

УДК 521.9

Работы по сравнению и комбинации каталогов координат радиоисточников в Пулковской обсерватории

Ю.Р. Лопез, З.М. Малкин

ФГБУН Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Пулковское шоссе, 65,
Санкт-Петербург, Россия, 196140
yulia.lopez@outlook.com, malkin@gaoran.ru

Поступила в редакцию 19 ноября 2017 г.

Аннотация. Описан опыт работ по сравнению и комбинации каталогов координат радиоисточников в Пулковской обсерватории (ГАО РАН) в 2006–2017 гг. Принятая процедура построения сводного каталога включает два этапа. Сначала разности между исходными каталогами и улучшаемой небесной системой отсчета ICRF (ICRF2) представляются рядом сферических функций по методу Броше. Затем каждый каталог исправляется за найденные разности (системы исходных каталогов), и исправленные каталоги усредняются. После этого усредняются вычисленные на первом этапе системы исходных каталогов, и полученная средняя система рассматривается как систематические поправки к исходной системе каталога ICRF. Сложение средней системы с каталогом, полученным на первом этапе, дает в результате окончательный сводный каталог. Первый пулковский сводный каталог был составлен в 2006 г. и позволил существенно улучшить точность определения всемирного времени и координат небесного полюса. Второй каталог был составлен в 2013 г. и позволил предварительно оценить систематические ошибки каталога ICRF2. Третий каталог 2016 г., описанный в настоящей работе, позволил уточнить эти ошибки.

RESEARCHES OF THE PULKOVO OBSERVATORY ON COMPARISON AND COMBINATION OF RADIO SOURCE POSITION CATALOGS, *by Yu.R. Lopez and Z.M. Malkin.* The paper describes works of the Pulkovo Observatory in the field of comparison and combination of radio source position catalogs in 2006–2017. Adopted procedure of the construction of the combined catalog consists of two stages. First, the difference between input catalogs and the celestial reference system ICRF (ICRF2) is presented in a series of spherical functions using the Brosche method. Each catalog is then corrected for the found differences (catalog system) and the corrected catalogs are averaged. Then the input catalog systems obtained at the first stage are averaged, and the resulting average system is considered to be systematic correction to the ICRF catalog. The addition of the average system to the catalog obtained at the first stage results in a final combined catalog. The first Pulkovo combined catalog was computed in 2006 and it allowed us to substantially improve the accuracy of computation of the Universal Time and celestial pole coordinates. The second catalog was computed in 2013 and it allowed us to get preliminary estimates of the systematic errors of the ICRF2 catalog. The third catalog of 2016 described in this paper made it possible to get more reliable estimates of these errors.

Ключевые слова: небесная система координат, каталоги координат радиоисточников, систематические ошибки каталогов, сводный каталог

1 Введение

Наиболее точными реализациями небесной системы координат в классической астрометрии были фундаментальные каталоги, полученные путем комбинации индивидуальных (входных) каталогов. При этом исследование и учет систематических разностей между входными каталогами является необходимым этапом в процессе построения комбинированного (сводного) каталога. Как правило, систематические разности между каталогами координат звезд или радиоисточников имеют сложную структуру и для их адекватного описания должны использоваться методы, хорошо известные из практики оптической астрометрии. В основном эти методы основаны на разложении разностей между каталогами по некоторой системе ортогональных функций.

Однако в течение многих лет при сравнении каталогов координат радиоисточников использовалась модель простого вращения, иногда (достаточно произвольно) дополненная несколькими членами (см., например, Ариас и др., 1995; Ариас и Буквиллон, 2004; Болотин и Литвин, 2008; Ламбер и Гонтье, 2009). Исторически это было вызвано тем, что число источников в первых каталогах было невелико, что не позволяло применять более строгие методы. Однако к середине 2000-х годов число источников в каталогах существенно возросло, что дало возможность начать исследования по применению к их анализу методов классической астрометрии.

Впервые такие работы были начаты в Пулковской обсерватории (ГАО РАН), и их результатом стал сводный каталог PUL(2006) (Соколова и Малкин, 2007). При составлении этого каталога были выявлены существенные систематические ошибки каталога ICRF (Ма и др., 1998) на уровне 200–250 микросекунд дуги (мксд). Применение этого каталога при регулярной обработке РСДБ-наблюдений позволило существенно улучшить точность определения всемирного времени и координат небесного полюса.

Второй пулковский сводный каталог PUL(2013) (Соколова и Малкин, 2014) был составлен в 2013 г. При создании этого каталога определялись поправки к каталогу ICRF2 (Фай и др., 2015), принятому в качестве опорной небесной системы отсчета МАС в 2009 г. Другим отличием этого каталога от каталога 2006 г. было использование корреляционной информации из входных каталогов. В результате этой работы были получены предварительные оценки систематических ошибок ICRF2.

Ниже приводятся результаты дальнейшей работы по этой теме, одним из основных результатов которой явился третий пулковский сводный каталог PUL(2016).

2 Пулковский сводный каталог координат радиоисточников

Для составления нового сводного каталога координат радиоисточников были использованы шесть входных каталогов, полученных в различных центрах анализа РСДБ-наблюдений Международной службы РСДБ для геодезии и астрометрии (IVS, Шу и Бехренд, 2012) в 2016 г. Хотя при вычислении этих каталогов были использованы одни и те же наблюдения из центра данных IVS, различия в выборке наблюдений и источников, а также в программном обеспечении и стратегии анализа данных на практике приводят к существенным систематическим разностям между каталогами (Соколова и Малкин, 2007, 2014).

Из шести каталогов три были вычислены с применением пакета программ Calc/Solve в Государственном агентстве по картографии и геодезии ФРГ (каталог, обозначенный ниже как BKG), в Центре космических полетов им. Годдарда, НАСА, США (каталог GSF) и в Морской обсерватории США (каталог USN). Три других каталога были вычислены с другими пакетами: каталог AUS получен в Центре наук о Земле Австралии с пакетом Ossam, каталог IAA получен в Институте прикладной астрономии РАН с пакетом QUASAR и каталог IGG получен в Венском техническом университете (Австрия) с пакетом VieVS. Каталоги AUS, BKG, GSF и USN открыто доступны в центре данных IVS или на сайтах центров анализа. Каталоги IAA и IGG были любезно предоставлены их авторами специально для этой работы.

Систематические разности между входными каталогами и ICRF2 представлены на рис. 1. Здесь и ниже все разности для прямых восхождений даны в виде $\Delta\alpha^* = \Delta\alpha \cos \delta$.

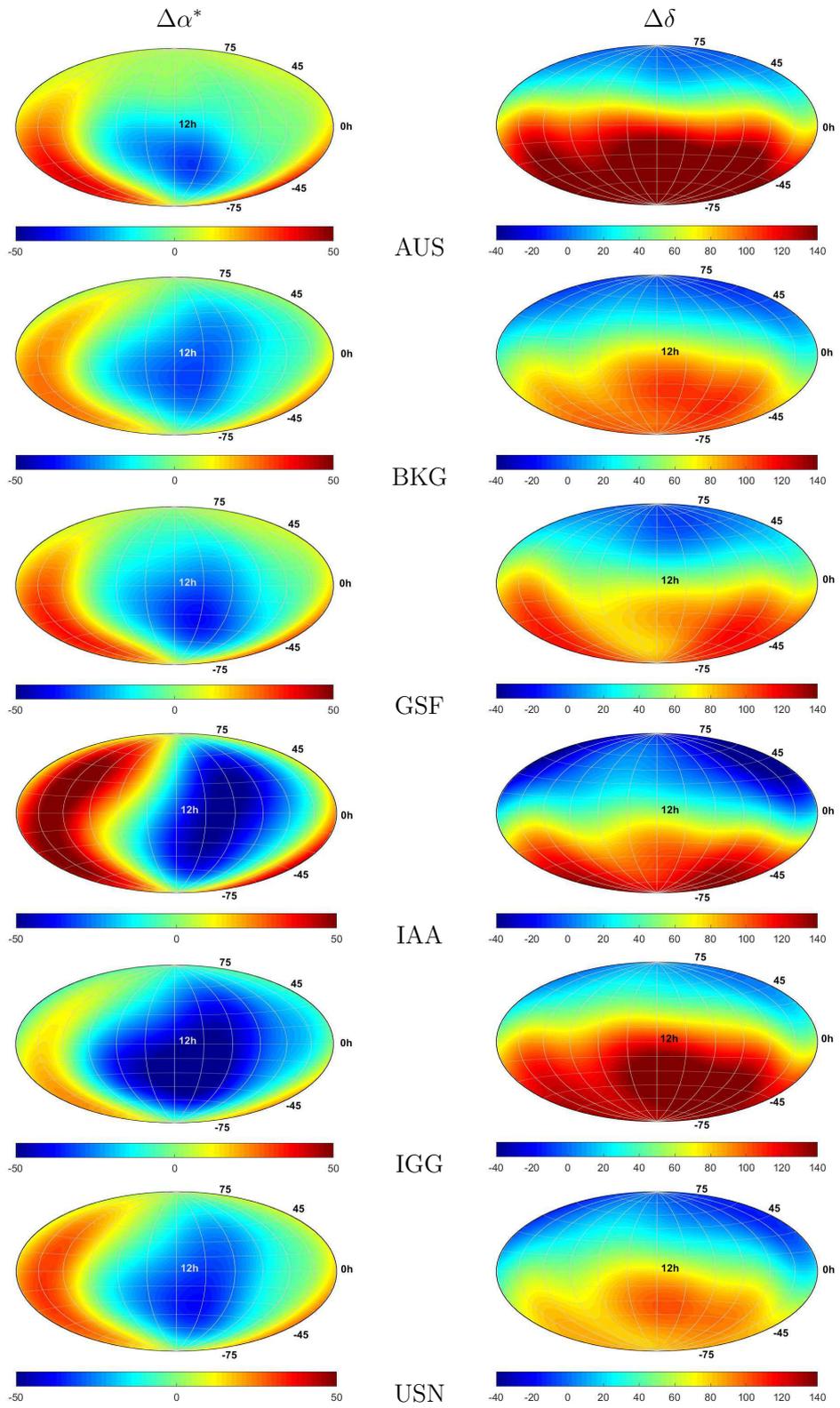


Рис. 1. Сглаженные разности между входными каталогами и ICRF2, мксд

Для представления систематических разностей мы использовали метод Броше разложения по ортогональным функциям (Броше, 1966) с некоторыми модификациями, касающимися методики определения максимального члена разложения и назначения весов входных каталогов. Разложение по методу Броше производится следующим образом:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\alpha^* \\ \Delta\delta \end{Bmatrix} = \sum_{j=0}^g b_j K_j(\alpha, \delta), \quad (1)$$

где b_j – коэффициенты разложения, которые находятся из анализа разностей координат в двух каталогах. Базисные сферические функции разложения имеют вид:

$$K_j(\alpha, \delta) = K_{nml}(\alpha, \delta) = \begin{cases} P_{n0}(\delta), & m = 0, \\ P_{nm}(\delta) \sin(m\alpha), & m \neq 0, l = 0, \\ P_{nm}(\delta) \cos(m\alpha), & m \neq 0, l = 1, \end{cases} \quad (2)$$

где $P_{n0}(\delta)$ – полиномы Лежандра, $P_{nm}(\delta)$ – присоединенные полиномы Лежандра.

Совокупность коэффициентов b_j для данного входного каталога назовем системой этого каталога по отношению к системе ICRF2. Набор этих коэффициентов один и тот же для всех пар (входной каталог минус ICRF2). Максимальное число членов разложения, определенное по критерию Фишера, применяемого к остаточным невязкам, составило 36.

В сводный каталог были включены источники, которые присутствуют по крайней мере в двух входных каталогах. Всего таких источников оказалось 4165, включая все 295 опорных (defining) источников ICRF2. Распределение источников сводного каталога по небесной сфере представлено на рис. 2

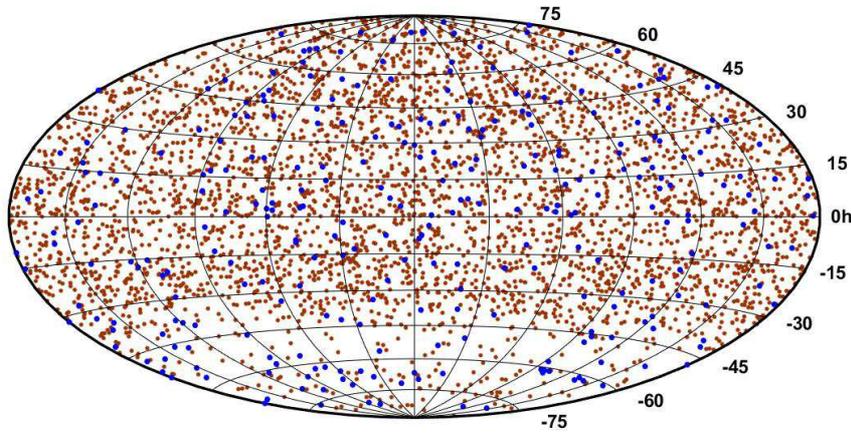


Рис. 2. Распределение источников сводного каталога по небесной сфере

Построение сводного каталога производилось в два этапа:

1. *Улучшение ICRF2 в случайном отношении.* Сначала каждый входной каталог был исправлен за систему этого каталога по отношению к ICRF2; таким образом каждый входной каталог был приведен в систему ICRF2. Затем координаты источников из входных каталогов, приведенных в систему ICRF2, были усреднены с весами, зависящими от ошибок координат во входных каталогах. Результирующий каталог Pul(2016)C1 является улучшением ICRF2 в случайном отношении. Сглаженные разности ICRF2–Pul(2017)C1 приведены на рис. 3. Сравнение каталога Pul(2017)C1 с ICRF2 показывает практически полное отсутствие систематических разностей между ними, что свидетельствует о корректности примененной процедуры.

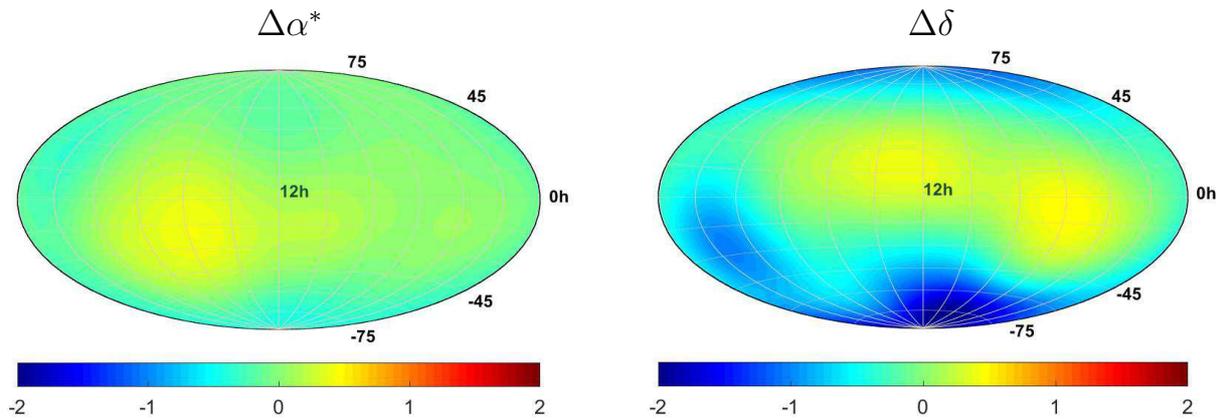


Рис. 3. Сглаженные разности ICRF2 – Pul(2017)C1, мксд

2. *Улучшение ICRF в систематическом отношении.* На этом этапе системы входных каталогов (наборы коэффициентов b_j) были усреднены с весами, зависящими от отклонения системы данного каталога от средней системы; практически веса составили от 0.35 до 1. После этого каталог Pul(2016)C1 был исправлен за среднюю систему. В результате получился окончательный сводный каталог Pul(2016)C2.

Детальное описание методики составления сводных каталогов координат радиоисточников в ГАО РАН могут быть найдены в (Соколова и Малкин, 2014).

Сглаженные разности ICRF2 – Pul(2017)C2 приведены на рис. 4. Сравнение сводного каталога с ICRF2 показывает наличие значительных систематических различий между ними, особенно для склонений источников южного полушария. Основной причиной этого может быть существенное увеличение числа наблюдений южных радиоисточников после 2009 г. (времени создания ICRF2), в том числе вследствие ввода в строй новых станций сети AuScope (Планк и др., 2017).

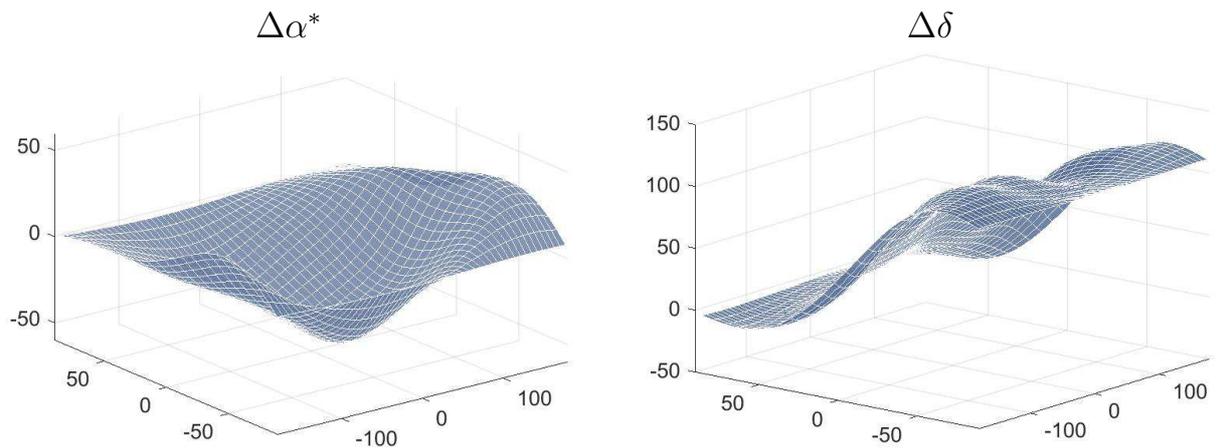


Рис. 4. Сглаженные разности ICRF2 – Pul(2017)C2, мксд

3 Заключение

В работе приведен обзор работ Пулковской обсерватории по сравнению и комбинации каталогов координат радиоисточников в 2006–2017 гг. и представлены последние результаты исследований в этой области. В течение этого периода была разработана и успешно применена на практике методика вычисления комбинированных каталогов координат радиоисточников, основанная на методах классической астрометрии. Были построены три сводных каталога: PUL(2006), PUL(2013), PUL(2016), каждый из которых позволил выявить систематические ошибки международной опорной небесной системы отсчета сначала первой реализации (ICRF), а позднее и второй реализации (ICRF2). Развитие методики продолжается.

Сравнение сводного каталога Pul(2016) с ICRF2 показывает присутствие значительных систематических разностей между ними на уровне десятков мксд, особенно для источников южного полушария. Поиск возможных причин появления этих ошибок требует отдельного исследования.

В рамках этой работы был также проведен детальный анализ зависимости взаимной ориентации систем каталогов от учета их корреляционной информации (Соколова и Малкин, 2013). Оказалось, что ориентация существенно зависит от учета или неучета полной корреляционной информации в используемых каталогах. Поэтому надо признать необходимым публикацию каталогов с полной ковариационной матрицей, что все еще не вошло в регулярную практику работы центров анализа РСДБ-наблюдений.

Литература

- Ариас и др. (Arias E.F., Charlot P., Feissel M., Lestrade J.-F.) // *Astron. Astrophys.* 1995. V. 303. P. 604.
- Ариас и Буквиллон (Arias E.F., Bouquillon S.) // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 422. P. 1105.
- Болотин и Литвин (Bolotin S., Lytvyn S.) // *Measuring the Future. Fifth IVS General Meeting / Eds Finkelstein A., Behrend D.* St. Petersburg: Nauka. 2008. P. 270.
- Броше (Brosche P.) // *Veroff. Astron. Rechen-Inst. Heidelberg.* 1966. N. 17.
- Ламбер и Гонтье (Lambert S.B., Gontier A.-M.) // *Astron. Astrophys.* 2009. V. 493. P. 317.
- Ма и др. (Ma C., Arias E.F., Eubanks T.M., et al.) // *Astron. J.* 1998. V. 116. P. 516.
- Планк и др. (Plank L., Lovell J.E.J., McCallum J.N., et al.) // *J. of Geodesy.* 2017. V. 91. P. 803.
- Соколова и Малкин (Sokolova Ju., Malkin Z.) // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 474. P. 665.
- Соколова Ю.Р., Малкин З.М. // *Вестник СПбГУ. Сер. 1.* 2013. Вып. 4. С. 146.
- Соколова Ю.Р., Малкин З.М. // *Письма в Астрон. журн.* 2014. Т. 40. С. 306.
- (Поправка: Соколова Ю.Р., Малкин З.М. // *Письма в Астрон. журн.* 2014. Т. 40. С. 879.)
- Фай и др. (Fey A.L., Gordon D., Jacobs C.S., et al.) // *Astron. J.* 2015. V. 150. id. 58.
- Шу и Бехренд (Schuh H., Behrend D.) // *J. of Geodynamics.* 2012. V. 61. P. 68.