

ICRF – СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И БЛИЖАЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Малкин З.М.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

В соответствии с решением МАС с 1998г. в качестве официальной реализации международной небесной опорной системы координат принят каталог координат радиоисточников ICRF (International Celestial Reference Frame), полученный из РСДБ-наблюдений. Поскольку со временем накопились новые материалы наблюдений, усовершенствовались алгоритмы и программы обработки данных, в 2005 г. была начата работа над созданием новой версии ICRF. В настоящей работе приводится краткая история создания ICRF2, основные этапы работы и полученные результаты.

1. Введение

Определение координат и движений небесных тел изначально было основной задачей астрометрии. В современной терминологии эта деятельность называется установлением небесной системы координат. Вообще говоря, любой независимый каталог положений звезд или других объектов определяет свою собственную систему координат. Для обеспечения единства измерений (в метрологической формулировке) на небе Международный астрономический союз (МАС) время от времени принимает решение о признании того или иного каталога в качестве официальной опорной небесной системы координат (НСК МАС). До конца XX века все НСК МАС базировались на фундаментальных каталогах звездных положений, последним из которых был FK5.

Однако, уже в 1970-х годах точность координат радиоисточников, определяемых из РСДБ-наблюдений достигла, а затем превысила 100 mas (мс дуги), т.е. точности лучших оптических каталогов. С 1980-х годов IERS (International Earth rotation and Reference systems Service) поддерживала собственную НСК, полученную на основе доступных каталогов координат радиоисточников. IERS взяла на себя эту задачу, поскольку она является уполномоченной организацией МАС по определению параметров вращения Земли (ПВЗ), а также земной и небесной опорных систем координат. Наконец, по решению XXIII Генеральной ассамблеи МАС 1997 г. в Киото были приняты новая НСК МАС ICRS (International Celestial Reference System) и ее реализация в виде каталога координат 608 радиоисточников ICRF (International Celestial Reference Frame), полученного в 1995 г. по РСДБ-наблюдениям S/X (2.3/8.4 ГГц) диапазонов (Ma и др. 1998). Каталог ICRF включал 212 опорных (defining) источников, собственно, задававших систему ICRF, и 396 прочих источников, обеспечивающих лучшее покрытие небесной сферы. Позднее были выпущены два расширения ICRF: ICRF-Ext.1 (1999) и ICRF-Ext.2 (2004) в системе ICRF. Последнее расширение содержало 717 источников. Точность ICRF на 2 порядка превышала точность FK5 (меньше 1 mas против 0.05–0.1" для FK5). Другой особенностью ICRF по сравнению с оптическими каталогами явилась независимость координат источников от времени. Во время создания ICRF не было возможности оценить ее систематические ошибки. Позднее выяснилось, что их амплитуда составляет около 0.2 mas (Sokolova и Malkin 2007).

Со времени создания ICRF было накоплено несколько миллионов новых и более точных наблюдений, появились новые астрометрические и геофизические модели и были разработаны новые алгоритмы обработки, реализованные в более совершенных версиях программного обеспечения для анализа РСДБ-данных. Также были накоплены новые результаты исследований ошибок координат радиоисточников и их зависимости

от длины волны. Все это позволило существенно повысить точность каталогов радиодисточников и, как следствие, выявило необходимость и возможность поставить вопрос о создании новой небесной системы координат ICRF2 (Ma 2005). При этом были поставлены следующие основные цели:

- Повышение точности в случайном и систематическом отношении;
- Увеличение числа источников и улучшение их распределения по небесной сфере;
- Расширение ICRF на другие диапазоны волн.

В настоящей работе приводится краткая история создания ICRF2, организация и основные этапы работы и полученные на сегодняшний день результаты.¹

2. Создание ICRF2

Для создания ICRF2 в 1996 г. были созданы две рабочие группы. Первая рабочая группа MAC должна осуществлять общую координацию работ по ICRF2, согласовывать список опорных источников, представить на ГА MAC 2009 каталог ICRF2 и проект соответствующих резолюций. Рабочая группа IERS/IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) призвана провести вычисление каталога ICRF2, включая все подготовительные исследования, и представить результат в IERS, IVS и рабочую группу MAC.

Надо отметить, что, фактически, подготовительная работа к созданию ICRF2 началась за несколько лет до официального начала деятельности этих рабочих групп. В рамках этой работы были составлена программа и начались специальные наблюдения (продолжающиеся и сейчас) источников южного полушария, что имеет первостепенное значение для увеличения числа южных источников и повышения точности из координат (Feu 2005, Ma 2005).

Как следует из распределения обязанностей, основная работа в течение прошедших трех лет происходила в рабочей группе IERS/IVS. Совместная работа сопровождалась активной перепиской (в архиве автора хранится около 200 отправленных и 600 полученных писем), а наиболее важные вопросы решались во время семинаров группы, происходивших 1-2 раза в год. Рабочей группой был намечен план исследований, необходимых для достижения вышеназванных целей и, в конечном счете, высокого качества будущей ICRF2. Ниже описываются основные этапы этой работы. Материалом для этих исследований послужили около 50 каталогов и 30 серий координат источников вычисленных в нескольких центрах обработки: Годдардский центр космических полетов НАСА (GSFC), USNO, Парижская обсерватория, ИПА РАН, ГАО НАНУ, ГАО РАН, ГАИШ, Geoscience Australia, Шанхайская обсерватория, Агентство картографии и геодезии Германии.

Выбор типа решения. До 1994 гг. IERS поддерживала НСК в виде сводного каталога координат радиодисточников, что соответствовало традициям оптической астрометрии. Однако с создания ICRF начался период, когда в качестве НСК MAC принимался каталог, построенный в одном центре обработки (GSFC для ICRF, USNO для ICRF-Ext.2). Сторонники сводного каталога, к которым принадлежит и автор, ссылаются на большой положительный опыт оптической астрометрии в создании фундаментальных каталогов. Сторонники одиночного каталога основывают свою точку зрения на том факте, что центры анализа РСДБ-наблюдений очень неравноценны в смысле

¹ Статья содержит материалы доклада, прочитанного на конференции Пулково-2009. За время, прошедшее после конференции, работа над ICRF2 была завершена, и результат был представлен на Генеральной ассамблее MAC в августе 2009 г. в Рио-де-Жанейро. ГА MAC приняла резолюцию В3, которая предусматривает использование ICRF2, начиная с 1 января 2010 г. Окончательная версия ICRF2 представлена на <http://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/icrf2/icrf2.html>.

реализации наиболее точных моделей редукции и вычислительных алгоритмов, и совместная обработка плохих и хороших результатов приведет только к ухудшению окончательного решения. Кроме того сторонники второй точки зрения указывают, что в отличие от оптической астрометрии все РСДБ-центры обрабатывают одни и те же наблюдения, и следовательно, результаты обработки существенно коррелированы. В результате было решено, что каталог ICRF2 будет вычисляться в GSFC.

Отбор данных. В этой части работы решались два вопроса. Первый заключался в том, следует ли принимать в обработку все имеющиеся наблюдения с 1979 г. или следует отбросить ранние наблюдения как менее точные. В частности, рассматривались варианты использования наблюдений с 1984 и 1990 г. Наш анализ (Малкин 2006) показал, что с точки зрения однородности наблюдательного материала следует использовать наблюдения с 1993 г. Но с другой стороны, отбрасывание ранних наблюдений может привести к потере данных для ряда источников, которые мало наблюдались в последние годы. В результате обсуждения и тестовых вычислений было решено использовать на этом этапе все имеющиеся наблюдения.

Вторым вопросом для обсуждения было использование материалов наблюдений по обзорам VCS (VLBA Calibrator Survey), осуществленным NRAO и GCFC. В результате 6 таких обзоров были определены координаты более 2000 источников, не наблюдавшихся в программах IVS. Поскольку эти источники наблюдались, в большинстве случаев, в одной сессии, точность их координат сравнительно невысока. С другой стороны для ряда мало наблюдавшихся источников наблюдения VCS дают существенную добавку к наблюдательному материалу. После обсуждения было решено вычислить два варианта каталога ICRF2: с источниками VCS и без них для дальнейшего изучения.

Исследование ошибок обработки. Хотя при обработке наблюдений для ICRF2 применяются новейшие геофизические и астрономические модели, получаемые координаты радиоисточников существенным образом зависят от математических процедур, в первую очередь от набора определяемых параметров. Не имея возможности вдаваться в подробности, отметим, что при обработке РСДБ-наблюдений производится совместное решение задачи МНК для нескольких тысяч 24-часовых сессий наблюдений. При этом приходится решать систему уравнений с числом параметров доходящих до миллиона и более. Координаты радиоисточников определяются одновременно с координатами станций и ПВЗ. При этом координаты источников и станций могут определяться как единые для всего многолетнего массива наблюдений, так и для каждой сессии с последующим усреднением. Подлежат также определению параметры разности часов станций, тропосферные параметры, иногда ошибки геометрии антенн и др. Кроме того, на ряд параметров накладываются различные условия, исходя из их астрономической или физической сущности. Понятно, что этот процесс оставляет практически неограниченные возможности для вариантов вычисления каталогов. Как показывает опыт, от выбора набора параметров могут существенным образом зависеть случайные, а главное, систематические ошибки получаемого каталога. Положение значительно усложняется тем, что, в отличие от звезд, радиоисточники имеют, как правило, сложную структуру, к тому же часто переменную во времени, что приводит к неопределенности мгновенного центра радиояркости и, таким образом, каталожного положения источника. Наиболее неприятным является нелинейность изменений видимых координат источника, вызванных изменениями его структуры. Такие нестабильные источники, будучи включенными в глобальную обработку, могут исказить другие определяемые параметры, и их следует обрабатывать отдельно для каждой сессии. Вариантом обработки таких источников является представление его координат в виде B-сплайна.

Перед выбором окончательной стратегии вычисления ICRF2 исследовались несколько вариантов обработки такие, как определение источников с нестабильным по-

ложением, определение координат станций из глобального решения или для каждой сессии, влияние ошибок геометрии антенны, учет тропосферы и др. В результате сравнительного анализа каталогов, вычисленных в различных вариантах обработки выяснилось, что систематические разности между большинством тестовых каталогов не превышает 0.02-0.03 mas, за исключением влияния тропосферных градиентов (отсутствия зенитной симметрии рефракции), которое превышает 0.5 mas. Последнее, впрочем, было известно и раньше, но в рамках работы над ICRF2 был уточнен метод учета этого эффекта.

Выбор опорных источников. Состав опорных источников, определяющих систему ICRF, имеет первостепенное значение для ее точности и стабильности во времени. Отбор опорных источников производился по нескольким критериям:

1. переменность координат источника, определяемая из анализа серий координат источников, вычисленных для каждой сессии наблюдений;
2. переменность структуры источника, определяемая по его картам на ряд эпох;
3. изменение ориентации совокупности опорных источников со временем, определенное на основе переменности его координат.

При использовании первого критерия для источников, имеющих достаточное для статистики число наблюдений, вычисляются различные индексы нестабильности: видимая скорость, среднеквадратичное отклонение от среднего, вариация Аллана и др. Проблема заключается в большом разбросе значений этих индексов для разных серий координат, даже полученных в одном центре обработки, но разными методами (рис. 1).

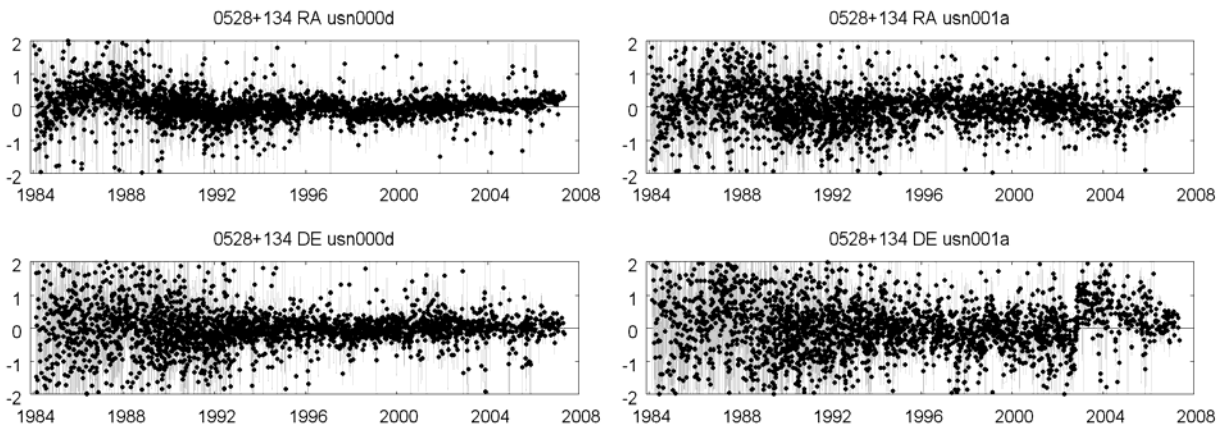


Рис. 1. Два ряда координат источника 0528+134 (уклонения от среднего значения), вычисленные в USNO: usn000d (слева) и usn001a (справа). RA – $\Delta\alpha \cdot \cos\delta$, DE – $\Delta\delta$, mas.

В результате, окончательный выбор опорных источников был осуществлен по третьему критерию, развитому в (Lambert и Gontier 2009). Новым эффективным подходом также оказалось использование астрофизической информации о радиоисточниках для их отбора в качестве опорных (Жаров и др. 2009), но это исследование было сделано после окончания основной работы над ICRF2.

К настоящему времени определено, что основу ICRF2 составит каталог gsf008a, вычисленный в мае 2009 г. в GSFC. Окончательный каталог ICRF2 будет получен в Парижской обсерватории после перевода gsf008a в систему ICRS. Предполагается, что такой перевод будет произведен простым поворотом осей gsf2008a по некоторому набору общих источников каталогов ICRF и gsf2008a, причем угол поворота ожидается небольшим.

3. Сравнение ICRF2 с ICRF

Сравнение основных характеристик ICRF и ICRF2 приведено в табл. 1. Данные в строке "Порог ошибки" требуют пояснений. Дело в том, что координаты радиоисточников, получаемые методом наименьших квадратов, при большом числе наблюдений зачастую имеют формальную ошибку на уровне единиц μas (мкс дуги), что конечно не соответствует реальной точности положений источников. Поэтому, как при создании ICRF, так и при создании ICRF2 в GSFC был проведен специальный анализ для оценки реальной точности координат, приводимых в каталоге. На основе этого анализа определялся порог ошибки, который приписывался каталожным положениям, имеющим формальную ошибку ниже этого значения.

Таблица 1. Основные характеристики ICRF и ICRF2

Характеристика	ICRF	ICRF-Ext.2	ICRF2
Общее число источников	608	717	~3400
Число опорных источников	212	212	300-400
Порог ошибки, μas	0.25	0.25	0.05-0.1

Как отмечено выше, можно ожидать, что систематические разности ICRF2–ICRF будут близки к разностям gsf2008a-ICRF , представленным на рис. 2. Очень похожий результат был получен в (Sokolova и Malkin 2007) для систематических разностей пулковского сводного каталога RSC(PUL)07C02 с ICRF, причем было показано, что эти разности объясняются ошибками ICRF. Сопоставление этих результатов позволяет сделать вывод, что систематические разности ICRF2–ICRF объясняются, в основном, ошибками ICRF.

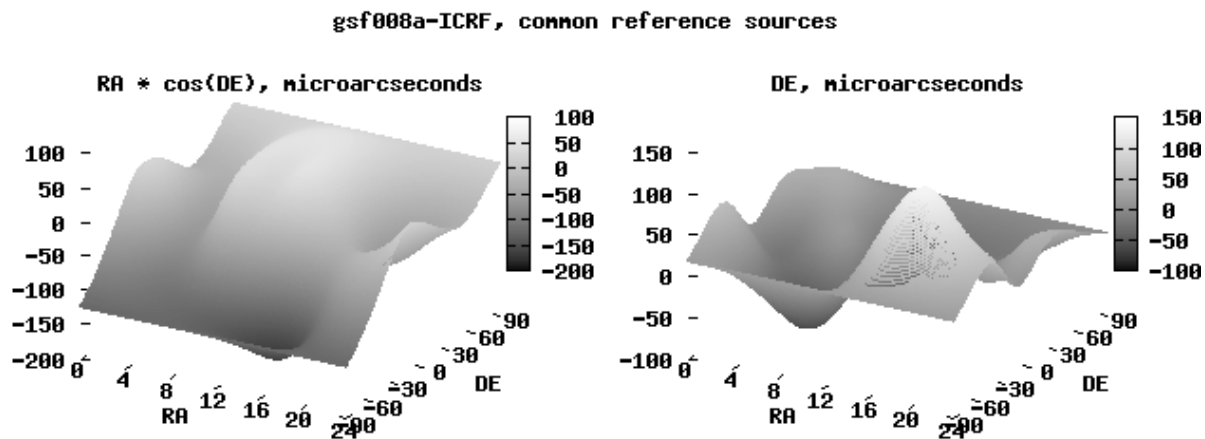


Рис. 2. Ожидаемые систематические разности ICRF2-ICRF.

5. Заключение

С момента создания ICRF прошло 14 лет. За это время существенно усовершенствовались геофизические и астрометрические модели, создано более развитое программное обеспечение. При создании ICRF2 используется около 6.5 млн. наблюдений, в четыре раза больше, чем для ICRF. Были исследованы многие возможные источники систематических ошибок ICRF и применены новые более обоснованные принципы выбора опорных источников. Хотя работа над каталогом ICRF2 еще не закончена, но его

основные черты уже определились. В результате мы можем ожидать существенного улучшения ICRF2 по сравнению с ICRF, по крайней мере, в трех отношениях:

- исправление значительных систематических ошибок ICRF на уровне 0.2 mas;
- значительное увеличение общего числа и числа опорных источников;
- значительное улучшение распределения опорных источников по небу.

Заметим, что ICRF2 по-прежнему построена на наблюдениях S/X диапазонов, и задача ее расширения на новые длины волн пока окончательно не решена, хотя работы в этом направлении ведутся (см., например, Jacobs 2009).

Новое существенное повышение точности ICRF может быть достигнуто по мере реализации проекта международной РСДБ-сети нового поколения VLBI2010 (Малкин 2009, Ма 2009). Наконец, в случае удачного завершения проекта GAIA, ожидается возврат к оптической реализации Международной небесной системы координат.

Литература

1. *Жаров В.Е., Сажин М.В., Семенцов В.Н., Куимов К.В., Сажина О.С., Ашимбаева Н.Т.* Физические причины вариации видимого положения квазаров. Настоящий сборник, 2009.
2. *Малкин З.М.* Историческая статистика РСДБ-наблюдений. Изв. ГАО, 2006, № 218, 397-401.
3. *Малкин З.М.* Проект VLBI2010. Настоящий сборник, 2009.
4. *Fey A.L.* Improving the ICRF in the Southern hemisphere. In: Proc. Journées Systèmes de Référence Spatio-temporels 2004, Ed. N. Capitaine, 2005, 37-38.
5. *Jacobs C.S.* The celestial frame at four radio frequencies. In: Proc. Journées Systèmes de Référence Spatio-temporels 2008, Ed. M. Soffel, N.Capitaine, 2005, 251-256.
6. *Lambert S.B., Gontier A.-M.* On radio source selection to define a stable celestial frame. *Astron. Astrophys.*, 2009, v. 493, No. 1, 317-323.
7. *Ma C., E.F. Arias, T.M. Eubanks, A.L. Fey, A.-M. Gontier, C.S. Jacobs, O.J. Sovers, B.A. Archinal, P. Charlot.* The International Celestial Reference Frame as Realized by Very Long Baseline Interferometry. *Astron. J.*, 1998, v. 116, 516-546.
8. *Ma C.* Steps towards the next radio realization of the ICRS. In: Proc. Journées Systèmes de Référence Spatio-temporels 2004, Ed. N.Capitaine, 2005, 3-7.
9. *Ma C.* Present and future radio reference frames. In: Proc. Journées Systèmes de Référence Spatio-temporels 2008, Ed. M/ Soffel, N.Capitaine, 2009, 195-197.
10. *Sokolova Ju., Malkin Z.* On comparison and combination of catalogues of radio source positions. *Astron. Astrophys.*, 2007, v. 474, No. 2, 665-670.

ICRF: THE RECENT STATUS AND NEAR PROSPECTS

Malkin Z.M.

Main (Pulkovo) Astronomical Observatory of RAS

In accordance with the IAU decision, starting with 1998 the radio source catalogue ICRF (International Celestial Reference Frame) obtained from VLBI observations is adopted as the official realization of the International Celestial Reference System. Since that time new many new observations were collected and new algorithms and software were developed for VLBI data processing, and in 2005 the work started on the next ICRF realization. In this paper, the history of ICRF2 and present results are briefly described.