

Обработка астрометрических наблюдений

15. Космическая астрометрия: эксперимент
HIPPARCOS.

кто: Семенцов В.Н.

когда: 14 мая, 2021

дано ограничения на точность наземных наблюдений
знаем о базовом угле
надо осуществить обзор небесной сферы с целью
получения абсолютизированных собственных
движений и параллаксов

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS

- В классической астрометрии получение высококачественных опорных каталогов достигалось наблюдением объектов на меридианных инструментах.

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS

- В классической астрометрии получение высококачественных опорных каталогов достигалось наблюдением объектов на меридианных инструментах. Вредоносное влияние атмосферы удаётся при этом частично оценить и/или компенсировать.

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS

- В классической астрометрии получение высококачественных опорных каталогов достигалось наблюдением объектов на меридианных инструментах. Вредоносное влияние атмосферы удаётся при этом частично оценить и/или компенсировать. Тщательное исследование механических особенностей меридианного инструмента и учет личных погрешностей наблюдателей позволяли измерять с высокой точностью большие углы между программными звездами, формируя фундаментальный каталог звезд на всей небесной сфере.

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS

- В классической астрометрии получение высококачественных опорных каталогов достигалось наблюдением объектов на меридианных инструментах. Вредоносное влияние атмосферы удаётся при этом частично оценить и/или компенсировать. Тщательное исследование механических особенностей меридианного инструмента и учет личных погрешностей наблюдателей позволяли измерять с высокой точностью большие углы между программными звездами, формируя фундаментальный каталог звезд на всей небесной сфере.
- В середине XX века обнаружилось, что реальная позиционная точность наземных визуальных наблюдений долгое время не растет (это было названо “кризисом в астрометрии”) Lindegren, 1980.

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS

- В классической астрометрии получение высококачественных опорных каталогов достигалось наблюдением объектов на меридианных инструментах. Вредоносное влияние атмосферы удаётся при этом частично оценить и/или компенсировать. Тщательное исследование механических особенностей меридианного инструмента и учет личных погрешностей наблюдателей позволяли измерять с высокой точностью большие углы между программными звездами, формируя фундаментальный каталог звезд на всей небесной сфере.
- В середине XX века обнаружилось, что реальная позиционная точность наземных визуальных наблюдений долгое время не растет (это было названо “кризисом в астрометрии”) Lindegren, 1980.
- В начале 60-х годов была предложена схема космического астрометрического эксперимента, которая обходила бы атмосферные ограничения

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS

- В классической астрометрии получение высококачественных опорных каталогов достигалось наблюдением объектов на меридианных инструментах. Вредоносное влияние атмосферы удаётся при этом частично оценить и/или компенсировать. Тщательное исследование механических особенностей меридианного инструмента и учет личных погрешностей наблюдателей позволяли измерять с высокой точностью большие углы между программными звездами, формируя фундаментальный каталог звезд на всей небесной сфере.
- В середине XX века обнаружилось, что реальная позиционная точность наземных визуальных наблюдений долгое время не растет (это было названо “кризисом в астрометрии”) Lindegren, 1980.
- В начале 60-х годов была предложена схема космического астрометрического эксперимента, которая обходила бы атмосферные ограничения (официальные ссылки имеются на Pierre Lacroute, 1966, но они не подтверждаются библиографическими сервисами, “тайное предание” приписывает схему, аналогичную HIPPARCOS, А.А. Михайлову, но опубликованного текста также нет).

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS (2)

Вкратце предложенная и реализованная затем в эксперименте HIPPARCOS (HIgh Precision PARallax COLlecting Satellite) схема замены меридианных наблюдений космическими выглядит следующим образом:

- Поскольку на орбите нет жесткой опорной оси, которую можно было бы использовать для измерения больших углов, следует использовать два рабочих поля зрения с жестко фиксированным (и достаточно большим) углом между их центрами.

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS (2)

Вкратце предложенная и реализованная затем в эксперименте HIPPARCOS (HIgh Precision PARallax COLlecting Satellite) схема замены меридианных наблюдений космическими выглядит следующим образом:

- Поскольку на орбите нет жесткой опорной оси, которую можно было бы использовать для измерения больших углов, следует использовать два рабочих поля зрения с жестко фиксированным (и достаточно большим) углом между их центрами.
- Нормаль к плоскости, проходящей через центры полей зрения, служит мгновенной осью вращения космического аппарата.

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS (2)

Вкратце предложенная и реализованная затем в эксперименте HIPPARCOS (HIgh Precision PARallax COLlecting Satellite) схема замены меридианных наблюдений космическими выглядит следующим образом:

- Поскольку на орбите нет жесткой опорной оси, которую можно было бы использовать для измерения больших углов, следует использовать два рабочих поля зрения с жестко фиксированным (и достаточно большим) углом между их центрами.
- Нормаль к плоскости, проходящей через центры полей зрения, служит мгновенной осью вращения космического аппарата.
- Медленное смещение этой оси в пространстве позволяет отнаблюдать всю небесную сферу таким образом, чтобы координаты программных звезд оказались измеримы (в узком поле) относительно промежуточных больших кругов,

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS (2)

Вкратце предложенная и реализованная затем в эксперименте HIPPARCOS (HIgh Precision PARallax COLlecting Satellite) схема замены меридианных наблюдений космическими выглядит следующим образом:

- Поскольку на орбите нет жесткой опорной оси, которую можно было бы использовать для измерения больших углов, следует использовать два рабочих поля зрения с жестко фиксированным (и достаточно большим) углом между их центрами.
- Нормаль к плоскости, проходящей через центры полей зрения, служит мгновенной осью вращения космического аппарата.
- Медленное смещение этой оси в пространстве позволяет отнаблюдать всю небесную сферу таким образом, чтобы координаты программных звезд оказались измеримы (в узком поле) относительно промежуточных больших кругов, а параметры этих промежуточных больших кругов определялись бы в процессе увязки (matching) данных за весь период наблюдений (рис. 1).

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS (2)

Вкратце предложенная и реализованная затем в эксперименте HIPPARCOS (HIgh Precision PARallax COLlecting Satellite) схема замены меридианных наблюдений космическими выглядит следующим образом:

- Поскольку на орбите нет жесткой опорной оси, которую можно было бы использовать для измерения больших углов, следует использовать два рабочих поля зрения с жестко фиксированным (и достаточно большим) углом между их центрами.
- Нормаль к плоскости, проходящей через центры полей зрения, служит мгновенной осью вращения космического аппарата.
- Медленное смещение этой оси в пространстве позволяет отнаблюдать всю небесную сферу таким образом, чтобы координаты программных звезд оказались измеримы (в узком поле) относительно промежуточных больших кругов, а параметры этих промежуточных больших кругов определялись бы в процессе увязки (matching) данных за весь период наблюдений (рис. 1).
- Получается такая изящная модификация метода перекрывающихся пластинок.

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS (3)

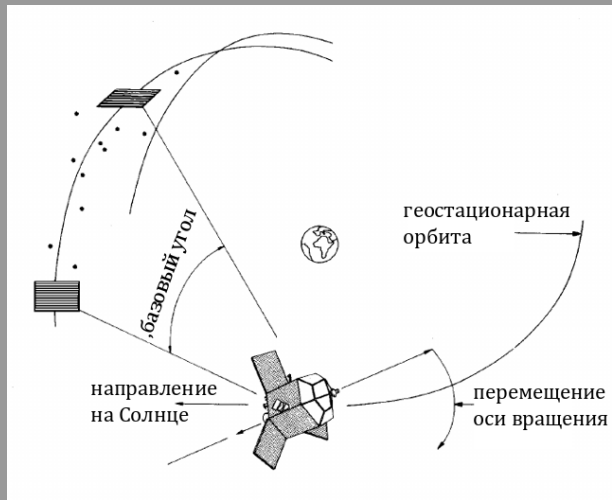


Рис. 1: Общая схема эксперимента HIPPARCOS

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS (4)

1

благодаря наблюдениям из космоса эффекты атмосферного размытия (seeing), инструментального гнутия под воздействием силы тяжести, а также (предполагалось) и тепловых искажений могут быть устранены или сведены к минимуму;

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS (4)

- 1 благодаря наблюдениям из космоса эффекты атмосферного размытия (seeing), инструментального гнутия под воздействием силы тяжести, а также (предполагалось) и тепловых искажений могут быть устранены или сведены к минимуму;
- 2 видимость всего неба позволяет напрямую связывать уравнениями координаты звезд, наблюдаемых по всей небесной сфере;

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS (4)

- 1 благодаря наблюдениям из космоса эффекты атмосферного размытия (seeing), инструментального гнуптия под воздействием силы тяжести, а также (предполагалось) и тепловых искажений могут быть устранены или сведены к минимуму;
- 2 видимость всего неба позволяет напрямую связывать уравнениями координаты звезд, наблюдаемых по всей небесной сфере;
- 3 два направления обзора спутника, разделенные большим углом (58°), обеспечивают (теоретически) жесткую связь между квази-мгновенными одномерными наблюдениями в разных частях неба. Это дает возможность определять параллаксы объектов наблюдения абсолютно (а не относительно некоторой неизвестной нулевой точки);

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS (4)

- 1 благодаря наблюдениям из космоса эффекты атмосферного размытия (seeing), инструментального гнуптия под воздействием силы тяжести, а также (предполагалось) и тепловых искажений могут быть устранены или сведены к минимуму;
- 2 видимость всего неба позволяет напрямую связывать уравнения координаты звезд, наблюдаемых по всей небесной сфере;
- 3 два направления обзора спутника, разделенные большим углом (58°), обеспечивают (теоретически) жесткую связь между квази-мгновенными одномерными наблюдениями в разных частях неба. Это дает возможность определять параллаксы объектов наблюдения абсолютно (а не относительно некоторой неизвестной нулевой точки);
- 4 непрерывное (как предполагалось) сканирование спутником небесной сферы с опорой на эклиптику оптимально использует время наблюдения и породит каталог, обеспечивающий достаточно однородную плотность объектов на разных участках неба и равномерную астрометрическую точность по всей небесной сфере;

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS (5)

- 5 различные геометрические конфигурации сканирования для каждой звезды в различные эпохи в течение трехлетней программы наблюдений привели к плотной сети одномерных положений, из которых барицентрические координаты, параллакс и собственное движение объекта смогли быть решены эффективно глобальным МНК всей совокупности наблюдений.

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS (5)

- 5 различные геометрические конфигурации сканирования для каждой звезды в различные эпохи в течение трехлетней программы наблюдений привели к плотной сети одномерных положений, из которых барицентрические координаты, параллакс и собственное движение объекта смогли быть решены эффективно глобальным МНК всей совокупности наблюдений. Получены астрометрические параметры, а также их стандартные ошибки и коэффициенты корреляции;

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS (5)

- 5 различные геометрические конфигурации сканирования для каждой звезды в различные эпохи в течение трехлетней программы наблюдений привели к плотной сети одномерных положений, из которых барицентрические координаты, параллакс и собственное движение объекта смогли быть решены эффективно глобальным МНК всей совокупности наблюдений. Получены астрометрические параметры, а также их стандартные ошибки и коэффициенты корреляции;
- 6 поскольку число независимых геометрических наблюдений было большим (обычно более 30 на объект) по сравнению с числом неизвестных для стандартной модели (пять астрометрических параметров на звезду), астрометрические решения, не соответствующие этой простой пятипараметрической модели, оказалось возможным расширить с учетом эффектов двойных или кратных звезд или нелинейных движений фотоцентра, объясняемых движениями неразрешенных астрометрических двойных;

Общие принципы организации эксперимента HIPPARCOS (5)

- 5 различные геометрические конфигурации сканирования для каждой звезды в различные эпохи в течение трехлетней программы наблюдений привели к плотной сети одномерных положений, из которых барицентрические координаты, параллакс и собственное движение объекта смогли быть решены эффективно глобальным МНК всей совокупности наблюдений. Получены астрометрические параметры, а также их стандартные ошибки и коэффициенты корреляции;
- 6 поскольку число независимых геометрических наблюдений было большим (обычно более 30 на объект) по сравнению с числом неизвестных для стандартной модели (пять астрометрических параметров на звезду), астрометрические решения, не соответствующие этой простой пятипараметрической модели, оказалось возможным расширить с учетом эффектов двойных или кратных звезд или нелинейных движений фотоцентра, объясняемых движениями неразрешенных астрометрических двойных;
- 7 несколько большее число фотометрических наблюдений (порядка 110 на объект) давало точную и относительно однородную фотометрическую информацию по каждой звезде, на основе которой определялись средний блеск и амплитуда переменности, а во многих случаях — также период и тип переменности.

Схема эксперимента

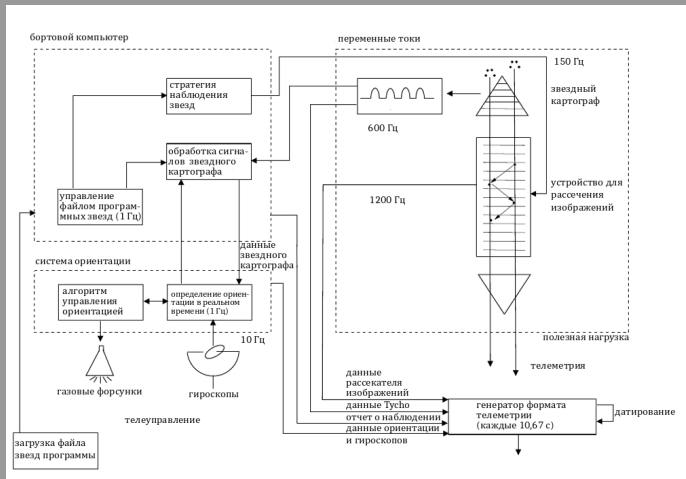


Рис. 2: Блок-схема функционирования научной аппаратуры на борту HIPPARCOS

Наблюдения программных звезд

- 1 Измерения с помощью ЭЛТ отягощены многими ошибками.

Наблюдения программных звезд

- 1 Измерения с помощью ЭЛТ отягощены многими ошибками.
- 2 нелинейность развертки невелика, поскольку она электростатическая

Наблюдения программных звезд

- 1 Измерения с помощью ЭЛТ отягощены многими ошибками.
- 2 нелинейность развертки невелика, поскольку она электростатическая
- 3 нестабильность измеряемых координат на трубке компенсируется наличием решетки-модулятора

Наблюдения программных звезд

- 1 Измерения с помощью ЭЛТ отягощены многими ошибками.
- 2 нелинейность развертки невелика, поскольку она электростатическая
- 3 нестабильность измеряемых координат на трубке компенсируется наличием решетки-модулятора
- 4 большой шум светочувствительных элементов ЭЛТ потребовал стробирования принимаемого сигнала в соответствии с данными входного каталога (регистрация только с тех 10-ти ее 10'' участков фотокатода, где в соответствии с эфемеридными расчетами должны были находиться звезды входного каталога)

Наблюдения программных звезд

- 1 Измерения с помощью ЭЛТ отягощены многими ошибками.
- 2 нелинейность развертки невелика, поскольку она электростатическая
- 3 нестабильность измеряемых координат на трубке компенсируется наличием решетки-модулятора
- 4 большой шум светочувствительных элементов ЭЛТ потребовал стробирования принимаемого сигнала в соответствии с данными входного каталога (регистрация только с тех 10-ти ее 10'' участков фотокатода, где в соответствии с эфемеридными расчетами должны были находиться звезды входного каталога)
- 5 области неба, где в поле зрения фотоприемника попадает более 10 программный объектов (из двух полей зрения телескопа), наблюдались **не полностью**, что-то аппаратура пропускала.

Наблюдения программных звезд (2)

Необработанный сигнал детектора состоит из последовательности подсчетов фотонов N_k , $k = 1, 2, \dots$, полученных в последовательных выборках за время интегрирования $1/1200$ с.

Наблюдения программных звезд (2)

Необработанный сигнал детектора состоит из последовательности подсчетов фотонов N_k , $k = 1, 2, \dots$, полученных в последовательных выборках за время интегрирования $1/1200$ с. Подсчеты определяют модулированный блеск объекта, который (после вычитания фона и различных калибровок) представляется разложением

$$I_k = b_1 + b_2 \cos p_k + b_3 \sin p_k + b_4 \cos 2p_k + b_5 \sin 2p_k \quad (1)$$

Наблюдения программных звезд (2)

Необработанный сигнал детектора состоит из последовательности подсчетов фотонов N_k , $k = 1, 2, \dots$, полученных в последовательных выборках за время интегрирования $1/1200$ с. Подсчеты определяют модулированный блеск объекта, который (после вычитания фона и различных калибровок) представляется разложением

$$I_k = b_1 + b_2 \cos p_k + b_3 \sin p_k + b_4 \cos 2p_k + b_5 \sin 2p_k \quad (1)$$

где $b_1 - b_5$ — коэффициенты Фурье, приведенные в данных о прохождении. I_k — ожидаемая скорость счета фотонов в такте k (выраженная в фотонах на такт $1/1200$ с), а p_k — опорная фаза шаблона.

Наблюдения программных звезд (2)

Необработанный сигнал детектора состоит из последовательности подсчетов фотонов N_k , $k = 1, 2, \dots$, полученных в последовательных выборках за время интегрирования $1/1200$ с. Подсчеты определяют модулированный блеск объекта, который (после вычитания фона и различных калибровок) представляется разложением

$$I_k = b_1 + b_2 \cos p_k + b_3 \sin p_k + b_4 \cos 2p_k + b_5 \sin 2p_k \quad (1)$$

где $b_1 - b_5$ — коэффициенты Фурье, приведенные в данных о прохождении. I_k — ожидаемая скорость счета фотонов в такте k (выраженная в фотонах на такт $1/1200$ с), а p_k — опорная фаза шаблона. Опорная фаза определяется следующими двумя условиями (см рис 3.):

- 1 $p_k = 0$, если щель точно по центру на опорной точке, в середине выборки k ;
- 2 p_k увеличивается от 0 до 2π за время перемещения решетки на один период ($1.2074''$) над контрольной точкой.

Наблюдения программных звезд (3)

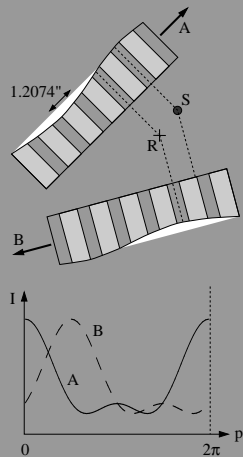


Рис. 3: Определение опорной фазы наблюдения

Наблюдения программных звезд (4)

На рисунке 3 объясняется определение опорной фазы p (в уравнении 1) с использованием опорной точки **R** на небе (с заданными астрометрическими характеристиками). $p = 0$ в момент, когда опорная точка находится строго по центру щели. На диаграмме внизу кривые А и В показывают сигнал приемника в зависимости от опорной фазы, вызванный одним и тем же источником **S**, сканированным в разных направлениях.

Наблюдения программных звезд (4)

На рисунке 3 объясняется определение опорной фазы p (в уравнении 1) с использованием опорной точки **R** на небе (с заданными астрометрическими характеристиками). $p = 0$ в момент, когда опорная точка находится строго по центру щели. На диаграмме внизу кривые A и B показывают сигнал приемника в зависимости от опорной фазы, вызванный одним и тем же источником **S**, сканированным в разных направлениях. Максимум блеска смещен от $p = 0$ на величину проекции расстояния между **S** и **R** на решетку и промодулирован периодом решетки $1.2074''$.

Наблюдения программных звезд (5)

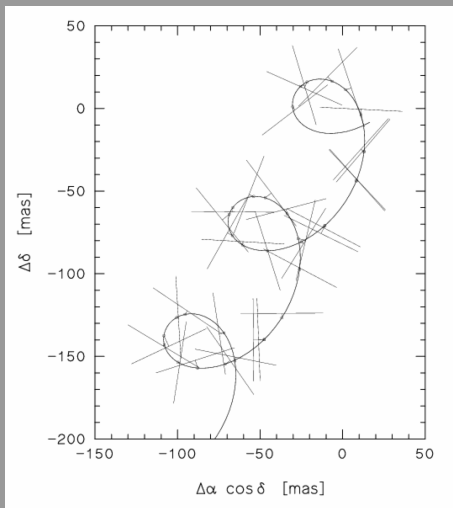


Рис. 4: Путь по небу одного из объектов каталога HIPPARCOS в течение трех лет

Наблюдения программных звезд (6)

Пояснение к рис. 4. Путь по небу одного из объектов каталога HIPPARCOS, в течение трех лет.

- Каждая прямая линия указывает наблюдаемое положение звезды в определенную эпоху: поскольку измерение одномерно, точное местоположение вдоль этой линии положения не определено наблюдением.

Наблюдения программных звезд (6)

Пояснение к рис. 4. Путь по небу одного из объектов каталога HIPPARCOS, в течение трех лет.

- Каждая прямая линия указывает наблюдаемое положение звезды в определенную эпоху: поскольку измерение одномерно, точное местоположение вдоль этой линии положения не определено наблюдением.
- Кривая — это смоделированный трек звезды, соответствующий всем измерениям.

Наблюдения программных звезд (6)

Пояснение к рис. 4. Путь по небу одного из объектов каталога HIPPARCOS, в течение трех лет.

- Каждая прямая линия указывает наблюдаемое положение звезды в определенную эпоху: поскольку измерение одномерно, точное местоположение вдоль этой линии положения не определено наблюдением.
- Кривая — это смоделированный трек звезды, соответствующий всем измерениям.
- Найденное положение для каждой эпохи обозначается точкой, а остаточная погрешность — короткой линией, соединяющей точку с соответствующей линией положения.

Наблюдения программных звезд (6)

Пояснение к рис. 4. Путь по небу одного из объектов каталога HIPPARCOS, в течение трех лет.

- Каждая прямая линия указывает наблюдаемое положение звезды в определенную эпоху: поскольку измерение одномерно, точное местоположение вдоль этой линии положения не определено наблюдением.
- Кривая — это смоделированный трек звезды, соответствующий всем измерениям.
- Найденное положение для каждой эпохи обозначается точкой, а остаточная погрешность — короткой линией, соединяющей точку с соответствующей линией положения.
- Амплитуда колебательного движения дает параллакс звезды, а линейная составляющая представляет собственное движение звезды.

Принципы астрометрических измерений HIPPARCOS (1)

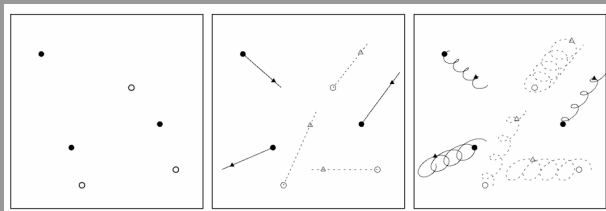


Рис. 5: Принципы астрометрических измерений HIPPARCOS

Заполненные круги и сплошные линии — объекты из одного поля зрения ($\varnothing \sim 1^\circ$), а пустые круги и пунктирные линии — из второго поля зрения, отстоящего на базовый угол. **Слева:** положение объектов в один момент наблюдения. **Середина:** их пространственные движения в течение четырех лет; треугольники показывают их положение на эпоху каталога. **Справа:** все позиционные изменения, включая дополнительные видимые движения из-за годового параллакса и собственного движения.

Принципы астрометрических измерений HIPPARCOS (2)

- На предыдущем рисунке показаны четыре петли, соответствующие четырем оборотам Земли вокруг Солнца.

Принципы астрометрических измерений HIPPARCOS (2)

- На предыдущем рисунке показаны четыре петли, соответствующие четырем оборотам Земли вокруг Солнца.
- Движения, вызванные параллаксом, находятся в фазе для всех звезд в одной и той же области неба, так что измерения в пределах одного поля могут обеспечить только относительные параллаксы.

Принципы астрометрических измерений HIPPARCOS (2)

- На предыдущем рисунке показаны четыре петли, соответствующие четырем оборотам Земли вокруг Солнца.
- Движения, вызванные параллаксом, находятся в фазе для всех звезд в одной и той же области неба, так что измерения в пределах одного поля могут обеспечить только относительные параллаксы.
- Хотя относительные расстояния между звездами непрерывно меняются в течение периода наблюдений, они описываются всего пятью числовыми параметрами на звезду (две компоненты положения, две компоненты собственного движения и параллакс).

Принципы астрометрических измерений HIPPARCOS (3)

DMSA

метка	значение
5	простое астрометрическое решение для одиночной звезды, 5 параметров
7	решение с ускорением (DMSA/G), 7 параметров
9	решение с ускорением (DMSA/G), 9 параметров
C	решение для компонент (DMSA/C)
O	решение с переменностью и уравнением блеска (Variability-Induced-Mover, VIM) (DMSA/V)
X	стохастическое решение (DMSA/X)
-	нет астрометрического решения

Формирование выходных каталогов HIPPARCOS

HC	входной каталог HIPPARCOS
TC	входной каталог Tycho
SM	(Star Mapper) сигнал звездного датчика
ID	(Image Dissector) сигнал ЭЛТ
AC	(Astrographic Catalog) Каталог Карты неба

Формирование выходных каталогов HIPPARCOS

- HIC** входной каталог HIPPARCOS
TIC входной каталог Tycho
SM (Star Mapper) сигнал звездного датчика
ID (Image Dissector) сигнал ЭЛТ
AC (Astrographic Catalog) Каталог Карты неба

$ID \xrightarrow{HIC+SM}$ HIPPARCOS Main Catalog

$SM \xrightarrow{TIC}$ Tycho Catalog

$Tycho \xrightarrow{AC}$ TRC

$Tycho \xrightarrow{AC+}$ ACT

$SM + AC \xrightarrow{TIC}$ Tycho-2

Формирование выходных каталогов HIPPARCOS (2)

Median σ_{α} at J1991.25 ¹	0.77 mas
Median σ_{δ} at J1991.25 ¹	0.64 mas
Median σ_{π} ¹	0.97 mas
Median $\sigma_{\mu_{\alpha} \cos \delta}$ ¹	0.88 mas/yr
Median $\sigma_{\mu_{\delta}}$ ¹	0.74 mas/yr
10 per cent better than ²	0.47–0.66 mas
Smallest errors ²	0.27–0.38 mas
Distance < 10% ($\sigma_{\pi}/\pi < 0.1$)	20 853
Distance < 20% ($\sigma_{\pi}/\pi < 0.2$)	49 399
External errors/standard errors ³	~ 1.0 – 1.2
Systematic errors in astrometry ³	< 0.1 mas

¹ for $H_p \leq 9$ mag

² on each of the five astrometric parameters

³ estimated from various investigations

Рис. 6: Статистика основного каталога HIPPARCOS

Задания к семинару

- Какова самая долгопериодическая геометрическая помеха в эксперименте HIPPARCOS
- Влияние входных каталогов эксперимента HIPPARCOS на результат
- Оценить точность позиционных данных основного каталога HIPPARCOS на настоящий момент
- * Найти в основном каталоге HIPPARCOS области, где измерения могут быть неполны (т.е. в поле 1° находится больше $3 \div 6$ звезд)

спасибо за внимание