

Астрометрія платівок ПША, оцифрованих сканером Microtek ScanMaker 9800XL TMA // Журнал фізичних досліджень. – 2010. – Т. 13. 6. Bucciarelli B. et al., Guide star photometric catalog. Version 2.4. – Spagna. – 2001. 7. ESO-MIDAS users guide. – Garching, 1994. – Vol. A, B, C. 8. Lasker B.M., Russel J.N., Jenkner H. The Guide Star Catalog. Version 1.1 – ACT. // The Association of Universities for Research in Astronomy, Inc. – 1996. 9. Mermilliod J.C. Homogeneous means in the UVB system // Institut d'Astronomie, Université de Lausanne. – 1991.

Надійшла до редколегії 08.06.10

УДК 524.7; 323.2

П. Федоров, В. Ахметов

ХРМ И HIPPARCOS КАК РЕАЛИЗАЦИЯ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКОЙ ОПОРНОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ. ИХ ОБЩНОСТЬ И РАЗЛИЧИЯ

Проведено аналіз двох сучасних оптичних реалізацій позагалактичної опорної системи координат – Hipparcos та ХРМ. Показано, що системи, які розповсюджують HCRF на слабкі зірки мають помітні систематичні помилки, пов'язані з рівнянням блиску. Також показано, що система Hipparcos/UCAC2 має залишкове обертання. Оцінки компонент вектора обертання ω_x , ω_y , $\omega_z = (-0.06 \pm 0.15, 0.17 \pm 0.14, -0.84 \pm 0.14)$ мсд/рік.

The analysis of two modern optical realizations of the extragalactic coordinate reference systems – the Hipparcos and the XPM catalogues was performed. It is shown that the systems, which are expanding the HCRF into the faint stars, have the appreciable systematic errors induced by a magnitude equation. It is shown also that the Hipparcos/UCAC2 system have a residual rotation. There are the estimations of the components of rotation vector: ω_x , ω_y , $\omega_z = (-0.06 \pm 0.15, 0.17 \pm 0.14, -0.84 \pm 0.14)$ mas/yr.

Введение. На рубеже 20-21 веков в астрономии в качестве стандарта была введена новая система координат, получившая название International Celestial Reference System (ICRS) [1]. Она сменила прежнюю систему координат, которая была реализована каталогом FK5. Основные определения новой системы координат даны в нормативных документах Международного астрономического союза (МАС).

Первоначальная реализация этой системы координат (608 источников) получила название International Celestial Reference Frame (ICRF) [19]. Направления ее осей фиксируются положениями 212 базовых точечных внегалактических радиоисточников, полученных наземными РСДБ методами с точностью порядка 0.5 миллисекунды дуги (мсд). С 01.01.2010 по решению Генеральной Ассамблеи МАС ICRF был заменен на ICRF2 [11], который содержит уже 3414 объектов и 295 определяющих опорных источников. Однако прямое использование системы ICRF при позиционных наблюдениях в видимом и инфракрасном диапазонах практически невозможно из-за малого количества опорных объектов и их низкой светимости. Поэтому для оптического диапазона вместо ICRF был создан его аналог – HCRF на основе результатов измерений, выполненных на борту космического аппарата Hipparcos.

Hipparcos как первая реализация ICRS в оптическом диапазоне. Как известно, окончательная привязка данных космического спутника Hipparcos к ICRF была выполнена в работе Ковалевского и др. [15]. Целью этой привязки было введение в оптическом диапазоне системы координат, заданной каталогом Hipparcos [8] и наилучшим образом согласованной с ICRF. В результате, как отмечают авторы [15], ориентация осей системы отсчета Hipparcos по отношению к ICRF зафиксирована путем прямой привязки положений звезд Hipparcos в эпоху J1991.25 к их радио положениям в ICRF с точностью ± 0.6 мсд. Вращение системы осей Hipparcos было зафиксировано путем привязки его собственных движений к любым внешним источникам, включая галактики, которые не обязательно присутствуют в ICRF, с точностью ± 0.25 мсд/год. Уже во второй части этого утверждения присутствует некоторая неточность в формулировке. Отсутствие среди объектов каталога Hipparcos внегалактических источников (кроме квазара 3C273B) не позволяет выполнить непосредственную привязку к внегалактическим объектам. А потому, для определения величины остаточного вращения $\omega(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ системы H37C была использована модель, описываемая уравнениями [18]:

$$\Delta\mu_\alpha \cos \delta = \omega_x \cos \alpha \sin \delta + \omega_y \sin \alpha \sin \delta - \omega_z \cos \delta \quad (1)$$

$$\Delta\mu = -\omega_x \sin \alpha + \omega_y \cos \alpha, \quad (2)$$

где в левых частях находятся разности собственных движений звезд вида (H37C – абсолютный каталог).

Из вида этих уравнений следует, что привязка осуществлялась не к внегалактическим источникам, а к системам собственных движений каталогов, реализуемых либо абсолютными собственными движениями наземных фотографических программ, либо собственными движениями 12 радио звезд, которые в свою очередь были привязаны к оптическим источникам (галактикам) и внегалактическим радио источникам (квазарам) с определенной точностью. В результате использования различных систем собственных движений звезд, индивидуальные решения $\omega(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$, полученные методом наименьших квадратов оказались несовместимыми. Поэтому окончательное объединенное решение было получено формальным осреднением (с учетом весов) индивидуальных решений. Здесь следует заметить, что примерно половина общего веса в конечном решении оказалась принадлежащей SPM [12] программе и VLBI наблюдениям. Это означает, что в северной полусфере вклад фотографических наблюдений в согласование систем такой же, как и VLBI данных. А в южной полусфере этот вклад является подавляющим, поскольку там имеется лишь одна звезда из 12 VLBI данных. К тому же, распределение внегалактических источников – галактик на юге очень неудачно, поскольку они покрывали всего лишь зону склонений от -20 до -45 градусов и небольшую область вблизи южного полюса. Таким образом, основной вклад в конечное решение был внесен данными фотографических наблюдений.

Таким образом, принятое в работе [15] значение оценки инерциальности каталога HIPPARCOS (0.25 мсд/год) скорее всего отражает не инерциальность последнего, а точность определения величины взаимного вращения систем отсчета, задаваемых сравниваемыми каталогами. Инерциальность наземных каталогов определяется точностью абсолютизации, – процедуры, которая характеризует точность приведения наблюдаемых движений к системе осей, не вращающихся в пространстве. Поскольку привязка собственных движений звезд из использованных фото-

графических обзоров к галактикам, была выполнена с точностью примерно 1-5 мсд/год, то суммарная точность привязки HIPPARCOS к внегалактическим источникам не может быть меньше этой величины.

Каталог XPM как реализация ICRS в оптическом и ближнем инфракрасном диапазоне. Система собственных движений более 300 миллионов звезд каталога XPM [9; 10] получена в результате прямой привязки (без использования промежуточных систем собственных движений) к внегалактическим источникам, которые заданы в оптическом и ближнем инфракрасном диапазоне положениями одного миллиона ста тысяч объектов, в основном галактик, и которые достаточно равномерно распределены по всей небесной сфере. Точность абсолютизации составляет примерно 0.3 мсд/год для северной полушеры и около 1 мсд/год для южной. Случайная точность абсолютных собственных движений слабых звезд XPM была оценена из следующих соображений. Среди объектов XPM были отождествлены около 12 тысяч квазаров из DR5 [21] и около тысячи источников ICRF2. В процедуре выведения абсолютных собственных движений XPM они рассматривались, как обычные звезды и для них были получены оценки собственных движений. После отождествления их с квазарами DR5 и источниками ICRF2 мы получили их средние собственные движения и стандартные отклонения. Любое отличие от нуля среднего значения формальных собственных движений внегалактических объектов мы рассматриваем как остаточное вращение системы осей, определенных каталогом XPM. Средние значения для $\mu_\alpha \cos \delta$ и μ_δ составляют 0.12 и -0.24 мсд/год соответственно, а стандартные отклонения заключены в диапазоне 3.8 – 7.4 мсд/год и могут служить оценкой случайной точности собственных движений слабых звезд XPM.

Согласование систем. Каталог Hipparcos охватывает все небо, но содержит только яркие звезды приблизительно до 9 звездной величины. Для решения очень многих астрометрических задач эта система распространяется в слабую область диапазона звездных величин с помощью данных из каталогов ACT [22], TRC [16] и Tycho-2 [13]. В последние годы были получены каталоги UCAC-2 [23] и UCAC-3 [24]. Вместе с тем, распространение Hipparcos в слабую область неизбежно приводит к деградации опорной системы, что происходит уже сегодня.

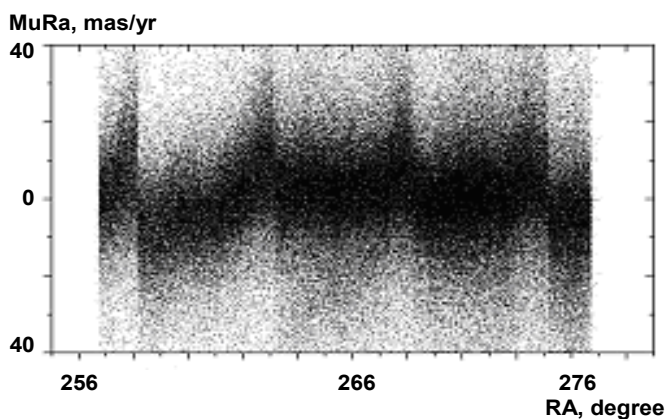


Рис.1. Зависимость собственных движений UCAC3 MuRA от RA

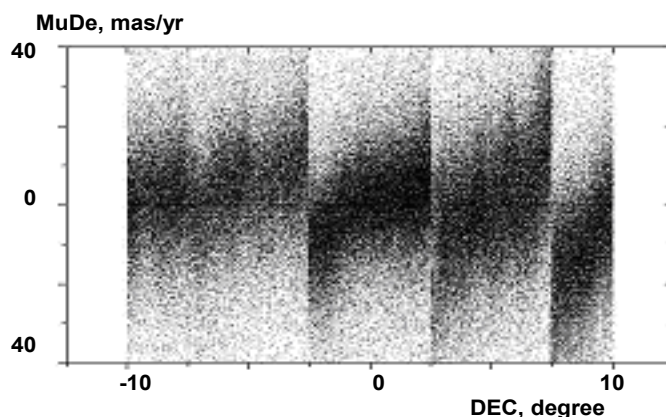


Рис. 2. Зависимость собственных движений UCAC3 MuDE от DEC

Подобное утверждение требует пояснений. Общепринятая практика использование ярких опорных звезд в задаче распространения системы Hipparcos на слабые звезды, неизбежно приводит к появлению систематических ошибок типа уравнения блеска, которые заметно искажают собственные движения создаваемых каталогов. Так, например, в каталоге UCAC-2, начиная примерно с 11.5 звездной величины присутствует уравнение блеска [14]. Это обусловлено использованием в качестве первых эпох при выведении новых собственных движений данных наблюдений фотографических обзоров (других просто нет), полученных в 50-80 годы прошлого столетия. В каталоге UCAC-2 были использованы так называемые желтые пластинки SPM обзора. Еще хуже обстоит дело в UCAC3, в котором для вывода собственных движений в слабой области использовались данные Шмидтовских пластинок [17]. В результате, собственные движения обоих каталогов имеют заметные систематические ошибки в полях размером примерно 5 × 5 градусов. А на границах этих полей имеются очень большие разрывы (20-30 мсд/год), что очень

опасно, поскольку большинство современных высокоточных наблюдений выполняются с помощью ПЗС матриц в небольших полях. Рисунки 1 и 2 демонстрируют поведение собственных движений звезд каталога UCAC-3 в зависимости от координат в сравнительно небольших участках неба. Сравнительно недавно выполненные работы по переопределению вектора вращения системы HIPPARCOS, свидетельствуют о том, что параметры привязки системы Hipparcos к ICRF, полученные в работе [15] требуют уточнения. Особенно это касается компоненты вращения относительно оси Z экваториальной системы координат, которая в рамках примененной модели, принципиально не может быть освобождена от влияния уравнения блеска. Причина остаточного вращения, вероятно, связана с тем, что в фотографических абсолютных собственных движениях звезд, использовавшихся для определения вращения системы Hipparcos, все же осталась зависимость от звездной величины. В работе [4] были найдены следующие параметры вращения системы каталога HIPPARCOS относительно внегалактической системы координат: $\omega_x = 0.04 \pm 0.15$ мсд/год, $\omega_y = 0.18 \pm 0.12$ мсд/год, $\omega_z = -0.35 \pm 0.09$ мсд/год (компоненты вращения в экваториальной системе координат). Этот результат был подтвержден анализом кинематики как звезд HIPPARCOS [3], так и сотен тысяч слабых звезд каталогов Tycho-2 и UCAC2 [5]. В целом он не противоречит и результатам работы Бобольца и др. [2], в которой выполнен анализ положений и собственных движений 46 радиозвезд. В этой работе были получены параметры взаимной ориентации оптической реализации (HCRF) и радио системы (ICRF): $e_x = -0.4 \pm 2.6$ мсд, $e_y = 0.1 \pm 2.6$ мсд, $e_z = -3.2 \pm 2.9$ мсд, а также компоненты вектора взаимного вращения: $\omega_x = 0.55 \pm 0.34$ мсд/год, $\omega_y = 0.02 \pm 0.36$ мсд/год, $\omega_z = -0.41 \pm 0.37$ мсд/год. Эти авторы делают справедливый вывод о том, что в пределах ошибок значимые вращения отсутствуют. Отметим также оценку угловой скорости вращения системы HIPPARCOS относительно координатных систем, задаваемых эфемеридами DE403 и DE405, которая была получена в работе Чернетенко [7] из анализа наблюдений астероидов: $|\omega| = 0.94 \pm 0.20$ мсд/год, а компоненты найденного вектора имеют значения $\omega_x = 0.12 \pm 0.08$ мсд/год, $\omega_y = 0.66 \pm 0.09$ мсд/год, $\omega_z = -0.56 \pm 0.16$ мсд/год. Этот результат вынуждает сделать вывод о том, что либо динамические теории DE403 и DE405 нуждаются в улучшении, либо система HIPPARCOS нуждается в поправке. Определение параметров взаимного вращения было сделано также в 2010 году на основе сравнения слабых звезд XPM и UCAC2 [6]. Оценки компонент вектора вращения ω_x , ω_y , $\omega_z = (-0.06 \pm 0.15, 0.17 \pm 0.14, -0.84 \pm 0.14)$ мсд/год. Как видим, один из компонентов, а именно ω_z , в ряде случаев значительно отличается от нуля. Поэтому определение параметров вращения на основе независимых данных, свободных от систематических ошибок типа уравнения блеска является крайне актуальной задачей для согласования систем заданных каталогами Hipparcos и XPM.

Заключение. Теперь, когда создание каталога XPM завершено, необходимо решить еще одну задачу – получить параметры вращения распространителей системы Hipparcos относительно системы XPM во всем доступном диапазоне звездных величин. Собственные движения Hipparcos, к сожалению, не могут быть использованы напрямую, поскольку находятся вне диапазона звездных величин XPM. Как показано выше, точность абсолютной калибровки каталога XPM, вследствие большого количества опорных реперов, их почти равномерного распределения по небесной сфере и продуманной методике привязки к внегалактическим источникам не превышает 1 мсд/год. Как показано в [10] уравнение блеска в диапазоне слабее 15 звездной величины в каталоге XPM отсутствует, а в яркой области оно исключено с помощью специальной процедуры, опирающейся на предположение об отсутствии уравнения блеска в каталоге Tycho-2. Указанные факты позволяют нам сформулировать задачу в следующем виде:

определить углы вращения системы Hipparcos относительно системы XPM и тем самым задать в диапазоне звездных величин $6 < V < 22$ новую внегалактическую опорную систему. В случайном отношении точность яркой и слабой части останутся неизменными, а в систематическом отношении это будет единая система координат, точность абсолютной калибровки которой, в северном полушарии составит примерно 0.3 мсд/год, а в южном – около 1 мсд/год.

1. Arias E. F., Charlot P., Feissel M., Lestrade J.-F. The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service, ICRS // *Astron. and Astrophys.* – 1995. – Vol. 303. – P. 604-608.
2. Boboltz D. A., Fey A. L., Puatua W. K. et al., Very large array plus pie town astrometry of 46 radio stars // *Astron. J.* – 2007. – Vol. 133. P. 906-916.
3. Бобылев В. В. Кинематический контроль инерциальности каталогов системы ICRS // *Письма в Астрон. журн.* – 2004. – Т. 30, №4. – С. 289 – 296.
4. Бобылев В. В. Астрометрический контроль инерциальности каталога HIPPARCOS // *Письма в Астрон. журн.* – 2004. – Т. 30, №12. – С. 930 – 935.
5. Бобылев В. В., Ховричев М. Ю. Кинематический контроль инерциальности системы собственных движений звезд каталогов Tycho-2 и UCAC2 // *Письма в Астрон. журн.* – 2006. – Т. 32, №9. – С. 676-690.
6. Бобылев В. В., Федоров П. Н., Байкова А. Т., Ахметов В. С. Определение параметров ориентации системы ICRS/UCAC2 с использованием Харьковского каталога абсолютных собственных движений звезд // *Письма в Астрон. журн.* – 2010. – Т. 36, №7. – С. 1–8.
7. Chernetenko, Yu. A., Orientation of the Hipparcos frame with respect to the reference frames of the DE403/LE403 and DE405/LE405 ephemerides based on asteroid observations // *Astronomy Letters* – 2008. – Vol. 34, Issue 4. – P. 266-270.
8. ESA – 1997. The Hipparcos and Tycho Catalogues // ESA SP-1200.
9. Fedorov P. N., Myznikov A. A. and Akhmetov V. S. The XPM Catalogue: absolute proper motions of 280 million stars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2009. – Vol. 393. – P. 133–138.
10. Fedorov P. N., Akhmetov V. S., Bobylev V. V., Bajkova A. T. An investigation of the absolute proper motions of the XPM catalogue // *Astron. Soc.* – 2010. Vol. 393. P. 133–138 in press.
11. Fey A., Gordon D. and Jacobs C. S. (eds.) The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry // Presented on behalf of the IERS / IVS Working Group, (IERS Technical Note; 35) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie – 2009. – 204 P. ISBN 3-89888-918-6 (print version).
12. Girard T. M., Platais I., Kozhurina-Platais V., et al. The Southern Proper Motion Program. I. Magnitude equation correction // *Astron. J.* – 1998. – Vol. 115. – P. 855 – 865.
13. Høg E., Fabricius C., Makarov V.V., et al. The Tycho-2 Catalogue of the 2.5 Million Brightest Stars // *Astron. and Astrophys.* – 2000. – Vol. 355. – P. 27-30.
14. Khrutskaya E.V. and Khovritchev M.Yu. New high precision proper motions of stars 12 to 16.5 mag based on the data from the Pul-3 and UCAC2 astrometric catalogues // *Izv. Gl. Astron. Obs.* – 2004. – № 217. – P. 337 – 341.
15. Kovalevsky J., Lindegren L., Perryman M.A.C. et al. The Hipparcos Catalogue as a realisation of the extragalactic reference system – *Astron. and Astrophys.* – 1997. – Vol. 323. – P. 620 – 633.
16. Kuzmin A., Høg E., Bastian U., et al. Construction of the TYCHO Reference Catalogue // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* – 1999. – Vol. 136. – P. 491 – 508.
17. Lasker B., Lantanzani M., McLean B. et al. The second-generation Guide Star Catalog: Description and properties // *Astron. J.* – 2008. – Vol. 136. – P. 735 – 766.
18. Lindegren L., Kovalevsky J. Linking the Hipparcos Catalogue to the extragalactic reference system // *Astron. and Astrophys.* – 1995. – Vol. 304. – P. 189-201.
19. Ma C., Arias E. F., Eubanks T. M., et al. The international celestial reference frame as realized by very long baseline interferometry // *Astrophys. J.* – 1998. – Vol. 116, No 1711. – P. 516-546.
20. Perryman M.A.C., Lindegren L., Kovalevsky J., et al. The Hipparcos Catalogue // *Astron. and Astrophys.* – 1997. – Vol. 323. – P. 49-52.
21. Schneider D. P., Patrick H., Gordon R. et al. The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog. IV. Fifth Data Release // *Astron. J.* – 2007. – Vol. 134. – P. 102 – 117.
22. Urban S. E., Corbin T. E., Wyco G. L. The ACT reference catalog. // *Astrophys. J.* – 1998. – Vol. 115, No 1709, P. 2161 – 2166.
23. Zacharias N., Urban S. E., Zacharias M. I., et al. The Second U.S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC-2) // *Astron. J.* – 2004. – Vol. 127. – P. 3043-17.
24. Zacharias N., Finch C., Girard T., et al. The Third US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC3) // *Astron. J.* – 2010. – Vol. 139, Issue 6. – P. 2184-2199