pm 0^{\text{m}}.30$ за деклинацију. С обзиром да је свака звезда у просеку посматрана 5.5 пута по ректасцензији, односно, 5.6 по деклинацији, грешке положаја у Београдском каталогу су $\pm 0^{\text{m}}.010 \text{ sec}\delta$ за ректасцензију и $\pm 0^{\text{m}}.13$ за деклинацију. Поређења са AGK3 и са Кијевским каталогом (деклинација) показују да су добијени задовољавајући резултати.

Астрономска опсерваторија у Београду наставља са учешћем у одређивању положаја упоришних звезда у околини радио-извора. Наиме, на београдском Меридијанском кругу се увелико раде посматрања 488 звезда у деклинацијској зони од -30° до $+30^\circ$. Овај посматрачки програм је део међународне листе која је састављена на Кијевској опсерваторији. За основу ове листе (за коју се предлаже ознака RRS2) узет је списак 238 радио-извора. Општи број звезда је 2575 за цело небо. Овде је такође укључено 38 радио-звезда доступних за визуелна посматрања, којих нема у FK5. Око 25% звезда улазе у списак IRS, а 340 звезда се налазе у каталогу GC.

Распоред звезда по ректасцензији је мање-више равномеран (у оквиру једног часа). На северној полулопти се налази 63% звезда. Средња визуелна привидна величина је 8.5, а 12% звезда је слабије од $m = 9$. Средњи број звезда на сваком сегменту који садржи радио-извор износи 11 што се може сматрати довољним за редукацију плоче снимљене на инструменту малог поља.

Учешћем у овом и ранијем међународном пројекту Београдска опсерваторија даје одређени допринос задатку повезивања оптичког координатног система, чији је за сада стандард FK5 (ниво тачности $0^{\text{m}}.05$), и радио-интерферометријског система (ниво тачности $0^{\text{m}}.001$) у јединствен радио-оптички систем координата за који се вангалактички радио-извори користе као упоришни објекти.

Референце

- Губанов, В. С., Финкелшtein, А. М., Фридман, П. А.: 1983, *Введение в радиоастрометрию*, Наука, Москва, 9-25.
 Гуляев, А. П.: 1987, *Итоги науки и техники, Серия Астрономия*, 30, 89.
 Лазоренко, П. Ф.: 1982, *Астрометрия Астрофиз.*, 46, 73.
 Sadžakov, S., Dačić, M., Cvetković, Z.: 1991, *Astron. J.*, 101(2), 713.

**DETERMINATION OF STELLAR POSITIONS IN THE VICINITY
OF RADIO SOURCES**

MIODRAG DAČIĆ, SOFIJA SADŽAKOV AND
ZORICA CVETKOVIĆ

Astronomical Observatory, Volgina 7, 11050 Belgrade

Abstract. As a consequence of high precision of long-baseline radio interferometry and the possibility of observation of extragalactic radio sources, radio-astrometry has quickly developed in recent years. The need to link the existing and future optical observations with radio-interferometric work is evident. The Astronomical Observatory in Belgrade contributes to the international campaign with the objective to establish an unified reference system, by observations of stars whose positions can help to link optical and radio-interferometric work.