

Построение уточненной версии небесной системы координат из глобальной обработки РСДБ-сессий 1979–2019 гг.

© С. Л. Курдубов, С. М. Миронова,
В. С. Губанов, Е. А. Скурихина

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Произведено глобальное уравнивание РСДБ-наблюдений за период 1979–2019 гг. с целью построения уточненной версии небесной системы координат. В качестве глобальных параметров определялись координаты радиоисточников и координаты станций; параметры вращения Земли определялись как локальные параметры. Параметры рассинхронизации часов станций и влажная компонента тропосферной задержки рассматривались как стохастические сигналы метода среднеквадратической колокации. Построенный каталог сравнивался с каталогами других центров, а также с последней реализацией небесной системы координат ICRF3.

Ключевые слова: радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, небесная система координат.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.50.51-57>

Введение

В настоящее время небесная система координат реализуется каталогом радиоисточников ICRF3. Каталог ICRF3 [1] был создан на основе обработки РСДБ-сессий и рекомендован рабочей группой Международного астрономического союза (МАС). Рабочая группа МАС не публикует рабочий каталог регулярно, а рекомендует центрам анализа обновлять каталоги 4 раза в год, добавляя результаты новых РСДБ-сессий и уточняя априорные данные. Кроме того, после каждого уточнения априорных каталогов центрам анализа рекомендуется уточнять реализацию земной системы координат.

В данной работе представлен каталог радиоисточников по результатам обработки РСДБ-сессий в центре ИПА РАН и проведено сравнение с каталогами других центров.

Характеристики глобального решения

Для построения каталога радиоисточников были использованы РСДБ-сессии за период 1979–2019 гг. (всего более 11 млн задержек). Обработка проводилась программой QUASAR [2]. В глобальном решении уточнялись координаты 4213 источников и координаты 159 станций (включая 33 станции, имеющие скачки координат вследствие смещения, ремонта и т. д.). На опорные источники из каталога ICRF2 были наложены условия отсутствия вращения и сдвига.

В целом в глобальном уравнивании определялись следующие группы локальных (определяемых из каждой РСДБ-сессии отдельно) и глобальных (определяемых один раз по всем наблюдениям) параметров:

1. Координаты станций (глобальные);
2. Координаты источников (глобальные);
3. Параметры вращения Земли (локальные);
4. Тропосферная задержка (локальные);
5. Рассинхронизация часов (локальные);
6. Тропосферные градиенты (локальные).

На рис. 1 изображены формальные ошибки полученных координат радиоисточников по прямому восхождению (рис. 1а) и по склонению (рис. 1б) в зависимости от количества использованных задержек. Обе величины изображены в логарифмическом масштабе, так как при уменьшении количества наблюдений радиоисточника резко возрастает среднеквадратическое отклонение (СКО) его координат.

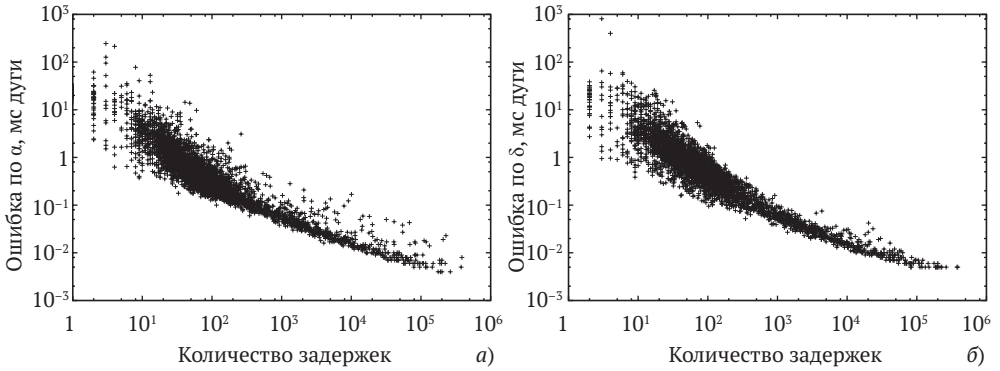


Рис. 1. Формальная ошибка по прямому восхождению — а и склонению — б в зависимости от количества задержек

Сравнение построенного каталога радиоисточников с каталогами других центров анализа

Для анализа построенного каталога Iaa были взяты рекомендованные реализации небесной системы координат (каталоги ICRF2, ICRF3), последние версии каталогов до 2016 г. других центров анализа. Ниже приведены названия каталогов, центры анализа и используемые интервалы наблюдений:

- bkg2017a (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 1984–2017);
- asi2018a (Matera CGS, 1984–2016);
- aus2018a (Geoscience Australia, 1980–2017);
- opa2019a (L'Observatoire de Paris);
- usn2016a (U. S. Naval Observatory).

Было проведено сравнение общих радиоисточников в построенном и сравниваемых каталогах. Из рис. 1 видно, что формальные ошибки координат радиоисточников, наблюдаемых менее 1000 раз, оказались, как правило,

больше 0.1 мс дуги; поэтому из дальнейшего анализа они были исключены. В табл. 1 представлены разности между экваториальными координатами (α , δ) радиоисточников из построенного каталога, каталога ICRF3 и сравниваемых каталогов. Из анализа СКО разностей видно, что построенный каталог близок к каталогам **bkg2017a**, **opa2017a**, **usn2016a**, а также к каталогу ICRF3. СКО разности с каталогом ICRF2 существенно больше и достигает сотен мкс дуги по обеим координатам.

Т а б л и ц а 1

Разности между экваториальными координатами каталогов радиоисточников

Первый каталог	Второй каталог	Количество источников	$\overline{\Delta\alpha \cos \delta}$, мкс дуги	$\overline{\Delta\delta}$, мкс дуги	СКО $\Delta\alpha \cos \delta$, мкс дуги	СКО $\Delta\delta$, мкс дуги
Iaa	asi2018a	42	-12	-98	155	568
Iaa	aus2018a	517	25	19	185	460
Iaa	bkg2017a	481	2	8	46	68
Iaa	opa2019a	516	4	15	47	65
Iaa	usn2016a	517	4	7	48	72
Iaa	ICRF2	517	4	25	101	164
Iaa	ICRF3	517	3	12	42	60
ICRF3	asi2018a	42	-3	-107	150	582
ICRF3	aus2018a	549	21	9	187	446
ICRF3	bkg2017a	512	-1	-5	50	52
ICRF3	opa2019a	548	2	3	31	60
ICRF3	usn2016a	549	1	-3	52	56

Систематические разности

Разложение разностей между каталогами по компонентам сферических функций — традиционный способ определить систематическую погрешность каталогов. Разложение разностей между экваториальными координатами радиоисточников по сферическим гармоникам C_n^m , S_n^m в данной работе осуществляется согласно формулам, приведенным ниже. В приведенных ниже уравнениях α , δ_0 — экваториальные координаты источников, $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$ — разности между координатами одного и того же источника. C_n^m , S_n^m — сферические функции, P_n^m — присоединенный полином Лежандра, где m — порядок гармоники, n — степень гармоники. $a_{\alpha, mn}$, $b_{\alpha, mn}$, $a_{\delta, mn}$, $b_{\delta, mn}$ — коэффициенты разложения по сферическим гармоникам.

$$\Delta\alpha \cos \delta(\alpha, \delta) = \sum_{m,n=1}^N a_{\alpha, mn} C_n^m + \sum_{m,n=1}^N b_{\alpha, mn} S_n^m$$

$$\Delta\delta(\alpha, \delta) = \sum_{m,n=1}^N a_{\delta, mn} C_n^m + \sum_{m,n=1}^N b_{\delta, mn} S_n^m,$$

$$C_n^m(\alpha, \delta) = \sqrt{\frac{2n+1}{4\pi}} \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \cos(m\alpha) P_n^m(\cos \delta),$$

$$S_n^m(\alpha, \delta) = \sqrt{\frac{2n+1}{4\pi}} \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \sin(m\alpha) P_n^m(\cos \delta),$$

где $|m| \leq n$, $n \geq 0$, $0 \leq \alpha \leq 2\pi$, $0 \leq \delta \leq \pi$, $\delta = \delta_0 + \frac{\pi}{2}$,

$$P_n^m = (-1)^m (1-x^2)^{\frac{m}{2}} \frac{\partial^m}{\partial x^m} P_n(x),$$

$$P_n = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-v)_k (v+1)_k}{(k!)^2} \left(\frac{1-x}{2}\right)^k.$$

Коэффициенты разложения разностей координат построенного каталога и ICRF2/ICRF3 по компонентам сферических гармоник до 4-й степени представлено в табл. 2.

Средние разности и СКО разностей между координатами источников после удаления систематической ошибки, представленной разложениями по сферическим гармоникам до 4-ого и 15-ого порядков соответственно, приведены в табл. 3. Из табл. 3 видно, что средние разности по обеим координатам после удаления систематической части оказываются близкими к нулю. СКО разности с ICRF2 составляет 30–60 мкс дуги. СКО разности с ICRF3 оказывается несколько меньше и равно 20–40 мкс дуги. На рис. 2 графически изображены суммы компонент сферических гармоник до 4-ого порядка разности построенного каталога с ICRF3 (по прямому восхождению и склонению).

Таблица 2

Коэффициенты при сферических гармониках, мкс дуги

каталог	индекс i	$a_{i,10}$	$a_{i,11}$	$a_{i,20}$	$a_{i,21}$	$a_{i,22}$	$a_{i,30}$	$a_{i,31}$	$a_{i,32}$	$a_{i,33}$
ICRF2	α	-9	67	-12	-40	-21	-4	18	-16	-18
ICRF2	δ	52	-70	-2	32	-45	-40	-37	-33	17
ICRF3	α	-3	-115	-12	-40	12	-4	-13	-14	1
ICRF3	δ	-55	9	-14	69	-10	38	2	-5	4
каталог	индекс i	$b_{i,10}$	$b_{i,11}$	$b_{i,20}$	$b_{i,21}$	$b_{i,22}$	$b_{i,30}$	$b_{i,31}$	$b_{i,32}$	$b_{i,33}$
ICRF2	α	0	0	-43	0	51	-17	-21	-17	-5
ICRF2	δ	0	0	-17	0	46	3	-36	37	-1
ICRF3	α	0	0	30	0	55	-8	5	-3	9
ICRF3	δ	0	0	48	0	103	-8	6	11	18

Разница между каталогами до и после удаления систематической ошибки

	Второй каталог	$\overline{\Delta\alpha \cos \delta}$, мкс дуги	$\overline{\Delta\delta}$, мкс дуги	СКО $\Delta\alpha \cos \delta$, мкс дуги	СКО $\Delta\delta$, мкс дуги
Iaa	ICRF2	4	25	101	164
Iaa	ICRF3	3	12	42	60
Iaa	ICRF2 без C_4^4, S_4^4	5	14	53	64
Iaa	ICRF3 без C_4^4, S_4^4	1	7	31	40
Iaa	ICRF2 без C_{15}^{15}, S_{15}^{15}	0	0	38	35
Iaa	ICRF3 без C_{15}^{15}, S_{15}^{15}	0	-1	22	32

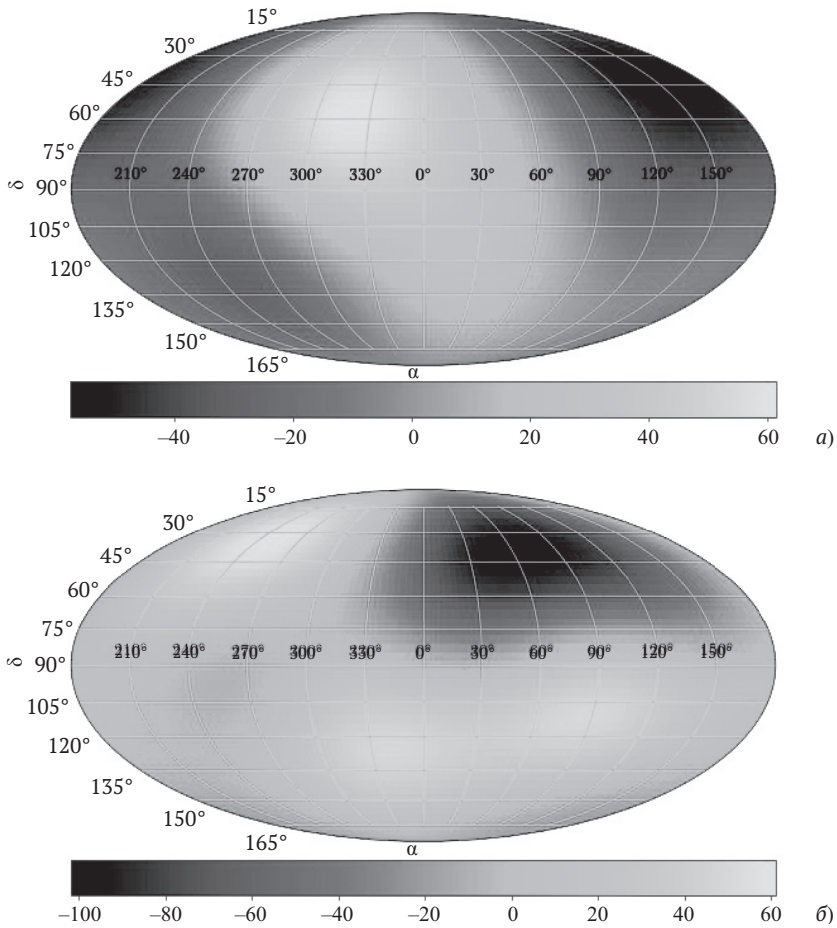


Рис. 2. Сумма сферических гармоник (до 4-й степени) разности построенного каталога и каталога ICRF3 по прямому восхождению — а и по склонению — б

На рисунках изображены развертки сферы, на которой точками различных оттенков серого отмечены суммы всех гармоник до 4-й степени. На рис. 2а заметно увеличение разностей в области между 300° и 360° по прямому восхождению и между 45° и 90° по склонению. На рис. 2б подобных областей несколько. В северном полушарии наблюдается область с отрицательными разностями между 30° и 90° по прямому восхождению и между 30° и 60° по склонению. В южном полушарии разности преимущественно положительные.

Заключение

Построена очередная реализация небесной системы отсчета. Точность составленного каталога сопоставима с точностью каталогов других центров анализа.

Выполнено разложение разностей координат построенного каталога и ICRF2/ICRF3 в виде компонент сферических гармоник. После удаления систематической части среднеквадратическое отклонение разности между построенным каталогом и ICRF3 улучшилось более чем в 1.5 раза.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квazar-КВО» и ЦКП «Суперкомпьютерный центр «Высокопроизводительные вычисления в радиоастрометрии и космической геодезии».

Литература

1. RESOLUTION B2 on the third realization of the international celestial reference frame. Thirtieth General Assembly. Resolutions presented to the XXXth General Assembly // Proc. XXX IAU General Assembly. — International Astronomical Union: 2019. — Vol. XXXB. — 2 p.

2. Karbon M., Nothnagel A. Realization of a multifrequency celestial reference frame through a combination of normal equation systems // Astronomy & Astrophysics. — 2019. — Vol. 630. — no. A101. — 14 p.

3. Курдубов С. Л., Губанов В. С. Основные результаты глобального уравнивания РСДБ-наблюдений // Письма в астрономический журнал. — М.: Наука, 2011. — Т. 37. — № 4. — С. 294–302.

4. Nothnagel A., Artz T., Behrend D., Malkin Z. International VLBI service for geodesy and astrometry — delivering high-quality products and embarking on observations of the next generation // Journal of Geodesy. — 2017. — Vol. 91, no. 7. — P. 711–721.

5. Schüler T., Plötz C., Phogat A. BKG CVC — The central VLBI observation coordination office of the federal agency for cartography and geodesy at the geodetic observatory wetzell // IVS 2018 General Meeting Proceedings. — NASA/CP-2019-219039. — 2018. — P. 135–139.

6. Frouard J., Johnson M. C., Fey A., Makarov V. V., Dorland B. N. Toward the ICRF3: astrometric comparison of the USNO 2016A VLBI solution with ICRF2 and Gaia DR1 // The Astronomical Journal. — 2018. — Vol. 155, no. 6. — 11 p.

A New Version of the Celestial Reference Frame from the Analysis of the 1979-2019 VLBI Observations

S. L. Kurdubov, S. M. Mironova, V. S. Gubanov, E. A. Skurikhina

A global solution has been made as a result of the VLBI observations which took place from 1979 to 2019 with the purpose to create an improved version of the celestial coordinate system. Coordinates of the radio sources and stations were chosen to be the global parameters, and the EOP data were considered to be the local parameters respectively. The station clock desynchronisation parameters and the wet component of the tropospheric delays were accounted as the stochastic signals when the mean squares collocation method was used. The updated catalogue was compared with the catalogues of other centers and with the ICRF3.

Keywords: Very Long Baseline Interferometry, celestial reference frame.