

Санкт-Петербургский государственный университет
Математико-механический факультет

РЕФЕРАТ

на тему:

История проекта Hipparcos

Выполнил:

Амосов Федор Альбертович

Научный руководитель:

Цветков Александр Станиславович

Санкт-Петербург

2016

Содержание

1	Введение	1
2	История	2
3	Конструкция ИСЗ Hipparcos	3
4	Входной каталог Hipparcos	6
5	Обработка данных	7
6	Результаты	7
6.1	Каталоги HIP, HIPNEWCAT и XHIP	7
6.2	Фотометрические системы каталогов Hipparcos и Tycho . . .	8
6.3	Диаграмма Герцшпрунга-Рессела	9
6.4	Спектральные характеристики звезд	10
7	Заключение	11

1 Введение

Для решения задач звездной статистики и динамики необходимо иметь каталог по крайней мере 100 000 звезд в оптическом диапазоне волн. В течение 20 лет Европейским Космическим Агентством (ESA) велись подготовительные работы по созданию такого каталога на основе космических наблюдений. В 1989 году 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. Второй каталог получил название ТУСНО 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 [1].

2 История

Идея высокоточного измерения параллаксов с борта искусственного спутника была предложена еще в 1966 г. французским астрономом Пьером Лакрутом (фр. Pierre Lacroute). Основные преимущества наблюдений из космоса:

- Отсутствие влияния атмосферы, размывающего изображение.
- Минимизация гравитационного и температурного воздействия на инструменты, которые приводят к их искривлению.
- Видимость всего неба одновременно, что позволяет связывать наблюдения в различных частях всей небесной сферы. В частности, можно получить параллаксы, которые являются абсолютными, а не относительными.
- Однородность наблюдений (одним инструментом, в одинаковых условиях) на всей небесной сфере, что является чрезвычайно важным для сравнительных исследований.

Тогда подобное предложение делалось со значительным упреждением в расчете на развитие технологий, однако, членами научного совета Европейского космического агентства была проделана работа по его детальному рассмотрению, предвычислению результатов и дополнению проекта деталями, а в 1980 году ESA приступило к работе над непосредственной реализацией. В процессе разработки проекта дополнительно ввели эксперимент Tycho. Суть эксперимента заключалась в использовании ранее введенного устройства отождествления звезд (англ. star-mapper) для научных целей (первоначально оно использовалось только для определения ориентации спутника в пространстве) [3], [7].

3 Конструкция ИСЗ Hipparcos

Чтобы достичь целей высокоточной глобальной астрометрии, т.е. определения астрометрических параметров звезд по всей небесной сфере с одинаковой точностью, большие углы (порядка радиана) должны измеряться 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 с другом, необходимо было знать положения осей спутника с точностью в $0.1''$. А для этого в стадии выполнения наблюдений ориентировка спутника должна была 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. [2]

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 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 телеско-

Таблица 1: Основные параметры инструмента

Диаметр апертуры	290 мм
Фокусное расстояние	1400 мм
Масса аппарата	500 кг
Максимальная точность	1 mas
Основной угол	58°
Поле зрения	54° × 54°
Период основной решётки	1.208''
Ширина щели основной решётки	0.471''
Число оборотов в сутки	11.25
Высота щели системы картирования	40'
Ширина щели системы картирования	0.90''

па 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 .

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 ограни-

чить 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.

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.

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 1 mas 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.

4 Входной каталог Hipparcos

Спутник наблюдал звезды по заранее определенному перечню. Этот перечень создан так называемым входным каталогом Hipparcos (англ. Hipparcos Input Catalogue). Входной каталог был подобран консорциумом INCA (англ. InPut Catalogue Consortium) в течение 1982-1989 годов, закончен перед стартом и опубликован в бумажном и электронном виде. Помимо астрометрических данных, он содержал полезную информацию о компонентах кратных систем, подборку радиальных скоростей и спектральных типов. Соответствующие характеристики не были получены из наблюдений на спутнике, и, соответственно, не были включены в окончательный каталог Hipparcos.

Ограничения общего времени наблюдений и однородности расположения звезд на небесной сфере привели к тому, что входной каталог содержал около 118 тыс. звезд. Он состоял из двух частей:

1. 58 тыс. объектов, наиболее полно удовлетворяющим следующему ограничению видимой звездной величины m
 - $m < 7.9 + 1.1 \times \sin(b)$ для спектральных классов до G5 (b - галактическая широта)
 - $m < 7.3 + 1.1 \times \sin(b)$ для спектральных классов после G5
2. Дополнительно выбранные звезды не слабее 13^m в соответствии с научными интересами. Они были выбраны среди почти 200 предложений (предоставленных после Приглашения, которое выслало ESA в 1982 году), отобранных Научным комитетом консорциума INCA. Этот выбор был балансом между первичными научными интересами и ограничениями миссии (наблюдаемая звездная величина, общее время наблюдений, требования однородности на небе)

5 Обработка данных

Обработка наблюдений производилась независимо двумя международными консорциумами. В ней принимало участие около 100 астрономов и других ученых (в основном из институтов европейских стран - членов ESA): «северным» (NDAC - Northern Data Analysis Consortium - страны Скандинавии и северной Европы) и «южным» (FAST - Франция, Италия и др.). Обработка продолжалась до августа 1996. За это время было проанализировано около 1000 Гбит данных, собранных в течение 3.5 лет.

Детальная модель калибровки, в частности, содержала преобразования небесных координат в инструментальные. Для устранения эффектов СТО (абберация света) учитывалась скорость спутника. Довольно значительными были эффекты ОТО. Например, искривление света в направлении 90° к эклиптике составляло около 4 mas. Астрометрические параметры рассчитывались решением линеаризованных уравнений в частных производных методом наименьших квадратов.

Анализ данных, собранных звездным картографом, осуществлялся консорциумом TDAC (Tycho Data Analysis Consortium) с независимой проверкой некоторых результатов редукции консорциумом NDAC.

6 Результаты

6.1 Каталоги HIP, HIPNEWSCAT 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 сожале-

нию, 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 [6] — 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) [8], 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.

6.2 Фотометрические системы каталогов Hipparcos и Tycho

Фотометрические измерения на основном инструменте спутника Hipparcos выполнялись в широкой полосе (обозначаемой как H_P). В дополнение, почти для всех звезд каталога была выполнена двухцветная фотометрия (фотометрия Tycho величины V_T и B_T , рис. 1). 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, цвет которых не искажен межзвездным поглощением, и игнорируют зависимость от класса светимости. Формулы вообще не применимы к звездам класса М, даже если их показатель цвета $(B - V)_T < 1.8^m$ [10].

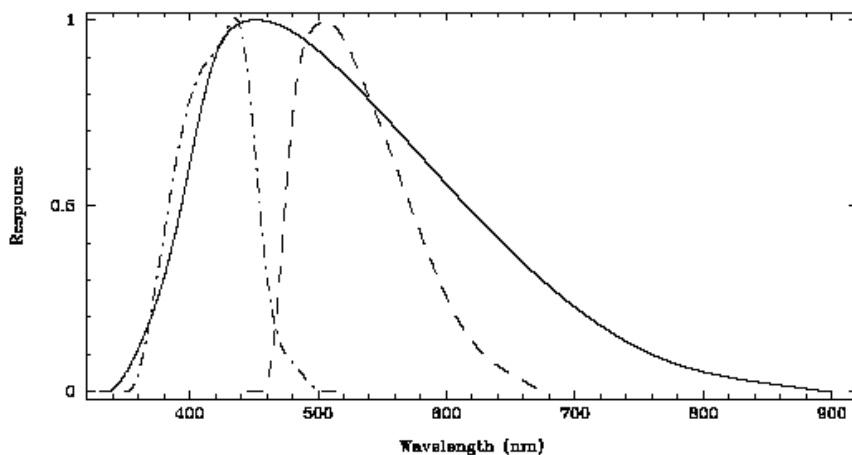


Рис. 1: Фотометрические системы H_P (сплошная линия), V_T (штриховая линия) и B_T (штрих-пунктирная линия)

6.3 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. 2 показывает диаграмму Герцшпрунга-Рессела для звезд, ближе 100 пк, у которых относительные ошибки определения параллаксов не будут превышать 10%.

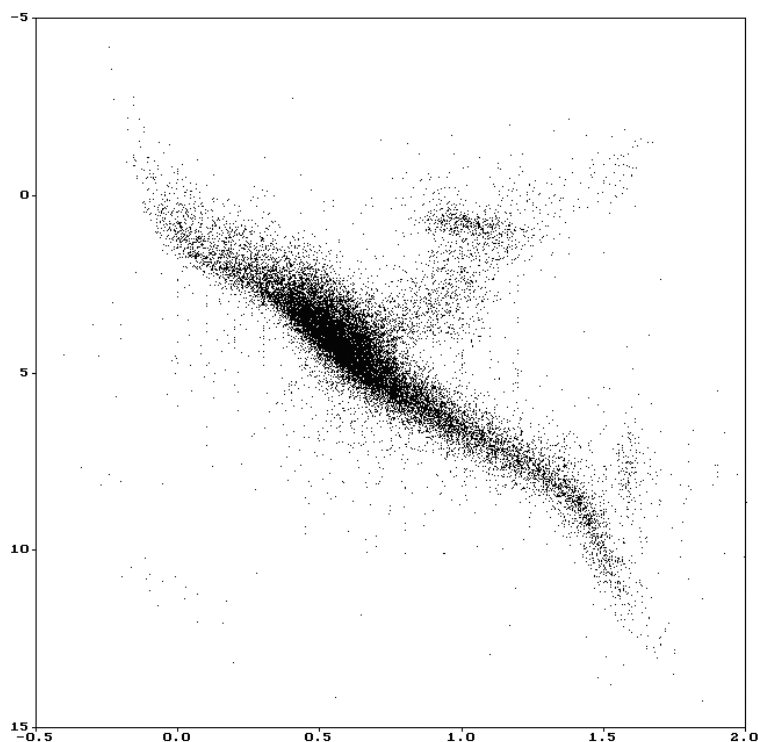


Рис. 2: Диаграмма Герцшпрунга-Рессела для звезд ближе 100 пк на основе данных каталога Hipparcos

6.4 Спектральные характеристики звезд

Каталог Hipparcos для большинства звезд содержит информацию о спектральном типе, полученную из наземных наблюдений. Основным источником – Мичиганский каталог [9] 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 [11]. Кроме того, информация о спектральных классах приведена только для звезд южного экваториального полушария (рис.3).

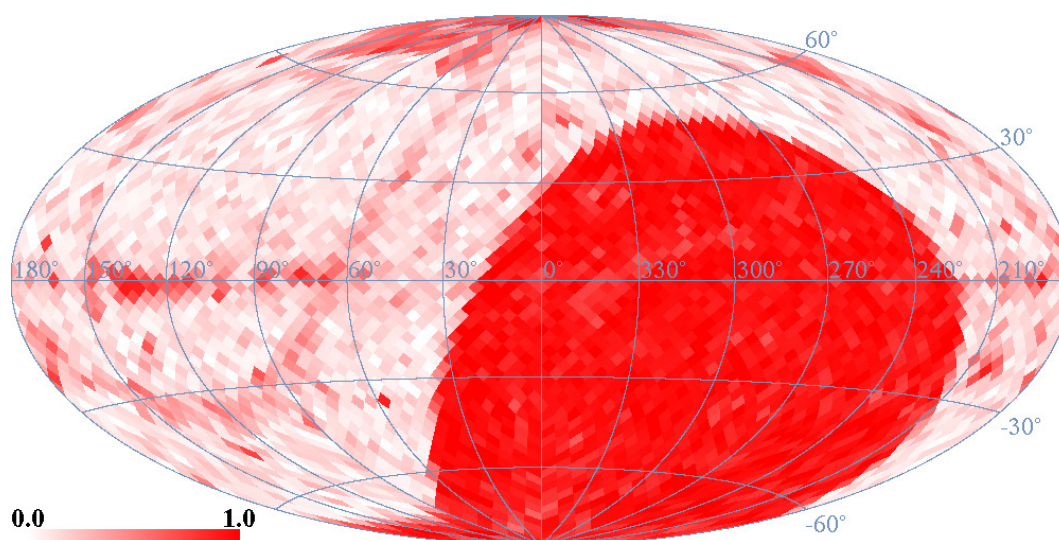


Рис. 3: Распределение звезд на небесной сфере, для которых в каталоге Hipparcos имеются сведения о классе светимости. Чем больше в «пикселе» доля звезд, имеющих класс светимости, тем он краснее. Видим отсутствие класса светимости практически у всех звезд северного экваториального полушария.

7 Заключение

Эксперимент Hipparcos очень сильно повлиял на развитие астрометрии. Он позволил получить много важных научных результатов, о чем свидетельствует число опубликованных статей. Он продемонстрировал то, что очень дорогостоящий (более 700 млн. долларов), но хорошо спланированный эксперимент может показать результаты, дающие начало новой эпохе в науке, в данном случае в астрономии. Hipparcos дал толчок более интенсивной разработке новых проектов (к примеру, GAIA), с намерениями добиться увеличения точности еще в 10—100 раз, и увеличения числа измеренных объектов до 40 млн — 1 млрд.

Список литературы

- [1] В.В. Витязев. Успехи астрометрии. 1999
- [2] Итоги науки и техники. Серия: Астрономия. Том 30. Новые методы создания координатных систем. Москва, 1987. – 162.
- [3] Ж. Ковалевский. Современная астрометрия. — Век 2, 2004.
- [4] 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)
- [5] 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.
- [6] Hipparcos, the New Reduction of the Raw Data van Leeuwen F., *Astron. Astrophys.* 474, 653 (2007),
- [7] Wright et al. *Tycho-2 Spectral Type Catalog* 2003: *The Astronomical Journal*
- [8] Anderson, E.; Francis, Ch. XHIP: An extended hipparcos compilation, *Astronomy Letters*, Volume 38, Issue 5, pp.331-346, 2012.
- [9] 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.
- [10] Цветков А.С. Руководство по практической работе с каталогом Hipparcos, СПб.: СПбГУ, (2005).
- [11] 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)