

УДК 52-32

А. В. Золотухина, П. Ф. Лазоренко, А. С. Харин

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины,
03680 МСП Киев, ул. Академика Заболотного 27

Кросс-идентификация каталогов HIPPARCOS и 2MASS. Алгоритм и программы

Разработана и представлена методика, алгоритм, а также пакет программ для кросс-идентификации каталогов 2MASS (версия 2) и HIPPARCOS.

КРОС-ІДЕНТИФІКАЦІЯ HIPPARCOS-2MASS. АЛГОРИТМ І ПРОГРАМИ, Золотухіна А. В., Лазоренко П. Ф., Харін А. С. — Розроблено і представлено методику, алгоритм, а також пакет програм для кросс-ідентифікації каталогів 2MASS (версія 2) і HIPPARCOS.

CROSS-IDENTIFICATION HIPPARCOS-2MASS. ALGORITHM AND PROGRAMS, by Zolotukhina A. V., Lazorenko P. F., Kharin A. S. — The method of the cross-identification of catalogue 2MASS (version 2) and HIPPARCOS was developed. The algorithm and cross-identification software package are represented below.

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время астрометрия, как и астрономия в целом, может быть подразделена в зависимости от диапазона наблюдаемых электромагнитных волн и энергии фотонов на семь разделов или направлений [1].

Каждый из этих семи разделов астрометрии имеет свою специфику, связанную с решаемыми задачами, с техникой (телескопами и приемниками излучения), методикой наблюдений и обработки, а также с характером и методами исключения атмосферных влияний на наблюдения, если они выполняются в наземных условиях. В соответствии с этим точность астрометрических наблюдений наземных и космических в разных диапазонах оказывается различной. Наиболее высокой, на уровне долей миллисекунд дуги (1 мсд = 0.001"), она оказалась для наземных РСДБ-наблюдений и космических наблюдений в оптическом диапазоне.

С 1 января 1998 г. согласно решению Международного астрономического союза (МАС) произведен переход на новую международную небесную

координатную систему ICRS. Она основывается в радиодиапазоне на каталоге ICRF, полученном на базе радиоинтерферометрических наблюдений, точность которых на 2-3 порядка превышает точность меридианных и фотографических наблюдений, а в оптическом диапазоне — на положениях и собственных движениях каталога HIPPARCOS, переведенного также на систему ICRF.

Именно для этих двух диапазонов международная небесная координатная система ICRS является единой, и в соответствии с последующими решениями МАС должна быть распространена также и на все другие диапазоны электромагнитного спектра.

Таким образом, одной из основных проблем астрометрии в настоящее время является распространение международной опорной небесной координатной системы ICRS, единой для радио- и оптического диапазонов, на остальные пять диапазонов электромагнитного спектра, одним из которых является инфракрасный [5].

Инфракрасная астрономия: наземная и космическая. Инфракрасная астрономия появилась в начале шестидесятых годов 20-го столетия с появлением приемников ИК-излучения. Ее развитие связано с необходимостью решения задач, которые не могли быть решены с помощью наблюдений в оптическом диапазоне. Это — поиск новых планетных систем, обнаружение коричневых карликов, исследование областей звездообразования, центрального района Галактики.

Однако атмосфера не только ставит предел точности астрометрическим, фотометрическим и спектральным наземным измерениям. Трудности наземной астрономии связаны: а) с тем, что земная атмосфера имеет лишь два окна прозрачности: оптическое, расширяющееся в сторону ИК-диапазона, и радиоокно, расширяющееся в сторону миллиметрового; б) с необходимостью защиты инструмента от теплового излучения окружающей среды и девятимикронного излучения наблюдаемой области неба; в) с необходимостью глубокого охлаждения используемых приемников ИК-излучения, а также с непрозрачностью для тепловых лучей ($\lambda > 3$ мкм) обычной линзовой оптики [7].

Решение главных земных проблем ИК-астрономии было найдено путем выхода за пределы земной атмосферы сначала с помощью высотной баллонной и ракетной, а затем и космической техники. Первый астрономический ИК-спутник IRAS, запущенный в январе 1983 г. и функционировавший до ноября этого же года, убедительно доказал преимущество космических ИК-наблюдений по сравнению с наземными. За 11 месяцев его работы был получен каталог IRAS PSC, включающий 245889 точечных ИК-объектов, что примерно в 10 раз больше, чем было получено за предыдущие 20 лет наземной, баллонной и ракетной ИК-астрономии. Результаты наблюдений ИСЗ IRAS продолжают использоваться в исследованиях ИК-объектов до настоящего времени. Миссия ИСЗ IRAS и ее успешные результаты знаменовали появление современной космической ИК-астрономии. Астрофизические исследования в этом диапазоне были также успешно продолжены на космической обсерватории ISO, и в настоящее время продолжают на космическом телескопе Хаббла (HST) [5].

Инфракрасная астрометрия. Точность экваториальных координат каталога IRAS PSC, полученных из наблюдений ИСЗ IRAS, оказалась далекой от современной астрометрической. В некоторых случаях ошибки могут достигать 2'; при неизвестных собственных движениях ИК-объектов это может привести даже к их потере. Поэтому одновременно с ИК-каталогом IRAS PSC появилась проблема повышения точности его положений. Это чисто астрометрическая проблема, и ее кардинальное решение связано с

созданием нового направления в астрономии — ИК-астрометрии. На первом этапе решение этой первой из задач ИК-астрометрии (повышение точности каталога IRAS) оказалось возможным без постановки новых более точных астрометрических наблюдений, а путем отождествления ИК-объектов из каталога IRAS PSC с их оптическими двойниками из точных астрометрических каталогов. Этот метод был впервые использован в Главной астрономической обсерватории НАН Украины [2, 6] и в Вашингтонской морской обсерватории, где из сравнения IRAS PSC с четырьмя астрометрическими каталогами был получен каталог SPIRSS (Catalog Position of IR Stellar Sources), включающий 37700 ИК-объектов с точными астрометрическими положениями в системе фундаментального каталога FK5 [4].

Особая роль ИК-диапазона для астрометрии связана с его промежуточным положением между оптическим и радиодиапазоном, что дает основание сделать его естественным мостом для улучшения связи между радио- и оптической координатными системами. Эта проблема является также одной из актуальных проблем астрометрии в ее современный период.

Распространение координатной системы ICRS (единой в настоящее время для радио- и оптического спектральных диапазонов) на другие диапазоны электромагнитных волн также является, как уже отмечено выше, актуальной проблемой астрометрии. Ее решение для ИК-спектрального диапазона станет следующим шагом в создании единой для всего электромагнитного спектра международной небесной опорной координатной системы.

Высокая стоимость космических результатов, сравнительно небольшая чувствительность ИК-приемников телескопа IRAS (предельная глубина каталога IRAS PSC составила примерно $4.5\text{--}5^m$), а также появление новых высокочувствительных оптических ПЗС- и матричных ИК-приемников стимулировали принятие и осуществление в 1994—2000 гг. двух более дешевых, альтернативных космическим, наземных проектов — обзоров неба в ближнем ИК-диапазоне (до $\lambda = 2$ мкм): французского обзора неба южного полушария DENIS (DEep Near Infrared Survey) и американского полного обзора неба в двух полушариях 2MASS (The Two Micron All Sky Survey).

По предварительной оценке точность определения положений в этих обзорах составляет $0.3''$ и $0.2''$ соответственно. По современным астрометрическим требованиям это невысокая точность. Однако для наблюдений в ИК-диапазоне в наземных условиях она является фактически предельной. Более высокая точность как в оптическом, так и в ближнем ИК-диапазонах безусловно может быть достигнута лишь при удачном выполнении планируемых космических астрометрических программ по проектам DIVA, FAME, SIM и GAIA [7].

КАТАЛОГИ HIPPARCOS И 2MASS

Каталог HIPPARCOS. В 1989 г. Европейское космическое агентство осуществило запуск космического аппарата HIPPARCOS (HIGH Precision PARallax COLlecting Satellite) с целью получения положений, собственных движений и параллаксов более 100 тысяч звезд на миллисекундном уровне точности. Космический аппарат проработал на орбите 37 месяцев, в течение которых он выполнял астрометрические и фотометрические измерения звезд по заданной программе.

Обработка этих наблюдений привела к созданию каталога HIPPARCOS, содержащего информацию о 118 218 звездах с точностью определения положений, годовых собственных движений и параллаксов на уровне 1 мсд. Более детальную информацию можно найти на сайте <http://www>.

astronet.ru/db/msg/1210304/index.html.

Средняя плотность каталога — менее трех звезд на квадратный градус — недостаточна для редукций при дифференциальных наблюдениях слабых звезд. Положения и собственные движения звезд каталога HIPPARCOS отнесены к системе ICRF.

Каталог 2MASS равномерно просканировал все небо (99.998 %) в трех полосах ближнего ИК-диапазона. Для наблюдений по проекту 2MASS использовались два высокоавтоматизированных 1.3-м телескопа, установленных в штате Аризона (США) и в Чили. Каждый телескоп был оснащен трехканальной камерой, в каждом из каналов приемниками служили матрицы 256×256 NICMOS-3, способные наблюдать небо одновременно в полосах J (1.25 мкм), H (1.65 мкм) и K_s (2.17 мкм). Матрицы 2MASS изображали небо, в то время как телескопы плавно сканировали небо по склонению со скоростью около 1' за секунду. Полосы данных 2MASS имеют длину 6° в направлении склонения и ширину 8.5' кадра одной камеры.

Северный комплекс 2MASS начал свою работу в июне 1997 г., а южный — в марте 1998 г. Обзор был завершен в обоих полушариях 15 февраля 2001 г.

Каталог 2MASS имеет выпуски данных следующего перечня:

1. 2MASS данные одной северной ночи (63 □° неба), сделанный в декабре 1998 г. Это был пробный ряд наблюдений.

2. Первый расширенный выпуск данных (первая версия 2MASS) северного полушария, вышедший в мае 1999 г. Этот выпуск покрывает около 2483 □°, то есть примерно 6 % всего неба. Это был, по всей видимости, пробный вариант обработки первых рядов наблюдений, который впоследствии нигде не использовался.

3. Второй расширенный выпуск данных (вторая версия 2MASS) северного и южного полушарий, выпущенный в марте 2000 г. Этот выпуск покрывает более чем 19600 □°, то есть примерно 47 % всего неба. Эта вторая версия каталога 2MASS сразу же после ее опубликования была использована для аналогичной нашей кросс-идентификации в Белградской обсерватории [3].

4. Полный обзор всего неба (полная версия 2MASS), выпущенный в марте 2003 г. Этот выпуск покрывает 99.998 %. Более детальную информа-

Таблица 1. Основные характеристики каталогов HIPPARCOS и 2MASS

Характеристика	HIPPARCOS	2MASS (2R)*	2MASS (ALL)
Число звезд	118 218	162 213 354	470 992 970
Предельная звездная величина	12.4 ^m	$J = 15.8^m$ $H = 15.1^m$ $K_s = 14.3^m$	$J = 15.8^m$ $H = 15.1^m$ $K_s = 14.3^m$
Средняя погрешность положений	> 1 мсд	≈ 0.2"	≈ 0.2"
Средняя погрешность собственных движений	> 1 мсд/год		
Средняя погрешность параллакс	≈ 1 мсд		
Средняя погрешность фотометрии	≈ 0.002 ^m	< 0.155 ^m	0.01—0.02 ^m
Средняя эпоха наблюдений	1991.25	2000	2000
Равноденствие	J2000	J2000	J2000
Система каталога	ICRS	ICRS	ICRS

* — вторая версия каталога 2MASS (162 млн звезд)

цию можно найти на сайте <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/overview/access.html>

Основные характеристики каталога HIPPARCOS и двух, используемых в данной работе версий каталога 2MASS представлены в табл. 1.

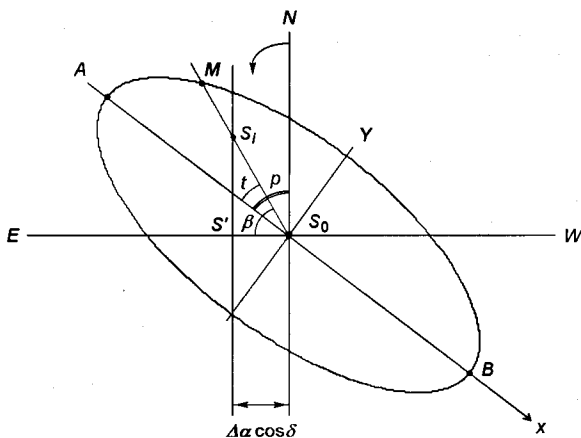
МЕТОДИКА ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ, БАЗИРУЮЩАЯСЯ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ В КАЧЕСТВЕ ОКНА ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ ЭЛЛИПСА ОШИБОК ПОЛОЖЕНИЙ ЗВЕЗД 2MASS

Описание процесса кросс-идентификации HIPPARCOS — 2MASS.

Процесс отождествления согласно предложенной нами методике состоит из двух этапов. На первом этапе сравниваются положения звезд в двух каталогах, приведенных на одну эпоху и равноденствие, после чего составляется список источников ИК-каталога, в заданную окрестность которых ($5 \times 5''$) попадают их оптические двойники из астрометрического каталога. Первоначально отождествление проводится для прямоугольных площадок размером $5 \times 5''$. На втором этапе производится выборка всех одиночных отождествлений, т. е. одной звезде HIPPARCOS соответствует одна звезда 2MASS (2-, 3- и 4-кратные отождествления далее не использовались). Затем на основе полученной выборки, проводится контрольное отождествление для четырех окон идентификации: $4 \times 4''$, $3 \times 3''$, $2 \times 2''$, $1 \times 1''$. Это дает возможность некоторого контроля достоверности отождествлений при уменьшении их количества.

Ошибки положений звезд 2MASS. Алгоритм кросс-идентификации каталогов HIPPARCOS и 2MASS основывался на предположении, что положения звезд каталога HIPPARCOS по сравнению с положениями каталога 2MASS являются точными. Поэтому в качестве окна отождествления выбирается эллипс ошибок положений каталога 2MASS, параметры которого — полуоси эллипса и угол его ориентации — приведены для основной части звезд как для второй, так и для третьей (полной) использованных нами версий 2MASS. При этом в зависимости от выбираемого критерия (σ , 2σ , 3σ) выбирались соответствующие размеры окна идентификации. Эллипс ошибок положения (рисунок) характеризуется большой и малой полуосями a и b и позиционным углом p , который измеряется в градусах через восточное направление E с нулевой точкой в северном направлении N .

Пусть AB — большая ось вероятностного эллипса ошибок каталога 2MASS, α_0 и δ_0 — координаты звезды S_0 из каталога 2MASS, которая является центром прямоугольной системы координат, а α_i и δ_i — координата



Эллипс ошибок

ты звезды S_i из каталога HIPPARCOS, попавшей в окно идентификации. Окно представлено эллипсом ошибок с размерами σ , 2σ , 3σ . Эллипс пересекается прямой S_0S_i в некоторой точке M .

Если расстояние S_0S_i меньше S_0M , то звезда из каталога HIPPARCOS находится внутри окна идентификации. Таким образом, условием идентификации при принятом размере эллипса ошибок является выполнение неравенства

$$S_0M - S_0S_i \geq 0.$$

Величина S_0S_i определяется из равенств

$$S_0S_i = \sqrt{(\Delta\alpha\cos\delta_i)^2 + \Delta\delta^2},$$

$$S_iS' = \delta_i - \delta_0 = \Delta\delta,$$

$$S_0S' = (\alpha_i - \alpha_0)\cos\delta_i = \Delta\alpha\cos\delta_i.$$

Для нахождения величины S_0M рассмотрим прямоугольную систему координат XS_0Y , связанную с главными осями эллипса (рисунок). В этой системе положение x , y точки M связано параметрическими уравнениями

$$x = a\cos E, \tag{1}$$

$$y = b\sin E \tag{2}$$

с полуосями a и b эллипса ошибок каталога 2MASS и некоторым параметрическим углом E . Из уравнений (1) и (2) имеем

$$S_0M = \sqrt{a^2\cos^2 E + b^2\sin^2 E}.$$

Для нахождения E введем вспомогательные углы $\beta = S_iS_0S'$ и $t = S_iS_0A$, определяемые из формул

$$\beta = \arctg\left(\frac{\Delta\delta}{\Delta\alpha\cos\delta_i}\right),$$

$$t = \beta - 90^\circ + p.$$

Отсюда с учетом соотношения

Таблица 2. Программы для реализации процедуры отождествления ИК/оптических двойников каталогов HIPPARCOS и 2MASS

Программа	Назначение
Selmod.pas	Первый шаг отождествления для прямоугольных площадок размером $5 \times 5''$
Rez1.pas	Объединение 49 файлов в один
Vyborka.pas	Определение звезд, имеющих двухкратные и трехкратные отождествления и их исключение из входного файла
1secunda.pas	Отождествление HIPPARCOS/2MASS для прямоугольных площадок размером $1 \times 1''$, $2 \times 2''$, $3 \times 3''$, $4 \times 4''$
Elips.pas	Отождествление HIPPARCOS/2MASS с помощью методики, базирующейся на использовании в качестве окна отождествления эллипса ошибок положений звезд 2MASS для критерия отклонения 3σ
El_cor.pas	Преобразование формата каталога
Elips2sigma.pas	Отождествление HIPPARCOS/2MASS с помощью методики, базирующейся на использовании в качестве окна отождествления эллипса ошибок положений звезд 2MASS для критерия отклонения 2σ
Hip2mass2r.pas	Программа выборки и преобразования формата каталога

$$\operatorname{tg}t = \frac{y}{x} = \frac{b}{a} \operatorname{tg}E$$

находим угол

$$E = \operatorname{arctg}\left(\frac{a}{b} \operatorname{tg}t\right),$$

необходимый для вычисления величины S_0M .

Если в вероятностный эллипс ошибок 2MASS попадает не больше одной звезды S_i из каталога HIPPARCOS, т. е. $S_0M - S_0S_i \geq 0$, то можно с некоторой вероятностью (в зависимости от выбранного критерия) считать, что это одна и та же звезда.

Пакет программ для реализации процедуры кросс-идентификации ИК/оптических двойников HIPPARCOS/2MASS. Для реализации представленных в предыдущем разделе алгоритмов отождествления ИК/оптических двойников каталогов 2MASS/HIPPARCOS возникла необходимость составить ряд программ. Назначение каждой из этих программ, составленных на языке pascal, объясняет табл. 2.

ВЫВОДЫ

Поставлена проблема распространения международной координатной системы ICRS на ИК-диапазон путем создания сводного опорного каталога, который предполагается создать на основе кросс-идентификации двух версий каталога 2MASS и каталога HIPPARCOS.

Разработана методика отождествления звезд HIPPARCOS-2MASS, базирующаяся на использовании эллипса ошибок положений звезд 2MASS в качестве окна отождествления, а также пакет программ для осуществления кросс-идентификации HIPPARCOS-2MASS.

1. Харин А. С. Проверка списка оптических двойников ИК- и радиоисточников по наблюдениям в Андрушевской АО // Космічна наука і технологія. Додаток.—2002.—9, № 2.—С. 261—264.
2. Харин А. С. Поиск звезд FK5, наблюдавшихся в ИК-области // Кинематика и физика небес. тел.—1992.—8, № 4.—С. 67.
3. Damjanovic G., Souchay J. Cross-identification of HIPPARCOS-2MASS second incremental data release // Proc. JOURNEES 2002, System de Reference Spatio-Temporels / Ed. N. Capitaine, M. Stavinschi. — Paris, 2002.—P. 15—20.
4. Hindsley R., Harrington R. The US Naval observatory catalog of positions of infrared stellar sources // Astron. J.—1994.—107, N 1.—P. 280—286.
5. Kharin A. S. The program of infrared astrometry. Some problems of realization // Proc. JOURNEES 1998, System de Reference Spatio-Temporels / Ed. N. Capitaine. — Paris, 1998.—P. 65—66.
6. Kharin A. S., Kolesnik Yu. B. Planets, a common MAO and INASAN database // Baltic Astron.—1997.—6, N 2.—P. 255—258.
7. Kovalevsky J. Modern Astrometry: 2-nd ed. — Berlin—Heidelberg: Springer, 2002.—375 p.

Поступила в редакцию 10.06.06