

Санкт-Петербургский государственный университет
Математико-механический факультет

Ф.А. Амосов

История проекта Hipparcos

Санкт-Петербург

2015

Содержание

1	Введение	1
2	Конструкция ИСЗ Hipparcos	2
3	Результаты	5
3.1	Каталоги HIP, HIPNEWSCAT и XHIP	5
3.2	Фотометрические системы каталогов Hipparcos (и Tycho) . .	6
3.3	Диаграмма Герцшпрунга-Рессела	7
3.4	Спектральные характеристики звезд	7

1 Введение

Для решения большого количества проблем необходимо иметь каталог по крайней мере 100 000 звезд в оптическом диапазоне волн. В течение 20 лет Европейским космическим агентством велись подготовительные работы по созданию такого каталога на основе космических наблюдений. В 1989 году Европейское Космическое Агентство (ESA) осуществило запуск космического аппарата HIPPARCOS (HIgh Precision PARallax Collecting Satellite — «спутник для сбора высокоточных параллаксов») с целью получения положений, собственных движений и параллаксов 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 двух каталогов. Первый из них - HIPPARCOS. Он содержит информацию о 118218 звездах с точностью определения положений, годовых собственных движений и параллаксов на уровне 1 mas. Такая точность для звезд достигнута в астрометрии впервые. Вторым каталог получил название TYCHO в честь датского астронома Тихо Браге. В этом каталоге приводятся те же параметры с точностью до 25 mas. Создание этих двух каталогов ознаменовало рождение нового направления - космической астрометрии.

2 Конструкция ИСЗ Hipparcos

Чтобы достичь целей высокоточной глобальной астрометрии, т.е. определения астрометрических параметров звезд по всей небесной сфере с одинаковой точностью, принцип измерения должен позволять определять большие углы (порядка радиана) с точностью около 1 mas. С этой целью телескоп, установленный на ИСЗ HIPPARCOS совмещал в фокальной плоскости два поля зрения, разделенные на небесной сфере углом в 58° . Размеры рабочей области части фокальной плоскости менее одного квадратного градуса.

Регистрация наблюдений осуществлялась с помощью одномерной решетки с щелями, установленной так, что щели располагаются перпендикулярно направлению сканирования. Для устранения в стадии обработки наблюдений ошибок наложения результатов соседних сканирований друг друга необходимо знать положения осей спутника с точностью в $0.1''$. А для этого в стадии выполнения наблюдений ориентировка спутника должна быть известна с точностью в $1''$. С этой целью в фокальную плоскость телескопа были введены две дополнительные системы «картирования звезд» (star mapping system), состоящие из нескольких щелей специальной геометрии. Необходимая точность ориентировки ИСЗ получалась из данных о моментах прохождения звезд с хорошо известными координатами и данных от гироскопов. [1]

Конструкция телескопа была отобрана из сравнительного анализа шести оптических систем: *Refractive Schmidt*, *All-reflective Schmidt*, *Schmidt-Cassegrain*, *All-reflective Schmidt-Cassegrain*, *Baker 3 mirror*, *Corrected Ritchey-Chretien*. Отбор велся по следующим критериям: малое центральное затемнение (т.е. препятствия на пути лучей), минимум асимметричных аберраций, малочувствительность к остаточной нецентрированности, достаточная невосприимчивость к рассеянному свету, степень кривизны фокальной поверхности, трудоемкость изготовления отражающих поверхностей, возможность применения в космической технике. В результате, не сразу, окончательно была выбрана система *All-reflective Schmidt*. Одной из трудных проблем стало изготовление составного зеркала, выполняющего две функции. Во-первых, оно совмещает два поля зрения в одно изображение и поэтому состоит из двух половинок, наложенных одна относительно другой

на 29° . Во-вторых, оно выполняет роль коррекционной пластинки в традиционной схеме телескопа Шмидта, т.е. отражающей поверхности должна была быть придана специальная асферическая форма для корректировки эффектов сферической аберрации.

В состав оптической схемы инструмента входят также набор решеток, размещенных в фокальной плоскости, передающая оптика основного приемника излучения и передающая оптика системы картирования. Фокальная поверхность оптической системы телескопа имеет кривизну и, следовательно, поверхность основной решетки и решетки системы картирования также должны быть соответствующим образом искривлены. Эти решетки нанесены на кварцевое основание, которое имеет кривизну, равную кривизне поля телескопа. В состав системы решеток входят также линзы поля и две призмы, отклоняющие лучи в системе картирования в соответствующие приемники. Система решеток вместе с соответствующей передающей оптикой может перемещаться вдоль оптической оси телескопа для устранения дефокусировки, которая может возникнуть в процессе эксплуатации. В следующей таблице приведены некоторые параметры инструмента.

В качестве приемника излучения использовался диссектор – устройство, позволяющее использовать для приема сигнала в каждый конкретный момент лишь часть поверхности фотокатода. Заданная принимающая область определяется магнитным полем в трубке диссектора, формируемым внешними магнитными катушками подобно системе используемой в телевизионной трубке. Таким образом, можно ограничить размер принимающей области кружком в $30''$ в диаметре, что позволяет резко ограничить прием излучения одновременно от двух или более звезд, добиться значительного ослабления фона неба. Диссектор позволяет также сделать измерения звезд в поле зрения квази-одновременными путем частого переключения с одной звезды на другую при их одновременном прохождении по решетке. Передача изображения на фотокатод диссектора осуществляется с помощью передающей оптики, включающей в себя и вращающееся зеркало, позволяющее направлять изображение и на запасной диссектор.

В процессе разработки и осуществления проекта неоднократно поднимался вопрос о конструкции приемника. От предложения использовать в качестве приемника ПЗС-матрицы отказались, т.к. на момент проектиров-

ки и сборки ИСЗ отсутствовал достаточный опыт использования ПЗС в космической технике, также его высокая стоимость, и резкое увеличение количества передаваемой на Землю информации.

Ориентировка спутника вычислялась по данным гироскопов и системы картирования. Гироскопы давали главным образом короткопериодические вариации ориентировки, а система картирования позволяла корректировать дрейф гироскопов, т.е. выявляла долгопериодические составляющие в изменении положения ИСЗ.

Поддержание стабильного вращения ИСЗ вокруг двух осей (сканирование с периодом 2 ч 08 мин и прецессионное движение с периодом 57 суток) осуществлялось шестью устройствами, содержащими под давлением холодный газ.

В проекте была предусмотрена термическая защита и активный термический контроль составляющих оптической системы. Особо важные элементы, как, например, составное зеркало и другие зеркала телескопа контролировались бортовой ЭВМ с помощью термодатчиков. Составное зеркало было изготовлено из материала с «нулевым» коэффициентом теплового расширения и по техническим данным постоянство задаваемого им угла выдерживалось с точностью до 0,001" в сутки.

Основные этапы функционирования ИСЗ кратко можно сформулировать следующим образом.

- Обработка данных от системы картирования и гироскопов для определения ориентировки ИСЗ.
- Проведение корректировки положения спутника.
- Вычисление положений звезд на основной решетке с использованием входного позиционного каталога и списка координат звезд, хранящихся в ЭВМ.
- Отбор данных для наблюдений из имеющихся в данный момент на решетке.
- Сбор данных с диссектора и системы картирования и передача их на станцию приема (Michelstadt, ФРГ).

- Проведение температурного контроля составляющих оптической системы и компонентов ИСЗ.

3 Результаты

3.1 Каталоги HIP, HIPNEWCAT и XHIP

Результатом проекта Hipparcos стал каталог HIP с координатами и другими характеристиками 118 218 звезд, среди которых почти все звезды, которые ярче 9-й звездной величины, а самые слабые имеют звездную величину 12.4^m . Средняя погрешность для координат звезд каталога составляет около 1 mas. Почти на два порядка величины лучше, чем дают самые хорошие наземные каталоги фундаментальных положений. Кроме того, впервые точно определены расстояния до более чем 100 тыс. звезд. Спутником Hipparcos открыты 2910 звезд с криволинейным перемещением по небу (т.е. звезд с невидимыми спутниками). Были измерены звездные величины и цвета свыше миллиона звезд. Открыто несколько тысяч двойных звезд. Число известных переменных звезд более чем удвоилось. К сожалению, спутник не мог определять лучевые скорости, т.к. из-за неудачного старта отклонился от запланированной геостационарной орбиты.

Положения и собственные движения звезд в Hipparcos приводятся в фундаментальной системе ICRS (International Celestial Reference System), реализованной в настоящее время с помощью каталога внегалактических радиоисточников, получившего название ICRF (International Celestial Reference Frame). Следует отметить, что достигнутая точность привязки осей координат системы отсчета каталога HIP к осям ICRF оценивается величиной 0.6 mas по всем трем углам поворота и величиной 0.25 mas/год по всем трем компонентам вектора остаточного взаимного вращения двух систем отсчета.

В 2007 году вышла новая редакция астрометрических данных каталога HIP [21] — каталог HIPNEWCAT (HIPparcos NEW astrometric CATalog). Утверждается, что точность положений, параллаксов и собственных движений всех звезд, ярче $H_P = 8$, улучшена в 4 раза, а для всех остальных звезд более, чем в 2 раза. Уменьшена взаимная корреляция параметров

иногда в 10 раз.

В 2012 году вышел в свет каталог XHIP (An Extended Hipparcos Compilation) [23], в котором помимо сведений, содержащихся в HIPNEWCAT, собрана дополнительная богатая информация. Для 116 096 звезд приведена спектральная классификация, 46 392 звезд снабжены информацией о лучевых скоростях. В этой базе данных приведены результаты фотометрии в полосах I,J,K, заимствованной из каталога 2MASS. Для 114 315 звезд указаны спектральные классы, при этом для 73 842 звезд приведены классы светимости.

3.2 Фотометрические системы каталогов Hipparcos (и Tycho)

Фотометрические измерения на основном инструменте спутника Hipparcos выполнялись в широкой полосе (обозначаемую как H_P). В дополнение, почти для всех звезд каталога была выполнена двухцветная фотометрия (фотометрия Tycho величины V_T и B_T). Точность определения H_P составляет $0.0004^m - 0.007^m$ (для звезд $2 - 12^m$), а точность одного измерения — $0.003^m - 0.05^m$.

Фотометрические системы H_P , V_T и B_T — это инструментальные системы, и они не совпадают с общепринятой системой Джонсона. Используя значения звездной величины V_J по шкале Джонсона и показателя цвета для 8000 стандартных звезд с хорошими фотометрическими данными в системе B_T и V_T , были получены следующие эмпирические линейные соотношения, применимые к диапазон $-0.2 < (B - V)_T < 1.8$:

$$V_J = V_T - 0.090(B - V)_T$$

$$(B - V)_J = 0.850(B - V)_T$$

Точность этих преобразований в среднем лучше, чем 0.015^m для V_J и 0.05^m для $(B - V)_T$. Эти преобразования применимы к звездам, чей цвет не искажен межзвездным поглощением, и игнорируют зависимость от класса светимости. Формулы вообще не применимы к звездам класса М, даже если их показатель цвета $(B - V)_T < 1.8^m$.

3.3 Диаграмма Герцшпрунга-Рессела

Каталог Hipparcos дает уникальную возможность построить диаграмму для любой выборки звезд. До появления этого каталога это было невозможно из-за плохого знания расстояний. Диаграммы удавалось строить только для тех звезд, для которых имелась косвенная информация, что они находятся от нас примерно на одинаковом расстоянии, например, для звезд одного звездного скопления. Рис. 1 показывает диаграмму Герцшпрунга-Рессела для звезд, ближе 100 пк, у которых относительные ошибки определения параллаксов не будут превышать 10%.

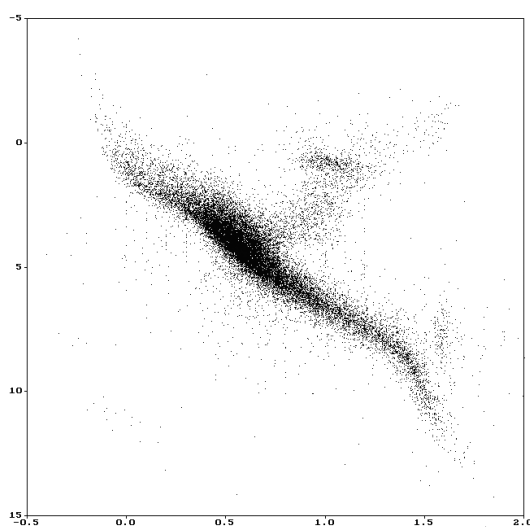


Рис. 1: Диаграмма Герцшпрунга-Рессела для звезд ближе 100 пк на основе данных каталога Hipparcos

3.4 Спектральные характеристики звезд

Каталог Hipparcos для большинства звезд содержит информацию о спектральном типе, полученную из наземных наблюдений. Основным источником – Мичиганский каталог [25] и несколько других каталогов. Диаграмма Герцшпрунга-Рессела, в которой по горизонтальной оси отложен спектральный класс, а не показатель цвета, показывает весьма размытую картину, что указывает на значительные неточности в спектральных классах звезд. Кроме того, информация о спектральных классах приведена только для звезд южного экваториального полушария (рис.2).

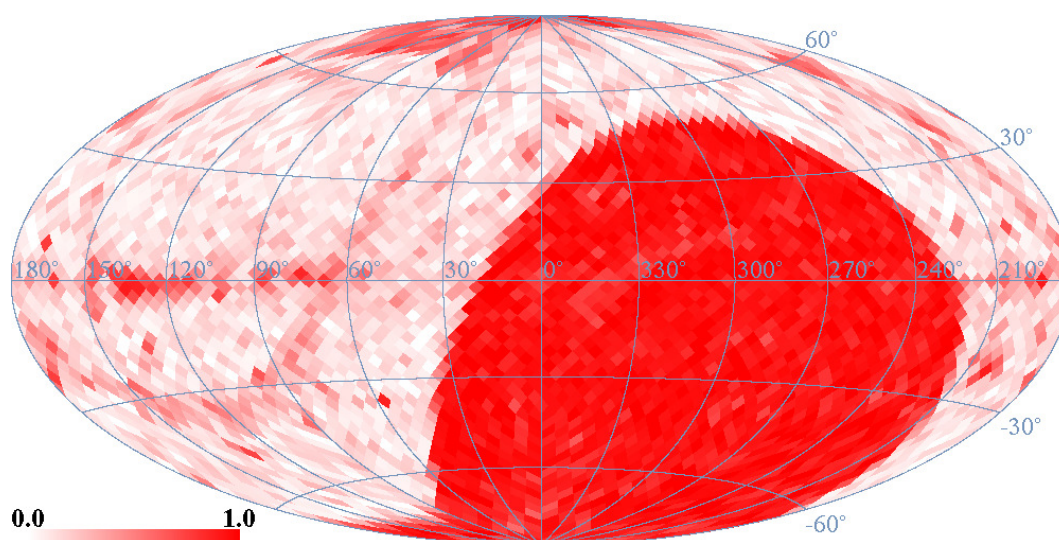


Рис. 2: Распределение звезд на небесной сфере, для которых в каталоге Hipparcos имеются сведения о классе светимости. Чем больше в пикселе доля звезд, имеющих класс светимости, тем он краснее. Видим отсутствие класса светимости практически у всех звезд северного экваториального полушария.

Список литературы

- [1] Итоги науки и техники. Серия: Астрономия. Том 30. Новые методы создания координатных систем. Москва, 1987. – 162.
- [2] Бинни, Меррифилд (J. Binney and M. Merrifield), Galactic Astronomy (Princeton: Princeton Univ. Press, 1998).
- [3] В. Страйжис, Многоцветная фотометрия звезд. Вильнюс, 1977.
- [4] Struve, F. G. W., St. Petersburg: Tip. Acad. Imper., IV . 165 p., (1847)
- [5] Trumpler, R. J., "Preliminary results on the distances, dimensions and space distribution of open star clusters". Lick Observatory Bulletin 14 (420): 154–188. (1930).
- [6] Schlegel, David J.; Finkbeiner, Douglas P; Davis, Marc, "Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds". Astrophysical Journal. v. 500, p/ 525.(1998)

- [7] Perryman M.A.C., Lindegren L., Kovalevsky J., Hog E., Bastian U., Bernacca P.L., Creze M., Donati F., Grenon M., Grewing M., van Leeuwen F., van der Marel H., Mignard F., Murray C.A., Le Poole R.S., Schrijver H., Turon C., Arenou F., Froeschle M., Petersen C.S., "The Hipparcos Catalogue"(1997A&A...323L..49P)
- [8] Скрытски и др., (Skrutskie, M. F., and 30 colleagues), The Two Micron All Sky Survey (2MASS). The Astronomical Journal 131, 1163-1183, (2006).
- [9] Г. А. Гончаров, Трехмерная карта покраснения звезд по фотометрии 2MASS: метод и первые результаты, ПАЖ, том 36, №8, с. 615–627, 2010.
- [10] Г. А. Гончаров, Трехмерная карта межзвездного поглощения в ближайшем килопарсеке, ПАЖ, том 38, №2, с. 108-121, 2012.
- [11] J. Knude and E. Hog, Interstellar reddening from the Hipparcos and Tycho catalogues I. Distances to nearby molecular clouds and star forming regions. Astron. Astrophys., 338, p. 897–904 (1998).
- [12] J. Knude and E. Hog, Interstellar reddening from the Hipparcos and Tycho catalogues II. Nearby dust features at the NGP associated with approaching HI gas. Astron. Astrophys., 341, p. 451457 (1999).
- [13] Цветков А.С. Руководство по практической работе с каталогом Hipparcos, СПб.: СПбГУ, (2005).
- [14] Цветков А.С. Руководство по работе с каталогом TYCHO-2, СПб.: СПбГУ, (2006).
- [15] А. С. Цветков, А. В. Попов, А. А. Смирнов. Неточности в спектральной классификации звезд каталога Tycho-2., ПАЖ, т.34, N1, с.1-11, (2008)
- [16] Hastie, T.; Tibshirani, R. & Friedman, J. (2001), *The Elements of Statistical Learning* , Springer New York Inc. , New York, NY, USA .
- [17] V.N.Vapnik *The Nature of Statistical Learning Theory* 1995.
- [18] Gorski et al. *HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere* 2005.

- [19] Zeljko Ivezic, Andrew J. Connolly, Statistics, Data Mining, and Machine Learning in Astronomy. Princeton University Press. 533 p., 2014
- [20] Hog E., Baessgen G., Bastian U., Egret D., Fabricius C., Grossmann V., Halbwachs J.L., Makarov V.V., Perryman M.A.C., Schwekendiek P., Wagner K., Wicenec A., "The Tycho Catalogue" *Astron& Astrophys*, 323L,57H. 1997.
- [21] Hipparcos, the New Reduction of the Raw Data van Leeuwen F., *Astron. Astrophys.* 474, 653 (2007),
- [22] Wright et al. *Tycho-2 Spectral Type Catalog* 2003: The Astronomical Journal
- [23] Anderson, E.; Francis, Ch. XHIP: An extended hipparcos compilation, *Astronomy Letters*, Volume 38, Issue 5, pp.331-346, 2012.
- [24] V. Straizys and Romualda Lazauskaite. Intrinsic Color Indices and Luminosity Sequences of Stars in the 2MASS Two-color Diagram , *Baltic Astronomy*, vol. 18, 19–31, 2009.
- [25] Houk N. et al. Michigan Catalog of Two-dimensional Spectral Types for HD Stars. Vol. 1-5. Ann. Arbor: Univ. Michigan Dept. Astron. 1978, 1982, 1975, 1988, 1999.